

LUCAS GUIDO DAMIÃO RODRIGUES

MATEUS FRANCO E CUNHA

**ESTUDO SOBRE EUTROFIZAÇÃO E TRATAMENTO TERCIÁRIO DE
EFLUENTES DOMÉSTICOS**

SÃO CAETANO DO SUL

2018

LUCAS GUIDO DAMIÃO RODRIGUES

MATEUS FRANCO E CUNHA

**ESTUDO SOBRE EUTROFIZAÇÃO E TRATAMENTO TERCIÁRIO DE
EFLUENTES DOMÉSTICOS**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à
Escola de Engenharia Mauá do Centro
Universitário do Instituto Mauá de Tecnologia
como requisito parcial para a obtenção do
título de Engenheiro Civil.

Orientadora: Profa. Me. Gabriela Sá Leitão de
Mello

Área de concentração: Engenharia Civil

São Caetano do Sul

2018

AGRADECIMENTOS

Aos nossos familiares, amigos e professores pelo apoio ao longo de toda nossa jornada.

À nossa orientadora, Profa. Me. Gabriela Sá Leitão de Mello, pelos ensinamentos, orientações e dedicação em todo o período do trabalho.

À Profa. Dra. Cássia Silveira de Assis, por nos coordenar, instruir e ensinar durante todos esses anos.

Ao Centro Universitário do Instituto Mauá de Tecnologia e seu corpo docente pela dedicação e ensinamentos que nos foi transmitido durante toda a graduação.

RESUMO

O fenômeno da eutrofização consiste no crescimento excessivo de algas em corpos de água devido ao grande aporte de nutrientes, como o fósforo e o nitrogênio. Estes nutrientes são encontrados em abundância no esgoto doméstico. No entanto, os processos de tratamento aplicados na maioria das estações de tratamento de esgoto priorizam a remoção da matéria orgânica, não removendo os nutrientes de forma adequada. Assim, embora livre de matéria orgânica, o esgoto tratado ainda pode causar problemas ao corpo d'água. Este trabalho de pesquisa apresenta um panorama da situação dos reservatórios do Estado de São Paulo com relação ao fenômeno da eutrofização, levando em consideração os níveis de trofia, e explica os processos de tratamento de esgoto, visando a remoção de nutrientes, etapa correspondente ao tratamento terciário de esgotos predominantemente domésticos. São compilados e interpretados, também, os custos obtidos na literatura para remoção de nutrientes, estes variam de USD 10,00 a 540,82 por quilo de fósforo removido, como custo de operação e manutenção e de USD 57.661,68 a 58.083.591,64 como custo de implantação. Também é possível extrair a faixa de valores para o custo por metro cúbico tratado, podendo variar de USD 0,09 a 0,4. Os custos variam muito e são altamente dependentes das variáveis e características de cada estação de tratamento e do esgoto.

Palavras-chave: Eutrofização. Terciário. Nutrientes. Fósforo. Nitrogênio. Reservatórios. Trofia.

ABSTRACT

The phenomenon of eutrophication consists on the excessive growth of algae in water bodies due to the great amount of nutrients, such as phosphorus and. These substances are found with abundance in domestic sewage. These substances are found in abundance in the domestic sewage. However, the treatment processes applied at most sewage treatment plants prioritize the removal of organic matter, not properly removing the nutrients. Thus, although free of organic matter, treated sewage can still cause problems to the water body. This research presents an overview of the São Paulo State in relation to the eutrophication phenomenon, taking into account the trophy levels, and explains the processes of sewage treatment, aiming at the nutrients removal, corresponding to the tertiary treatment. The costs obtained in the literature for nutrient removal are also compiled and interpreted, ranging from USD 10,00 to 540,82 per kilogram of phosphorus removed, as a cost of operation and maintenance. Also, ranges from USD 57.661,68 to 58.083.591,64 as cost implementation. Also possible to extract the range of values for the cost per cubic meter treated, ranging from USD 0,09 to 0,5. These costs are highly vary and dependent on the variables and characteristics of each treatment plant and sewage.

Keywords: Eutrophication. Tertiary. Nutrients. Phosphorus. Nitrogen. Reservoirs. Trophy

LISTA DE FIGURAS

| | |
|--|----|
| FIGURA 1 – VISTA DO RESERVATÓRIO BILLINGS DA RMSP..... | 19 |
| FIGURA 2 – CICLO DO NITROGÊNIO NA NATUREZA..... | 21 |
| FIGURA 3 – CICLO DO FÓSFORO | 24 |
| FIGURA 4 – IMAGEM DO RESERVATÓRIO BILLINGS COM TRECHO EUTROFIZADO | 34 |
| FIGURA 5 – IMAGEM DO RESERVATÓRIO SALTO GRANDE COM TRECHO EUTROFIZADO | 34 |
| FIGURA 6 – TRATAMENTO PRELIMINAR | 38 |
| FIGURA 7 – DECANTADORES CIRCULARES CHEIOS..... | 40 |
| FIGURA 8 – ESQUEMA DE UM DECANTADOR CIRCULAR | 40 |
| FIGURA 9 – VISTA DE UMA ESTAÇÃO DE TRATAMENTO DE ESGOTO COM LAGOAS ANAERÓBIAS, LAGOAS FACULTATIVAS E LAGOAS DE MATURAÇÃO DA ETE DE ARCOS. | 44 |
| FIGURA 10 – ESQUEMA DE UNIDADES DA ETAPA BIOLÓGICA DO SISTEMA POR LODOS ATIVADOS..... | 47 |
| FIGURA 11 – IMAGEM DE UM FILTRO BIOLÓGICO..... | 48 |
| FIGURA 12 – FLUXOGRAMA DE UM SISTEMA DE PRÉ-NITRIFICAÇÃO..... | 51 |
| FIGURA 13 – FLUXOGRAMA DE UM TRATAMENTO POR PÓS-DESNITRIFICAÇÃO..... | 52 |
| FIGURA 14 – FLUXOGRAMA DE UM SISTEMA DE BARDENPHO | 52 |
| FIGURA 15 – FLUXOGRAMA DE UM SISTEMA POR VALO DE OXIDAÇÃO..... | 53 |
| FIGURA 16 – FLUXOGRAMA DOS CICLOS DA OPERAÇÃO INTERMITENTE | 53 |
| FIGURA 17 – FLUXOGRAMA DO PROCESSO PHOREDOX | 55 |
| FIGURA 18 - FLUXOGRAMA DO PROCESSO A ² /O..... | 56 |
| FIGURA 19 – FLUXOGRAMA DO PROCESSO UCT | 56 |
| FIGURA 20 – FLUXOGRAMA DO PROCESSO UCT MODIFICADO | 57 |

| | |
|---|----|
| FIGURA 21 – FLUXOGRAMA DO PROCESSO BARDENPHO 5 ESTÁGIOS | 58 |
| FIGURA 22 – FLUXOGRAMA DO PROCESSO BATELADA | 58 |
| FIGURA 23 – FLUXOGRAMA DO PROCESSO JOHANNESBURG | 59 |
| FIGURA 24 – IMAGEM DA ETE NORTE EM BRASÍLIA..... | 60 |
| FIGURA 25 –IMAGEM DA ETE SUL EM BRASÍLIA | 61 |
| FIGURA 26 – IMAGEM DA ETE GAMA | 61 |
| FIGURA 27 – RELAÇÃO CUSTO POR TIPO DE TRATAMENTO EMPREGADO..... | 68 |
| FIGURA 28 – CUSTO DE IMPLANTAÇÃO EM FUNÇÃO DAS VAZÕES | 70 |
| FIGURA 29 – CUSTO DE OPERAÇÃO E MANUTENÇÃO EM FUNÇÃO DAS VAZÕES | 71 |
| FIGURA 30 – CUSTOS DE IMPLANTAÇÃO EM FUNÇÃO DAS VAZÕES PELO PROCESSO A/O..... | 76 |
| FIGURA 31 – CUSTOS POR QUILO DE FÓSFORO REMOVIDO EM FUNÇÃO DAS VAZÕES PELO PROCESSO A/O | 77 |
| FIGURA 32 – CUSTOS DE IMPLANTAÇÃO EM FUNÇÃO DAS VAZÕES PELO PROCESSO A^2/O | 78 |
| FIGURA 33 – CUSTOS POR QUILO DE FÓSFORO REMOVIDO EM FUNÇÃO DAS VAZÕES PELO PROCESSO A^2/O | 79 |
| FIGURA 34 – CUSTOS DE IMPLANTAÇÃO EM FUNÇÃO DAS VAZÕES PELO PROCESSO DE LODOS ATIVADOS..... | 80 |
| FIGURA 35 – CUSTOS POR QUILO DE FÓSFORO REMOVIDO EM FUNÇÃO DAS VAZÕES PELO PROCESSO DE LODOS ATIVADOS | 81 |
| FIGURA 36 – GRÁFICO COM NUVEM DE PONTOS DE IET DO PONTO DE AMOSTRAGEM RGDE02030 - BILLINGS COM A LINHA DE TENDÊNCIA LINEAR..... | 84 |
| FIGURA 37 – GRÁFICO COM NUVEM DE PONTOS DE IET DO PONTO DE AMOSTRAGEM RGDE02030 - BILLINGS COM A LINHA DE TENDÊNCIA POLINOMIAL DE ORDEM 6 | 85 |

| | |
|---|----|
| FIGURA 38 – GRÁFICO COM NUVEM DE PONTOS DE IET DO PONTO DE AMOSTRAGEM RGDE02200 – BILLINGS COM A LINHA DE TENDÊNCIA LINEAR | 85 |
| FIGURA 39 – GRÁFICO COM NUVEM DE PONTOS DE IET DO PONTO DE AMOSTRAGEM RGDE02200 - BILLINGS COM A LINHA DE TENDÊNCIA POLINOMIAL DE ORDEM 6 | 86 |
| FIGURA 40 – GRÁFICO COM NUVEM DE PONTOS DE IET DO PONTO DE AMOSTRAGEM RGDE02900 – BILLINGS COM A LINHA DE TENDÊNCIA LINEAR | 86 |
| FIGURA 41 – GRÁFICO COM NUVEM DE PONTOS DE IET DO PONTO DE AMOSTRAGEM RGDE02900 - BILLINGS COM A LINHA DE TENDÊNCIA POLINOMIAL DE ORDEM 6 | 87 |

LISTA DE QUADROS

| | |
|---|----|
| QUADRO 1 – NÍVEIS DE EUTROFIZAÇÃO E SUAS RESPECTIVAS CARACTERÍSTICAS..... | 26 |
| QUADRO 2 – CARACTERIZAÇÃO TRÓFICA DE LAGOS E RESERVATÓRIOS..... | 27 |
| QUADRO 3 – FAIXAS APROXIMADAS DE VALORES DE FÓSFORO TOTAL PARA OS PRINCIPAIS GRAUS DE TROFIA..... | 28 |
| QUADRO 4 – VINCULAÇÃO ENTRE USOS DA ÁGUA E OS GRAUS DE TROFIA EM UM CORPO D'ÁGUA..... | 29 |
| QUADRO 5 – CLASSIFICAÇÃO DO ESTADO TRÓFICO PARA RIOS E RESERVATÓRIOS..... | 30 |
| QUADRO 6 – TENDÊNCIA DE MELHORA OU PIORA DE CORPOS D'ÁGUA..... | 31 |
| QUADRO 7 – NÍVEIS DE TRATAMENTO DE ESGOTO E SUAS RESPECTIVAS SUBSTÂNCIAS A SEREM REMOVIDAS..... | 37 |
| QUADRO 8 – CLASSES DAS ÁGUAS DOCES DE ACORDO COM A CONAMA Nº 357 | 62 |
| QUADRO 9 – CONCENTRAÇÕES MÁXIMAS DE SUBSTÂNCIAS RELACIONADAS À EUTROFIZAÇÃO EM ÁGUAS DOCES..... | 63 |
| QUADRO 10 – COMPILADO DE INFORMAÇÕES DE CUSTOS E VAZÕES DAS ETES NORTE, SUL E RIACHO FUNDO..... | 66 |
| QUADRO 11 – CUSTO E VAZÕES DAS ETES GAMA E MELCHIOR..... | 66 |
| QUADRO 12 – CUSTOS DE IMPLANTAÇÃO E OPERAÇÃO PARA DIFERENTES TRATAMENTOS | 67 |
| QUADRO 13 – RELAÇÃO ENTRE TRATAMENTOS, EFICIÊNCIA, CONCENTRAÇÃO DO EFLUENTE E CUSTO..... | 68 |
| QUADRO 14 – CUSTOS PARA ATINGIR CONCENTRAÇÃO DE 0,1 MG/L EM DIFERENTES VAZÕES | 70 |
| QUADRO 15 – TECNOLOGIAS E MELHORAS EMPREGADAS PARA ATINGIR DETERMINADAS CONCENTRAÇÕES FINAIS DE FÓSFORO..... | 72 |

| | |
|--|-----|
| QUADRO 16 – CUSTOS PARA DIFERENTES TRATAMENTOS PARA ATINGIR CONCENTRAÇÃO DE 0,05 mg/L DE P..... | 73 |
| QUADRO 17 – CUSTOS PARA DIFERENTES TRATAMENTOS PARA ATINGIR CONCENTRAÇÃO DE 0,5 mg/L DE P..... | 73 |
| QUADRO 18 – CUSTOS PARA DIFERENTES TRATAMENTOS PARA ATINGIR CONCENTRAÇÃO DE 0,13 mg/L DE P..... | 74 |
| QUADRO 19 – CUSTOS PARA DIFERENTES TRATAMENTOS PARA ATINGIR CONCENTRAÇÃO DE 1,00 mg/L DE P..... | 74 |
| QUADRO 20 – CUSTOS PARA DIFERENTES TRATAMENTOS PARA ATINGIR CONCENTRAÇÃO DE 2,00 mg/L DE P..... | 75 |
| QUADRO 21 – RELAÇÃO DE CONCENTRAÇÃO DE FÓSFORO, CUSTOS E TECNOLOGIAS EMPREGADAS | 82 |
| QUADRO 22 – VALORES OBTIDOS DO R ² PARA DIFERENTES ANÁLISES DE TENDÊNCIA | 87 |
| QUADRO 23 – DADOS DE COLETA DO PONTO DE COLETA RGDE02030 | 99 |
| QUADRO 24 – DADOS DE COLETA DO PONTO DE COLETA RGDE02200 | 99 |
| QUADRO 25 – DADOS DE COLETA DO PONTO DE COLETA RGDE02900 | 101 |

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ANA – Agência Nacional de Águas

A/O – Anaeróbio/Aeróbio

A²/O – Anaeróbio/Anóxico/Aeróbio

BRL – Brasil Real

CAESB – Companhia de Saneamento Ambiental do Distrito Federal

CETESB – Companhia Ambiental do Estado de São Paulo

CONAMA – Conselho Nacional do Meio Ambiente;

DBO – demanda bioquímica de oxigênio

ETE – Estação de tratamento de esgoto

Hab – habitante

IET – Índice do Estado Trófico

IFAS EBPR – Integrated Fixed-Film Activated Sludge Systems with Enhanced Biological Phosphorus Removal

P - Fósforo

PT – Fósforo total

RAFA – Reator Anaeróbio de Fluxo Ascendente

RMSP – Região Metropolitana de São Paulo

SABESP – Companhia de Saneamento Básico do Estado de São Paulo

TAEC – Total anual economic cost

UCT – University of Cape Town

USD – United States Dollar

SUMÁRIO

| | |
|---|-----------|
| 1. INTRODUÇÃO | 15 |
| 2. OBJETIVOS | 17 |
| 3. REVISÃO DA LITERATURA | 18 |
| 3.1 EUTROFIZAÇÃO E SUAS CONSEQUÊNCIAS..... | 18 |
| 3.1.1 Nutrientes contribuintes para a eutrofização..... | 20 |
| 3.1.1.1 Nitrogênio..... | 21 |
| 3.1.1.2 Fósforo..... | 23 |
| 3.2 NÍVEIS TRÓFICOS..... | 25 |
| 3.2.1 Índice do Estado Trófico..... | 29 |
| 3.3 SITUAÇÃO DOS CORPOS D'ÁGUA DO ESTADO DE SÃO PAULO..... | 31 |
| 3.4 IMPORTÂNCIA DO TRATAMENTO DE ESGOTO..... | 35 |
| 3.5 TRATAMENTO DE ESGOTO..... | 36 |
| 3.5.1 Tratamento preliminar..... | 38 |
| 3.5.2 Tratamento primário..... | 39 |
| 3.5.3 Tratamento primário avançado..... | 41 |
| 3.5.4 Tratamento secundário..... | 41 |
| 3.5.4.1 Lagoas de estabilização..... | 42 |
| 3.5.4.2 Processos anaeróbios..... | 44 |
| 3.5.4.3 Lodos ativados..... | 46 |
| 3.5.4.4 Filtros biológicos..... | 48 |
| 3.5.4.3 Valo de oxidação..... | 48 |
| 3.6 TRATAMENTO TERCIÁRIO PARA A REMOÇÃO DE NUTRIENTES..... | 49 |
| 3.6.1 Remoção do nitrogênio..... | 49 |
| 3.6.2 Remoção de fósforo..... | 54 |
| 3.7 LEGISLAÇÃO PARA CONTROLE DE NUTRIENTES..... | 62 |
| 3.8 COMPILAÇÃO E INTERPRETAÇÃO DE CUSTOS PARA A IMPLANTAÇÃO E OPERAÇÃO DE TRATAMENTO TERCIÁRIO PARA REMOÇÃO DE FÓSFORO..... | 64 |
| 4. METODOLOGIA..... | 83 |

| | |
|---|-----------|
| 5. VERIFICAÇÃO DA ANÁLISE DE TENDÊNCIA DO IET..... | 84 |
| 6. CONSIDERAÇÕES FINAIS..... | 89 |
| REFERÊNCIAS | 91 |
| ANEXO..... | 99 |

1. INTRODUÇÃO

O Brasil apresenta um cenário precário e preocupante com relação à coleta e ao tratamento de esgotos sanitários. De acordo com um levantamento da Agência Nacional Águas (2017), dos 5570 municípios brasileiros, 3738 não têm estação de tratamento de esgotos. Os dados apontam que menos da metade (42,6%) dos esgotos do país é coletada e tratada. Essa deficiência acarreta problemas sociais, econômicos e ambientais.

Uma pesquisa realizada pelo Instituto Trata Brasil (2017) revela que 48,08% da população não têm acesso à coleta de esgoto. Sendo a população brasileira de 207,6 milhões, quase metade da população, 100 milhões, não contam com esse serviço.

O lançamento de esgotos diretamente em cursos d'água resulta impactos negativos sobre a vida aquática e a saúde da população. Além de disseminar doenças e restringir o uso da água. Sendo assim, os esgotos precisam ser coletados, tratados e lançados em corpos receptores de acordo com a legislação vigente ou reaproveitados como água de reúso.

O tratamento de esgotos consiste basicamente de quatro níveis: preliminar, primário, secundário e terciário. De acordo com Sperling (2014), o tratamento preliminar consiste em remover os sólidos grosseiros e flutuantes. O tratamento primário remove os sólidos em suspensão sedimentáveis e os sólidos flutuantes, enquanto o tratamento secundário remove a matéria orgânica solúvel e particulada. Por fim, o tratamento terciário é realizado para remover nutrientes e substâncias residuais específicas, a fim de se obter um efluente que atenda às diretrizes dispostas nas leis ou outros requisitos.

A etapa de remoção de nutrientes, ou seja, o tratamento terciário, não é aplicada de maneira abrangente no país e será, portanto, o tema deste estudo, uma vez que sua necessidade é relevante para a manutenção e equilíbrio do meio aquático. A cidade de Brasília foi pioneira ao instalar ETEs para a remoção de nitrogênio e fósforo (JORDÃO e PESSOA, 2009). Junto ao site da empresa CAESB – Companhia de Saneamento Ambiental do Distrito Federal, estão disponibilizados dados sobre os tratamentos realizados em suas estações. Nove das suas dezessete ETEs possuem tratamento em nível terciário para a remoção de nutrientes.(CAESB, 2018).

No estado de São Paulo, dados disponibilizados pela SABESP relatam que as estações de tratamento de esgoto da Região Metropolitana de São Paulo realizam tratamento somente até o nível secundário (SABESP, 2018).

O Brasil apresenta uma grande carência na área de saneamento, assim, a questão da eutrofização pode passar despercebida enquanto a implementação de tratamentos primários, secundários e instalações de redes de esgoto tomam prioridade, deixando questões ambientais sobre a eutrofização em segundo plano.

De acordo com o relatório da CETESB (2016), no qual foram divulgados os dados de análise do nível trófico das águas, observou-se uma tendência significativa de piora no estado trófico dos corpos d'água. Sendo assim, o relatório recomendou a ampliação de investimentos em unidades de tratamento terciário, com remoção de nutrientes, nas estações de tratamento de esgotos existentes, além da ampliação de ações integradas de prevenção e controle da poluição dos mananciais.

2. OBJETIVOS

Os objetivos deste trabalho de pesquisa são:

- Apresentar o problema da eutrofização e seu panorama com relação aos corpos d'água do estado de São Paulo;
- Descrever os processos de tratamento terciário de esgotos predominantemente domésticos a fim de diminuir o aporte de nitrogênio e fósforo aos corpos d'água e revisar os custos destes tratamentos com base na literatura;
- Verificar o método de análise de tendência do Índice do Estado Trófico utilizado pela CETESB.

3. REVISÃO DA LITERATURA

A revisão da literatura visa abordar os processos aos quais os esgotos são submetidos para adquirirem aspectos não prejudiciais à biota e ao ser humano, com foco na remoção de nutrientes. Além de apresentar o problema da eutrofização e o panorama dos corpos d'água do Estado de São Paulo quanto a seu nível de trofia.

3.1 EUTROFIZAÇÃO E SUAS CONSEQUÊNCIAS

Thomann e Mueller (1987, apud SPERLING, 2014, p.216) afirma que “a eutrofização é o crescimento excessivo das plantas aquáticas, tanto planctônicas quando aderidas, em níveis tais que sejam consideradas como causadoras de interferências com os usos desejáveis do corpo d'água”.

A eutrofização é um dos problemas causados pelo não tratamento adequado dos esgotos e será o foco deste estudo.

O nitrogênio e o fósforo são os principais nutrientes utilizados pelas plantas e algas para seu crescimento. Os esgotos brutos quando descarregados nos corpos d'água despejam grandes quantidades de matéria orgânica. Essa matéria orgânica será decomposta no fenômeno da autodepuração do corpo d'água. Após a decomposição dessa matéria, grandes quantidades de nutrientes serão disponibilizadas ao meio tornando-o fértil. Assim, o ambiente aquático se torna apto para o crescimento de seres que utilizam dos nutrientes para seu crescimento, especialmente as algas. Caso as descargas de nutrientes sejam muito intensas, ocorre o florescimento excessivo de algas. Em decorrência disso, ocorre o fenômeno de eutrofização (PIVELI e KATO, 2006). O fenômeno da eutrofização pode ser agravado caso as condições de crescimento das plantas e algas sejam intensificadas, como por exemplo o aumento da insolação, levando a um evento de superpopulação, conhecido como floração das águas (SPERLING, 2014).

Os corpos d'água mais suscetíveis ao fenômeno descrito são aqueles de ambiente lântico, ou seja, que apresentam velocidade baixa, como lagos e represas. Embora também ocorra em rios, é menos frequente, dado que essas águas apresentam maior turbidez e velocidade.

A Figura 1 mostra uma imagem do reservatório Billings, localizado na Região Metropolitana de São Paulo. Na imagem, observa-se à esquerda o braço do Rio Grande e à direita a Billings,

que possui coloração verde, indicativo do crescimento excessivo de algas decorrente da eutrofização.

FIGURA 1 – VISTA DO RESERVATÓRIO BILLINGS DA RMSP



FONTE: (ABC, 2017)

A represa Billings é dividida em unidades menores, denominadas braços, um deles, é o Rio Grande. Este foi isolado do sistema Billings com o objetivo de manter suas águas com qualidade, uma vez que a Billings apresenta maior grau de poluição (CETESB, 2015)

A eutrofização traz efeitos indesejáveis, sendo os seguintes os principais (SPERLING, 2014):

- Problemas estéticos e recreacionais: a quantidade de água disponibilizada para o uso de recreação, balneabilidade e atração turística é reduzida, pois a eutrofização acarreta mortandade de peixes, maus odores, multiplicação de insetos e mosquitos e crescimento excessivo de vegetação.
- Anaerobiose: a superpopulação de algas na superfície da água impede que a luz atinja camadas inferiores do corpo d'água, levando à morte de algas e microrganismos dessas regiões. Tal condição aumenta a matéria orgânica disponível, o que leva ao crescimento de bactérias e o consumo de oxigênio dissolvido. Esse problema, aliado à sedimentação da matéria orgânica já existente no fundo do ambiente aquático leva o lago a condições de anaerobiose. Isso leva a mortandade de peixes e outros seres vivos, além de problemas de toxidade e maus odores. Todos esses eventos intensificam a deterioração da qualidade da água.

- Morte de peixes: além de ser causada pela anaerobiose, a mortandade de peixes também cresce devido à toxicidade da amônia, que tem sua concentração aumentada em períodos de aumento de fotossíntese. Nessas condições ocorre o aumento do pH do meio, fazendo com que a amônia se apresenta na forma NH_3 , que é tóxica, ao invés de sua forma iônica NH_4^+ não tóxica.
- Maiores custos no tratamento da água: o crescimento excessivo de algas eleva os gastos com tratamento de água devido à necessidade de remoção das algas, remoção da cor, remoção do sabor e odor, gerando assim maior consumo de produtos químicos e maior lavagem dos filtros.
- Toxicidade das algas: o crescimento de cianobactérias, também se dá junto à disponibilidade de nutrientes no meio aquático. Cianobactérias são um grupo de bactérias que obtém energia a partir da fotossíntese. Além de alterarem a cor do meio e produzirem odores desagradáveis, tais bactérias produzem toxinas que ficam armazenadas em suas células, sendo liberadas quando ocorre a lise celular, ou seja, a ruptura da membrana celular. Essas toxinas, chamadas de cianotoxinas são perigosas ao homem e outros seres vivos. O evento da lise pode ocorrer por morte natural da bactéria, por algicidas (produto químico utilizado para eliminar algas), como o sulfato de cobre ou cloração (SIQUEIRA e FILHO, 2008). Em razão disso, o tratamento realizado nas estações de tratamento de água é ineficaz quanto ao controle destas toxinas. Assim medidas necessárias para a adução de águas eutrofizadas se tornam caras, rigorosas e dispendiosas.
- Desaparecimento do lago: devido à eutrofização e ao assoreamento, a acumulação de matéria e de vegetação no fundo leva à perda de profundidade do lago, tornando-o cada vez mais raso. Caso isso aconteça, o desaparecimento do lago é irreversível. Embora seja um processo extremamente lento, atividades antrópicas podem acelerá-lo bruscamente.
- Navegação e transporte: o crescimento de algas gera problemas operacionais que dificultam a navegação devido ao entupimentos de equipamentos, grades e canais (CHAO, 2006).

3.1.1 Nutrientes contribuintes para a eutrofização

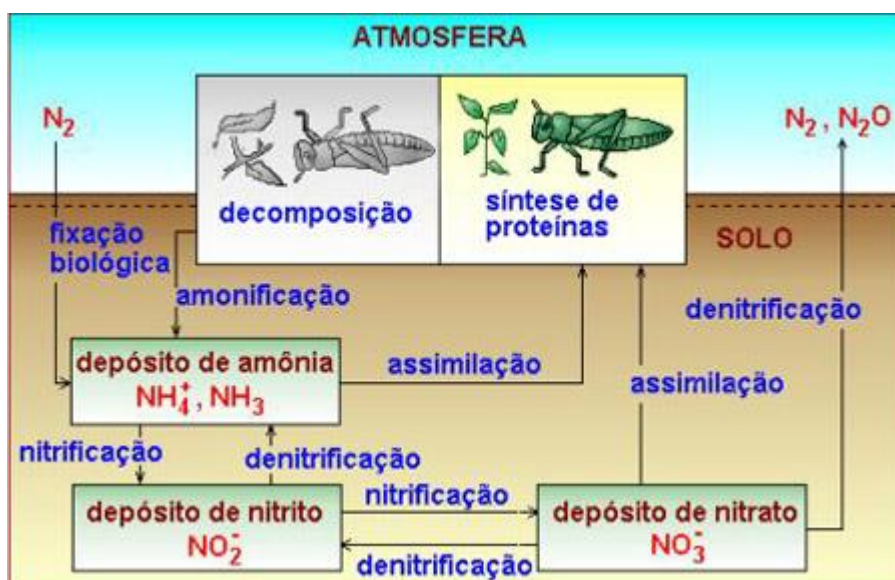
Entre outros fatores, a eutrofização dos corpos d'água está ligada à quantidade de nutrientes disponível no meio, sendo os principais o fósforo e o nitrogênio. Estes serão abordados nos próximos itens a fim de explicar seus processos naturais e sua importância.

3.1.1.1 Nitrogênio

O nitrogênio é um importante nutriente presente nos esgotos, que, em excesso, pode levar à eutrofização de corpos d'água. Além disso, o nitrogênio é um componente fundamental dos seres vivos, sendo ele um dos constituintes das proteínas e ácidos nucleicos (SANTOS, 2016).

De acordo com Santos (2016), o nitrogênio é encontrado na natureza na forma do gás inerte N_2 na atmosfera, sendo o principal componente do ar, cerca de 78% de sua composição. Embora sua disponibilidade seja ampla, somente alguns tipos de bactérias e cianobactérias são capazes de assimilá-lo em sua forma molecular. Devido à incapacidade de assimilação, os animais conseguem utilizar do nitrogênio somente através de compostos orgânicos. Já as algas e plantas o utilizam na forma de nutrientes inorgânicos, os íons nitrato NO_3^- ou íons amônio NH_4^+ . A Figura 2 representa o ciclo do nitrogênio.

FIGURA 2 – CICLO DO NITROGÊNIO NA NATUREZA



FONTE: Virtuous (2008)

O ciclo do nitrogênio tem sua importância por permitir que o elemento sofra alterações em sua estrutura química, se tornando capaz de interagir entre os diferentes organismos vivos.

Além disso, é importante compreender o ciclo do nitrogênio porque os processos para sua remoção dos esgotos domésticos têm como base esse ciclo natural.

O ciclo do nitrogênio pode ser dividido em quatro etapas (VIRTUOUS, 2008):

- a) **Fixação:** O nitrogênio gasoso é transformado em substâncias capazes de serem assimiladas pelos seres vivos, são elas: a amônia e o nitrato. A fixação pode ocorrer de duas maneiras: por descargas elétricas, ou química, na atmosfera ou processos biológicos.
 - **Fixação atmosférica, ou química:** descargas elétricas na atmosfera oxidam a molécula de nitrogênio N_2 e o transforma em pentóxido de nitrogênio N_2O_5 . A água reage com o pentóxido, produzindo ácido nítrico HNO_3 , o qual é carregado para o solo e corpos d'água, onde é transformado em nitrato NO_3^- (ASSUNÇÃO, 2009). Esse método tem capacidade reduzida, não sendo suficiente para os organismos da Terra se manterem (CYCLE, 2016).
 - **Fixação biológica:** realizada por organismos vivos, como as bactérias e algumas cianobactérias, retirando o nitrogênio do ar e fazendo com que reaja com o hidrogênio, formando assim a amônia NH_3 .
- b) **Amonificação:** a amônia encontrada no solo é proveniente de dois processos: do processo de fixação e do processo de decomposição de compostos orgânicos, como proteínas, aminoácidos e nas excretas. Essa etapa do ciclo do nitrogênio é realizada por bactérias e fungos, que transformam os compostos nitrogenados em substâncias mais simples, o amônio NH_4^+ .
- c) **Nitrificação:** ocorre a conversão da amônia e amônio em nitritos e nitratos. É um processo essencialmente aeróbio. Esta etapa é dividida em duas:
 - **Nitrosação:** a amônia é convertida em nitrito NO_2^- .

$$2NH_3 + 3O_2 \rightarrow 2NO_2^- + 2H_2O + 2H^+$$
 - **Nitratação:** os íons nitrito são convertidos em nitrato NO_3^- .

$$2NO_2^- + O_2 \rightarrow 2NO_3^-$$

O nitrato, que é um composto inorgânico, é liberado no solo e posteriormente é absorvido pelas plantas, algas e algumas bactérias, sendo convertido em compostos orgânicos. O nitrato é utilizado para a síntese de aminoácidos e bases nitrogenadas nas plantas. Dessa maneira, o nitrogênio na forma de compostos orgânicos é disponibilizado na cadeia alimentar.

- d) Desnitrificação: nesta etapa, os nitratos são convertidos em nitrogênio molecular por bactérias desnitrificantes. Nesta etapa também pode ocorrer durante o processo de decomposição, a conversão de compostos orgânicos em nitratos, amônia e N_2 . Na forma de gás, o nitrogênio volta para a atmosfera, fechando o ciclo. Esta etapa ocorre em meio anóxico, ou seja, na ausência de oxigênio livre.

De acordo com Piveli e Kato (2006), os compostos de nitrogênio encontrados no esgoto estão na forma de nitrogênio orgânico, amoniacal, nitrito e nitrato. Os compostos nitrogenados, tais como material proteico e a ureia, são a fonte de nitrogênio encontrada nos esgotos. Tais compostos são decompostos por bactérias, transformando-os em amônia.

Sua forma amoniacal pode ser reduzida a nitritos e nitratos caso o meio apresente característica aeróbica, sendo um indicador da estabilização ou não do esgoto. Ou seja, para que ocorra a oxidação da amônia, é necessária uma quantidade de oxigênio para a decomposição da matéria orgânica. Caso a matéria orgânica tenha se estabilizado, haverá oxigênio disponível para a nitrificação.

Sendo assim, pode-se inferir que o esgoto já pode ser considerado estabilizado em relação à demanda de oxigênio se houver uma predominância de nitratos, que é a forma mais oxidada do nitrogênio encontrado em efluentes (METCALF & EDDY, 2016).

Outro problema relacionado à presença de nitrogênio nas águas é em relação à sua toxicidade. Algumas de suas formas são prejudiciais aos seres vivos. O nitrato, por exemplo, é letal para crianças, causando uma doença chamada metaemoglobina. Outra forma tóxica do nitrogênio é a amônia, que restringe a vida dos peixes, além de aumentar o consumo de oxigênio dissolvido nas águas para sua oxidação, realizada pelas bactérias (PIVELI e KATO, 2006)

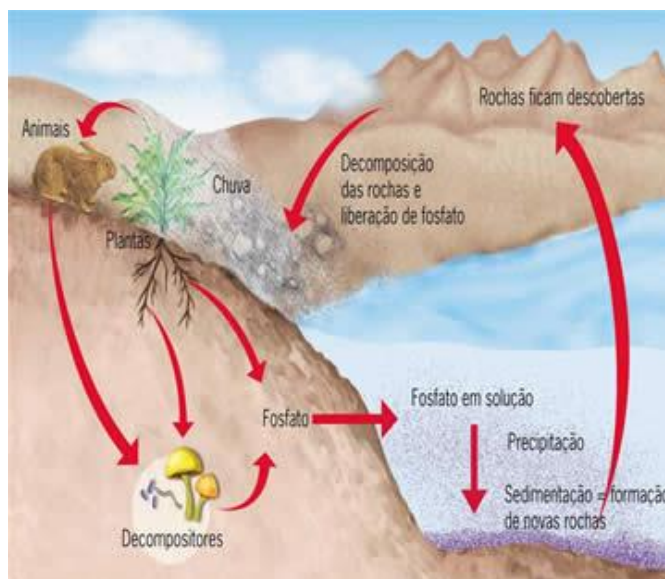
3.1.1.2 Fósforo

O fósforo, assim como o nitrogênio, tem grande importância para os seres vivos, constituindo moléculas do DNA e participando de reações orgânicas nas células. Diferentemente do nitrogênio, o fósforo não possui formas gasosas, além de possuir apenas um composto necessário para os seres vivos, o íon fosfato (VIRTUOUS, 2008).

O fósforo é disponibilizado na natureza através dos fenômenos de intemperismo que desgastam as rochas, que são o maior reservatório desse elemento. Sua incorporação nos seres vivos começa pela ação das plantas, que o absorve na forma de fosfato no solo. A partir daí

ele é responsável pela formação de compostos orgânicos de fosfato. Ele também pode ser ingerido por outros animais a partir da ingestão de água, por ser solúvel. A morte de animais e plantas, leva os organismos decompositores transformarem o fosfato orgânico em fosfato inorgânico, sendo assim devolvido ao solo e à água (CYCLE, 2016). Na Figura 3, está representado o ciclo no fósforo.

FIGURA 3 – CICLO DO FÓSFORO



FONTE: Virtuous (2008)

Por não apresentar forma gasosa, o fósforo possui um ciclo mais simples que o nitrogênio, podendo se apresentar na forma orgânica e inorgânica. Quando combinado à matéria orgânica, proteínas e aminoácidos, o fósforo está em sua forma orgânica; e na forma inorgânica quando se apresenta nas formas de ortofosfato e polifosfatos (JORDÃO e PESSOA, 2009).

De acordo com Piveli e Kato (2006), as fontes artificiais de fósforo transcorrem principalmente devido aos esgotos sanitários humanos e o detergente corresponde à maior parte da parcela de contribuição do fósforo. O restante se deve à matéria orgânica constituinte do esgoto, como a matéria fecal, a qual é rica em proteínas.

3.2 NÍVEIS TRÓFICOS

Devido ao fenômeno da eutrofização é necessário avaliar os corpos d'água e classificá-los em graus de trofia, ou seja, avaliar a qualidade da água quanto ao enriquecimento por nutrientes e seu efeito relacionado ao crescimento excessivo das algas e cianobactérias.

Segundo Sperling (2014), a classificação dos níveis tróficos é composta por basicamente três categorias:

- Oligotrófico: compõem esse grupo os corpos d'água claros e com baixa produtividade.
- Mesotrófico: o meio apresenta produtividade intermediária.
- Eutrófico: apresentam elevada produtividade, em comparação com o nível natural básico.

Com o intuito de classificar e caracterizar os corpos d'água de maneira mais particular, outras classificações para os níveis tróficos foram criadas. Os dados do Quadro 1 na página seguinte se referem aos parâmetros que a Agência Nacional de Águas (2018) utiliza.

QUADRO 1 – NÍVEIS DE EUTROFIZAÇÃO E SUAS RESPECTIVAS CARACTERÍSTICAS

| Nível trófico | Característica |
|----------------------|--|
| Ultraoligotrófico | Corpos d'água limpos, de produtividade muito baixa e concentrações insignificantes de nutrientes, tais que não acarretam em prejuízos aos usos da água. |
| Oligotrófico | Corpos d'água limpos, de baixa produtividade, em que não ocorrem interferências indesejáveis sobre os usos da água, decorrentes da presença de nutrientes. |
| Mesotrófico | Corpos d'água com produtividade intermediária, com possíveis implicações sobre a qualidade da água, mas em níveis aceitáveis, na maioria dos casos. |
| Eutrófico | Corpos d'água com alta produtividade em relação às condições naturais, com redução da transparência, em geral afetados por atividades antrópicas, nos quais ocorrem alterações indesejáveis na qualidade da água decorrentes do aumento da concentração de nutrientes e interferências nos seus múltiplos usos. |
| Supereutrófico | Corpos d'água com alta produtividade em relação às condições naturais, de baixa transparência, em geral afetados por atividades antrópicas, nos quais ocorrem com frequência alterações indesejáveis na qualidade da água, como a ocorrência de episódios florações de algas, e interferências nos seus múltiplos usos |
| Hipereutrófico | Corpos d'água afetados significativamente pelas elevadas concentrações de matéria orgânica e nutrientes, com comprometimento acentuado nos seus usos, associado a episódios florações de algas ou mortandades de peixes, com consequências indesejáveis para seus múltiplos usos. |

FONTE: (ANA, 2018)

Sperling (2014) caracteriza os níveis tróficos de maneira qualitativa como mostrado no Quadro 2. As classes de trofia utilizadas pelo autor Sperling é diferente da ANA, esta utiliza uma classe a mais, a classe supereutrófica.

QUADRO 2 – CARACTERIZAÇÃO TRÓFICA DE LAGOS E RESERVATÓRIOS

| Item | Classe de trofia | | | | |
|---|----------------------|----------------------|-------------------------------------|---|---|
| | Ultraoligotrófico | Oligotrófico | Mesotrófico | Eutrófico | Hipereutrófico |
| Biomassa | Bastante Baixa | Reduzida | Média | Alta | Bastante alta |
| Fração de algas verde e/ou cianobactérias | Baixa | Baixa | Variável | Alta | Bastante alta |
| Macrófitas | Baixa ou ausente | Baixa | Variável | Alta ou baixa | Baixa |
| Dinâmica de produção | Bastante Baixa | Baixa | Média | Alta | Alta, instável |
| Dinâmica de oxigênio na camada superior | Normalmente saturado | Normalmente saturado | Variável em torno da supersaturação | Frequentemente supersaturado | Bastante instável, de supersaturação à ausência |
| Dinâmica de oxigênio na camada inferior | Normalmente saturado | Normalmente saturado | Variável abaixo da saturação | Abaixo da saturação à completa ausência | Bastante instável, de supersaturação à ausência |
| Prejuízo aos usos múltiplos | Baixo | Baixo | Variável | Alto | Bastante Alto |

FONTE: Sperling (2014)

Conforme Sperling (2014), a avaliação dos corpos aquáticos por aspectos quantitativos, apresenta maiores dificuldades, principalmente no que diz respeito aos lagos tropicais, por serem capazes de maior assimilação de fósforo que lagos de outros climas. Há diversas publicações que diferem entre si quanto à faixa de análise de dados, ocorrendo a ressalva de não generalizar dados de um corpo d'água para outros.

Costuma-se avaliar os níveis de trofia com base no fósforo. O nitrogênio pode vir a ser o representativo do grau de trofia caso ele venha a ser o nutriente que controla o processo de eutrofização, ou seja, se torna um fator limitante. A essa limitação, nomeia-se nutriente

limitante, ou seja, o nutriente essencial para uma determinada população que é capaz de limitar seu crescimento.

O nutriente limitante é aquele que está disponível em quantidades menores. O nutriente em maior quantidade não permitirá o desenvolvimento de uma dada população, pois o crescimento desta está limitada pela insuficiência do nutriente em menor quantidade, ou seja, o nutriente limitante.

Para Salas e Martino (1991, apud SPERLING, 2014, p.226) o nutriente limitante para os lagos tropicais da América Latina é o fósforo. Isso ocorre devido às cianobactérias que realizam a fixação do nitrogênio, não havendo portando uma concentração reduzida deste nutriente mesmo com a diminuição da carga de efluentes em relação a esse composto. Dado essas razões, o fósforo é utilizado com maior prioridade e importância na análise de eutrofização de corpos d'água.

Caso seja necessária uma avaliação de qual nutriente é o limitante, Thomman e Mueller (1987, apud SPERLING, 2014, p.226) propõem a seguinte relação de nitrogênio por fósforo:

- Grandes lagos, com predominância de fontes não pontuais: $N/P \gg 10$: limitação dada pelo fósforo.
- Pequenos lagos, com predominância de fontes pontuais: $N/P \ll 10$: limitação dada pelo nitrogênio.

Sperling (2014) delimita faixas aproximadas para a análise quantitativa dos níveis tróficos, representadas no Quadro 3.

QUADRO 3 – FAIXAS APROXIMADAS DE VALORES DE FÓSFORO TOTAL PARA OS PRINCIPAIS GRAUS DE TROFIA

| Classe de trofia | Concentração de fósforo total (mg/m ³) |
|-------------------|--|
| Ultraoligotrófico | < 5 |
| Oligotrófico | < 10 - 20 |
| Mesotrófico | 10 - 50 |
| Eutrófico | 25 - 100 |
| Hipereutrófico | > 100 |

FONTE: Sperling (2014)

O uso da água de um rio ou lago pode ser restringido devido à eutrofização, prejudicando as atividades dependentes deste recurso. Sperling (2014) faz vinculações do uso da água ao seu nível de trofia, apresentados no Quadro 4. No Quadro 4 as classes de trofia utilizadas por Thornton e Rast são diferentes da utilizada por Sperling, este não utiliza a classe meso-eutrófica.

QUADRO 4 – VINCULAÇÃO ENTRE USOS DA ÁGUA E OS GRAUS DE TROFIA EM UM CORPO D'ÁGUA

| Uso | Classe de trofia | | | | | |
|---|-------------------|--------------|-------------|----------------|-----------|----------------|
| | Ultraoligotrófico | Oligotrófico | Mesotrófico | Meso-eutrófico | Eutrófico | Hipereutrófico |
| Abastecimento de água potável | | Desejável | Tolerável | | | |
| Abastecimento de água de processo | | | Desejável | Tolerável | | |
| Abastecimento de água de resfriamento | | | | | Tolerável | |
| Recreação de contato primário | | | Desejável | Tolerável | | |
| Recreação de Paisagismo | | | Desejável | | | |
| Criação de peixes (espécies sensíveis) | | | Desejável | Tolerável | | |
| Criação de peixes (espécies tolerantes) | | | | | Tolerável | |
| Irrigação | | | | | | Tolerável |
| Produção de energia | | | | | | Tolerável |

FONTE: Thornton e Rast (1994, APUD SPERLING, 2014)

3.2.1 Índice do Estado Trófico

O Índice do Estado Trófico (IET) é utilizado pela CETESB para analisar e classificar a qualidade da água quanto ao crescimento de algas e cianobactérias em decorrência do enriquecimento de nutrientes do corpo d'água (CETESB, 2017).

Para o cálculo do IET, a CETESB utiliza duas variáveis, a clorofila *a* e o fósforo total. Para o cálculo, são utilizadas as equações:

- IET(PT) – Índice do Estado Trófico para o fósforo total.
- IET(CL) – Índice do Estado Trófico para a clorofila *a*.

Sendo:

- PT – concentração de fósforo total medida à superfície da água, em µg/L.
- CL – concentração de clorofila *a* medida à superfície da água, µg/L.

Para rios os cálculos são feitos da seguinte maneira:

- $IET(CL) = 10 \times (6 - ((-0,7 - 0,6 \times (\ln CL)) / \ln 2)) - 20$
- $IET(PT) = 10 \times (6 - ((0,42 - 0,36 \times (\ln PT)) / \ln 2)) - 20$

Para reservatórios os cálculos são feitos da seguinte maneira:

- $IET(CL) = 10 \times (6 - ((0,92 - 0,34 \times (\ln CL)) / \ln 2))$
- $IET(PT) = 10 \times (6 - (1,77 - 0,42 \times (\ln PT)) / \ln 2))$

Os resultados dos valores para IET global é feito com uma média aritmética simples, com arredondamento na primeira casa decimal:

$$IET = [IET (PT) + IET (CL)] / 2$$

Os valores que delimitam o nível de trofia para análise da CETESB são apresentados nos Quadro 5. As diferentes cores no gráfico serão utilizadas para melhor compreensão e representação dos dados da análise do IET no item 3.3.

QUADRO 5 – CLASSIFICAÇÃO DO ESTADO TRÓFICO PARA RIOS E RESERVATÓRIOS

| Categoria | Ponderação |
|-------------------|--------------------|
| Ultraoligotrófico | $IET \leq 47$ |
| Oligotrófico | $47 < IET \leq 52$ |
| Mesotrófico | $52 < IET \leq 59$ |
| Eutrófico | $59 < IET \leq 63$ |
| Supereutrófico | $63 < IET \leq 67$ |
| Hipereutrófico | $IET > 67$ |

FONTE: (CETESB, 2017)

3.3 SITUAÇÃO DOS CORPOS D'ÁGUA DO ESTADO DE SÃO PAULO

O relatório disponibilizado pela CETESB (2017), apresenta dados do estado trófico dos corpos d'água do Estado de São Paulo.

O relatório da CETESB (2016) incluiu em seus dados a tendência de melhora ou piora do estado trófico de alguns corpos d'água em diferentes pontos de medição. A análise contemplou alguns pontos dos corpos d'água que apresentaram uma tendência de piora ou melhora significativas. No Quadro 6 está exposta essa tendência para os respectivos corpos d'água. As cores indicam o IET e estão explicadas no Quadro 5. Na coluna de tendência, para piora, utilizou-se “P” e para melhora, “M”. Para fazer a avaliação da tendência, a CETESB utilizou do programa Excel, empregando o uso da função “linha de tendência estatística linear”.

QUADRO 6 – TENDÊNCIA DE MELHORA OU PIORA DE CORPOS D'ÁGUA

| Manancial | 2011 | 2012 | 2013 | 2014 | 2015 | 2016 | Tendência |
|--------------------|------|------|------|------|------|------|-----------|
| Rio Jaguari | 46 | 40 | 47 | 51 | 52 | 53 | P |
| Rio Paraíba do Sul | 40 | 45 | 39 | 51 | 52 | 54 | P |
| | 43 | 43 | 45 | 52 | 53 | 56 | P |
| | 46 | 53 | 48 | 55 | 56 | 56 | P |
| | 42 | 51 | 50 | 54 | 54 | 56 | P |
| | 47 | 47 | 51 | 54 | 54 | 56 | P |
| | 44 | 48 | 48 | 54 | 54 | 56 | P |
| | 46 | 53 | 48 | 54 | 54 | 56 | P |
| Rio Paratei | 46 | 47 | 48 | 52 | 53 | 54 | P |
| Rio Pardo | 46 | 45 | 48 | 57 | 54 | 54 | P |
| | 48 | 43 | 50 | 57 | 55 | 53 | P |
| Rio Atibaia | 44 | 43 | 47 | 53 | 54 | 53 | P |
| | 43 | 43 | 49 | 53 | 54 | 52 | P |
| | 52 | 53 | 55 | 67 | 64 | 60 | P |
| | 53 | 52 | 55 | 66 | 65 | 60 | P |
| Rio Camanducaia | 41 | 45 | 51 | 54 | 52 | 52 | P |
| Rio Corumbataí | 50 | 47 | 54 | 58 | 56 | 56 | P |
| | 48 | 53 | 57 | 62 | 63 | 56 | P |

| | | | | | | | |
|---------------------------|----|----|----|----|----|----|---|
| | 43 | 49 | 57 | 62 | 62 | 55 | P |
| Rio Pirai | 48 | 47 | 53 | 56 | 55 | 54 | P |
| Rio Jaguari | 42 | 42 | 46 | 56 | 55 | 54 | P |
| | 51 | 45 | 53 | 57 | 57 | 55 | P |
| | 45 | 47 | 53 | 59 | 59 | 55 | P |
| Rio Jundiaí | 51 | 51 | 51 | 61 | 56 | 58 | P |
| Ribeirão do Pinhal | 48 | 49 | 54 | 51 | 55 | 53 | P |
| Reservatório Billings | 62 | 61 | 65 | 63 | 64 | 65 | P |
| | 57 | 58 | 60 | 60 | 60 | 63 | P |
| Braço do Rib. Taquacetuba | 59 | 58 | 64 | 65 | 65 | 64 | P |
| Reservatório das Graças | 53 | 52 | 55 | 56 | 56 | 56 | P |
| Ribeirão dos Cristais | 44 | 45 | 46 | 49 | 51 | 53 | P |
| Rio Embu-Guaçu | 49 | 46 | 47 | 51 | 50 | 53 | P |
| Rio Grande ou Jurubatuba | 45 | 49 | 48 | 54 | 57 | 53 | P |
| Reservatório do Cabuçu | 52 | 51 | 54 | 57 | 56 | 56 | P |
| Rio Taiaçupeba-Mirim | 58 | 54 | 59 | 62 | 62 | 62 | P |
| Reserv. de Tanque Grande | 50 | 47 | 51 | 54 | 53 | 52 | P |
| Ribeirão Ferraz | 47 | 40 | 49 | 53 | 52 | 52 | P |
| | 44 | 41 | 51 | 57 | 53 | 52 | P |
| Rio Jaguari-Mirim | 46 | 45 | 51 | 54 | 53 | 56 | P |
| Reserv. Cachoeira de Cima | 52 | 48 | 52 | 54 | 55 | 54 | P |
| Rio Mogi-Guaçu | 44 | 38 | 54 | 57 | 56 | 56 | P |
| | 46 | 48 | 50 | 57 | 53 | 55 | P |
| | 43 | 47 | 52 | 58 | 54 | 55 | P |
| | 41 | 48 | 53 | 57 | 53 | 53 | P |
| | 45 | 45 | 53 | 56 | 53 | 52 | P |
| Rio Orizanga | 42 | 42 | 51 | 62 | 58 | 54 | P |
| Rio do Peixe | 48 | 45 | 52 | 55 | 54 | 52 | P |
| Ribeirão das Onças | 66 | 64 | 65 | 64 | 64 | 63 | M |
| Rio Pirapora | 46 | 50 | 53 | 50 | 60 | 59 | P |
| Rio Sarapuí | 44 | 41 | 44 | 47 | 53 | 52 | P |
| Rio Sorocaba | 49 | 49 | 49 | 52 | 55 | 53 | P |

| | | | | | | | |
|---------------------------|----|----|----|----|----|----|---|
| Rio Tietê | 61 | 54 | 63 | 72 | 67 | 67 | P |
| | 60 | 63 | 69 | 71 | 70 | 68 | P |
| Rio Jacupiranga | 51 | 54 | 53 | 60 | 62 | 58 | P |
| Rio Ribeira | 41 | 48 | 49 | 57 | 57 | 52 | P |
| Rio Lençóis | 43 | 43 | 50 | 50 | 55 | 53 | P |
| Ribeirão Grande | 49 | 57 | 53 | 57 | 58 | 58 | P |
| Rio Guareí | 49 | 45 | 45 | 54 | 52 | 54 | P |
| Rio Preto | 41 | 45 | 52 | 47 | 53 | 54 | P |
| Rio Turvo | 47 | 47 | 50 | 60 | 58 | 55 | P |
| | 47 | 48 | 47 | 54 | 52 | 53 | P |
| Rio Tietê | 55 | 55 | 58 | 64 | 65 | 60 | P |
| Reservatório de Promissão | 52 | 48 | 50 | 53 | 63 | 58 | P |
| Rio Pardo | 44 | 47 | 45 | 48 | 55 | 53 | P |
| | 46 | 48 | 48 | 52 | 55 | 54 | P |
| Ribeirão Bagaçu | 46 | 39 | 43 | 51 | 53 | 50 | P |
| Reservatório Cascata | 60 | 59 | 61 | 59 | 56 | 56 | M |

FONTE: (CETESB, 2016)

Observa-se pelos dados apresentados a tendência de piora do estado trófico para a maior parte dos corpos d'água apresentados, especialmente os reservatórios. O relatório da CETESB (2016) dá destaque para os reservatórios Billings (RMSP), Rio Grande (RMSP), Guarapiranga (RMSP), Salto Grande (Município de Salto Grande) e Barra Bonita (Município de Barra Bonita), os quais são usados para abastecimento público e apresentam elevado estado trófico. O relatório também reiterou a necessidade de tratamentos de esgoto que diminuam o aporte de nutrientes. O reservatório de Salto Grande, em especial, apresenta um grave estado de eutrofização, o que levou o Ministério Público a recomendar ações das prefeituras que despejam seus esgotos no reservatório para recuperar a represa e a construção de ETEs para tratamento do esgoto e redução do aporte de nutrientes (GLOBO, 2016).

A Figura 4 mostra uma imagem do reservatório Billings com trecho eutrofizado em setembro de 2018. A Figura 5 mostra uma imagem do reservatório de Salto Grande, que apresenta um tapete verde de algas e aguapés cobrindo o espelho d'água numa área de 280 hectares (GLOBO, 2018), o equivalente a 2.800.000 m², aproximadamente 1,77 vezes o parque do Ibirapuera.

FIGURA 4 – IMAGEM DO RESERVATÓRIO BILLINGS COM TRECHO EUTROFIZADO



FONTE: (GLOBO, 2018)

FIGURA 5 – IMAGEM DO RESERVATÓRIO SALTO GRANDE COM TRECHO EUTROFIZADO



FONTE: (GLOBO, 2018)

3.4 IMPORTÂNCIA DO TRATAMENTO DE ESGOTO

O lançamento de esgoto diretamente em cursos d'água compromete sua qualidade, alterando suas características físicas, biológicas e químicas, além de causar a poluição das águas e mananciais sendo potencial causador da eutrofização de corpos d'água. Por isso, o tratamento de esgoto é uma questão crítica, principalmente nos grandes centros urbanos para evitar o aporte de nutrientes aos reservatórios.

A água possui uma gama de uso muito abrangente, sendo portanto presente em todos os processos que abrangem atividades antropogênicas e não, tais como (SANTOS, 2013):

- Abastecimento doméstico
- Abastecimento industrial
- Irrigação
- Dessedentação animal
- Preservação de fauna e flora
- Recreação e lazer
- Criação de espécies
- Geração de energia elétrica
- Navegação
- Harmonia paisagística
- Transporte

A poluição por lançamento de esgoto traz consequências, como:

- Assoreamento
- Eutrofização
- Escassez da água
- Elevação da necessidade e custo do tratamento de água
- Doenças
- Impactos sobre a qualidade de vida da população
- Desequilíbrios ecológicos
- Degradação da paisagem

Sendo assim, o tratamento de esgotos é de alta relevância para a preservação do meio ambiente e manutenção dos recursos hídricos. As atividades e necessidades humanas são

altamente dependentes do uso da água, tornando seu gerenciamento e conservação imperativos para a estabilidade e equilíbrio ecológico.

O tratamento de esgotos também permite que a água tratada possa ser reutilizada para fins não potáveis, como por exemplo, indústrias, manutenção de áreas de lazer públicas, parques; uma vez que o recurso potável é muito caro. Dessa maneira, a captação pode sofrer redução, havendo uma manutenção das reservas naturais (TERA, 2015).

3.5 TRATAMENTO DE ESGOTO

A fim de explicar o processo de remoção de nutrientes dos esgotos domésticos, será dado um panorama geral sobre os diversos processos que abrangem o tratamento de esgoto e suas respectivas funções para que o leitor possa se familiarizar com o assunto.

Os corpos d'água necessitam de oxigênio para o desenvolvimento de seres vivos, como plantas e peixes, além de ser necessário para garantir o equilíbrio do meio. O lançamento de esgotos contendo alta concentração de matéria orgânica leva ao crescimento de microrganismos. Estes, utilizam a matéria orgânica presente em abundância como fonte de energia para seu desenvolvimento, transformando-a em compostos mais simples, como matéria inorgânica e gases. Esse processo, chamado de decomposição biológica, leva à queda na concentração de oxigênio dissolvido na água, atingindo eventualmente condições de anaerobiose e perda de vida aquática. (JORDÃO e PESSOA, 2009).

Devido à essa queda de quantidade de oxigênio dissolvido na água, denominou-se a demanda bioquímica de oxigênio, DBO, como sendo a quantidade de oxigênio necessária para degradar a matéria orgânica presente no meio (ROQUE e NASCIMENTO, 2010).

De acordo com Jordão e Pessoa (2009), com a medição da DBO é possível conhecer o grau de poluição de um corpo d'água, uma vez que indica a quantidade de matéria orgânica existente no meio. Logo, a demanda bioquímica permite medir o grau de poluição orgânica do esgoto, sendo válida a relação de que quanto maior a DBO, mais poluído organicamente está o meio e, à medida que ocorre a estabilização da matéria orgânica, a DBO decresce.

Esse processo de recuperação do meio aquático por mecanismos essencialmente naturais é chamado de autodepuração (SPERLING, 2014). O tratamento de esgoto visa replicar o processo que ocorreria naturalmente nos cursos d'água, porém em maior escala, rapidez e eficiência.

O tratamento de esgotos está dividido geralmente em quatro níveis: o preliminar, o primário, o secundário e o terciário. Há, em cada etapa, um objetivo, que é a remoção de um tipo específico de partícula de tal maneira que o efluente final do processo de tratamento apresente redução da concentração de matéria orgânica e outras partículas indesejáveis até o limite permitido pela legislação vigente. É importante lembrar que o objetivo deste trabalho visa ao estudo do processo de tratamento terciário, uma vez que no Brasil é rara a sua aplicação (JORDÃO e PESSOA, 2009).

O tratamento preliminar visa à remoção de sólidos grosseiros, enquanto o tratamento primário tem como objetivo remover os sólidos sedimentáveis e parte da matéria orgânica. O tratamento secundário objetiva a remoção de matéria orgânica e eventualmente nutrientes. Já o tratamento terciário visa à remoção de poluentes específicos ou não suficientemente removidos no secundário. Salienta-se que a remoção de nutrientes e de organismos patogênicos pode ser considerada como integrantes do tratamento secundário ou separadamente, no terciário, dependendo do processo a ser adotado (SPERLING, 2014).

No Quadro 7 são apresentados os níveis de tratamento com seus respectivos poluentes e substâncias que visam ser removidas:

QUADRO 7 – NÍVEIS DE TRATAMENTO DE ESGOTO E SUAS RESPECTIVAS SUBSTÂNCIAS A SEREM REMOVIDAS

| Nível | Remoção |
|------------|---|
| Preliminar | <ul style="list-style-type: none"> • Sólidos grosseiros |
| Primário | <ul style="list-style-type: none"> • Sólidos sedimentáveis • DBO em suspensão |
| Secundário | <ul style="list-style-type: none"> • DBO em suspensão • DBO sedimentável • DBO solúvel |
| Terciário | <ul style="list-style-type: none"> • Nutrientes • Organismos patogênicos • Compostos não biodegradáveis • Metais pesados • Sólidos inorgânicos dissolvidos • Sólidos em suspensão remanescentes |

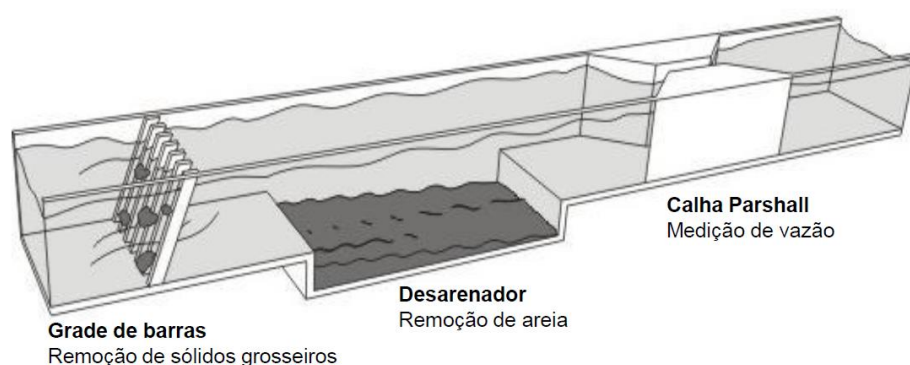
FONTE: Sperling (2014)

3.5.1 Tratamento preliminar

O tratamento preliminar tem como objetivo a remoção de sólidos grosseiros e de areia, sendo um processo que utiliza mecanismos físicos. O tratamento preliminar pode ou não ocorrer, podendo estar aderido ao tratamento primário, dependendo das características de cada esgoto e do critério de projeto adotado (SPERLING, 2014).

Nesta primeira etapa do tratamento de esgoto, usualmente são empregados dispositivos de gradeamento e caixas de área, além de medidores de vazão. A Figura 6 apresenta uma representação simplificada do processo.

FIGURA 6 – TRATAMENTO PRELIMINAR



FONTE: Santos (2013)

Sólidos grosseiros são materiais de grandes dimensões, como por exemplo: pedaços de madeiras, plásticos, papéis, pedras, plantas, dentre outros. Também são retirados outros materiais de menores dimensões, como vegetais, gorduras, casca de ovos, ossos, cabelos, plásticos, fibras, pelos, entre outros. Esses diversos materiais se devem tanto ao uso comum do esgoto como ao seu uso inadequado.

A finalidade da remoção dos sólidos grosseiros é proteger os dispositivos de transporte das estações, tais como bombas e tubulações, além de proteger unidades subsequentes do tratamento e aumentar a eficiência do tratamento como um todo (DEZOTTI, 2008).

A areia presente no esgoto é composta basicamente de mineiras, como: areias, pedrisco, silte, escória e cascalho. O processo de retirada da areia do efluente é denominado de desarenação. Sua remoção visa eliminar ou abrandar os efeitos de abrasão e obstrução nas instalações a jusante, além de facilitar o escoamento e manuseio do líquido (JORDÃO e PESSOA, 2009).

3.5.2 Tratamento primário

Segundo Sperling (2014), o tratamento primário destina-se à remoção de sólidos em suspensão sedimentáveis e sólidos flutuantes, sendo que parte significativa desses sólidos consiste em matéria orgânica. Nessa etapa, utiliza-se de mecanismos de sedimentação para a remoção do material. Como parte da matéria orgânica está em suspensão, esta acaba sendo parcialmente retirada nesta etapa, embora sua remoção mais efetiva seja feita no tratamento secundário.

Nesta etapa, utiliza-se de tanques retangulares ou circulares, no qual o esgoto flui lentamente pelo tanque, sedimentando gradualmente os sólidos em suspensão. Essa massa de sólidos depositada no fundo é chamada de lodo primário bruto, podendo ser retirada por meio de raspadores mecânicos, carga hidrostática ou sucção do material. O material flutuante de menor densidade, como a espuma e gorduras não retiradas no tratamento preliminar, são coletados mecanicamente e removidos do tanque para posteriores tratamento.

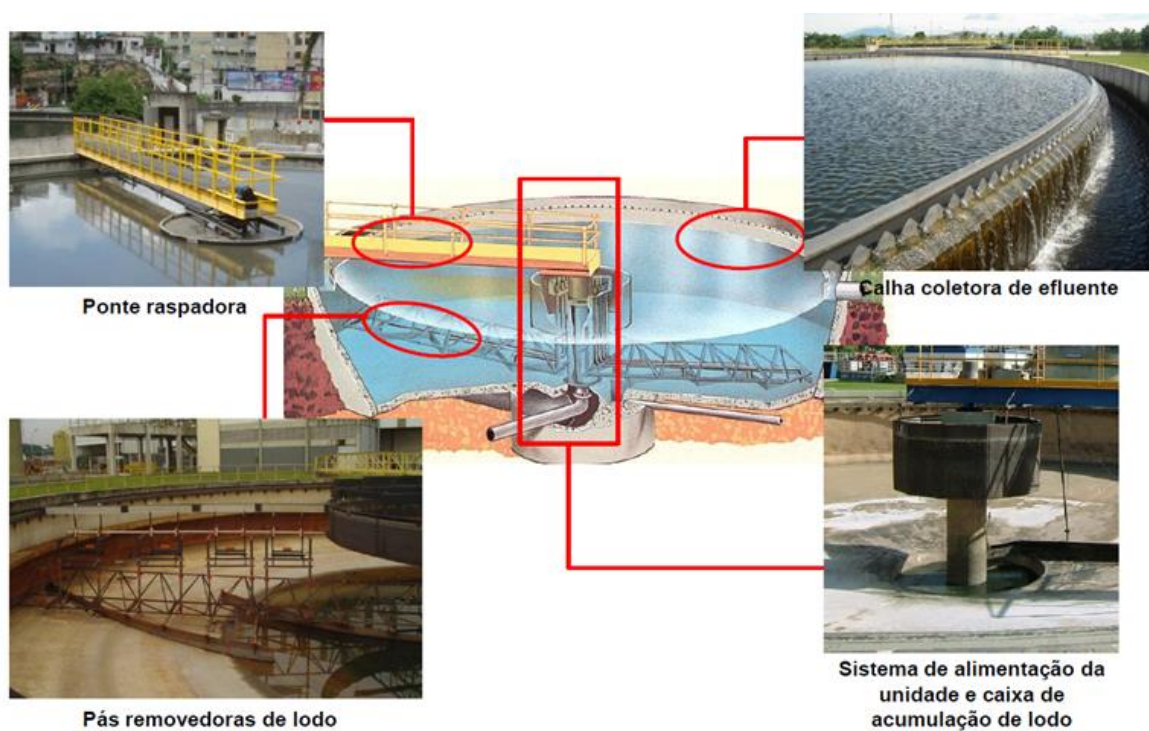
Ambos os decantadores, circulares e retangulares, para tratamento primário são logo chamados de decantadores primários. A Figura 7 apresenta o decantador tipo circular e a Figura 8 apresenta um corte de um decantador circular detalhado com seus elementos.

FIGURA 7 – DECANTADORES CIRCULARES CHEIOS



FONTE: (DAGA, 2018)

FIGURA 8 – ESQUEMA DE UM DECANTADOR CIRCULAR



FONTE: Santos (2013)

3.5.3 Tratamento primário avançado

O tratamento primário pode ter sua eficiência aumentada para a maior remoção de sólidos em suspensão com a utilização de agentes químicos coagulantes. Caso ocorra a adição destes, o tratamento passa a se chamar tratamento primário avançado (SPERLING, 2014). Algumas etapas ocorrem nesse processo, sendo as seguintes (FOGAÇA, 2018):

- a) Coagulação: num primeiro momento, a movimentação do meio líquido e a adição dos agentes químicos irão causar a desestabilização das partículas coloidais.
- b) Floculação: ocorre posteriormente à coagulação e o meio líquido apresenta-se sem muita movimentação, nela as partículas desestabilizadas se agrupam formando flocos.

Os flocos formados podem ser separados por decantação, filtração ou por flotação. Na flotação os flocos são levados à superfície pela aeração do meio líquido e sendo posteriormente removidos por raspagem superficial.

As vantagens da utilização do tratamento primário avançado é principalmente a maior remoção dos sólidos suspensos totais e da DBO, mas também há outras, como a possível remoção de fósforo. Nesse caso, para a remoção de nutrientes, é também considerado como um tipo de tratamento terciário. Há também a necessidade de menor área, menor quantidade de tanques e controle de odores. Além de menor custo para etapas seguintes em instalação, manutenção, eletricidade e potência requerida. Porém, esse sistema apresenta desvantagens, como o custo dos produtos químicos e seu manuseio. As unidades de tratamento exigem maiores custos de instalação e operação e a quantidade de lodo primário será maior (JORDÃO e PESSOA, 2009).

3.5.4 Tratamento secundário

Esse processo consiste em replicar o processo natural que ocorreria nos cursos d'água, a autodepuração, mas de maneira mais rápida e eficiente. Segundo Sperling (2014), o tratamento secundário destina-se principalmente à remoção da matéria orgânica, presente na forma dissolvida e em suspensão. A dissolvida pode ser nomeada de DBO solúvel ou filtrada e a em suspensão de DBO suspensa ou particulada.

A matéria orgânica dissolvida não é removida por processos unicamente físicos, como a sedimentação que ocorre no tratamento primário, sendo necessárias outras etapas. A particulada, embora seja removida em grande parte no tratamento primário, parte dela permanece na massa do esgoto.

Para que alcancem a máxima eficiência, estes microrganismos, que incluem bactérias, protozoários, fungos e outros, devem estar submetidos a condições ambientais que favoreçam seu crescimento. Para proporcionar tal meio, o esgoto recebe uma manutenção para controle de temperatura, pH, entre outras.

A matéria orgânica serve de alimento para os microrganismos, que a transforma, no geral, em gás carbônico, água, material celular e matéria inorgânica, com consequente crescimento e reprodução. Esse processo metabólico ocorre por via aeróbia. Caso o meio possua características anaeróbias, também será produzido metano e gás sulfídrico.

Há uma grande variabilidade de processos utilizados para o tratamento secundário, sendo os mais comuns os seguintes (SPERLING, 2014):

- Lagoas de estabilização
- Processos anaeróbios
- Lodos ativados
- Filtros biológicos
- Valos de oxidação

Esses processos e suas variações serão abordados nos próximos itens.

3.5.4.1 Lagoas de estabilização

Lagoas de estabilização têm em comum seu baixo custo de construção e operação, por serem simples e não requererem energia. Porém, elas apresentam uma deficiência quanto ao menor volume tratado e maior tempo, além de apresentarem mau odor, sendo por isso adequadas para pequenas populações e distantes de centros urbanos.

Neste processo, o esgoto entra por uma extremidade da lagoa e sai continuamente na extremidade oposta. Tal percurso demora vários dias, nos quais o efluente passa por diversos fenômenos para sua purificação.

Esse método possui variantes, que podem ser classificadas de acordo de como se dá a estabilização da matéria orgânica (JORDÃO e PESSOA, 2009; SPERLING, 2014).

- Facultativas: processo mais simples, que depende unicamente de fenômenos naturais, sendo portando um processo lento e que necessita de maior área de implantação. Nessas lagoas, ocorre uma estratificação de camadas. No fundo há uma camada

anaeróbia. Na camada intermediária ocorre processos aeróbios. Na superfície, destaca-se a realização da fotossíntese pelas algas. Tais fenômenos permitem um equilíbrio de consumo e produção de oxigênio e gás carbônico.

- Anaeróbias: esse tipo de lagoas requer menor área, porém são mais profundas. Consequentemente, a fotossíntese praticamente não ocorre, levando o afluente a condições anaeróbias, uma vez que o consumo de oxigênio é muito superior à sua reposição. As bactérias anaeróbias realizem a decomposição da matéria orgânica de maneira eficaz, porém não tão alta quanto as bactérias aeróbias seriam capazes, sendo necessária a instalação de uma lagoa facultativa à jusante para retirar a matéria orgânica restante.
- Aeradas: esse tipo de tratamento consiste em lagoas nas quais o suprimento de oxigênio é fornecido artificialmente por dispositivos eletromecânicos, garantindo que o oxigênio dissolvido esteja presente em abundância para toda ou parte da massa líquida, permitindo assim menor tempo de detenção do efluente, maiores profundidades e menor área ocupada.
- Maturação: as lagoas de maturação são utilizadas para conferir uma melhoria aos efluentes tratados anteriormente, sendo voltadas principalmente para a remoção de organismos patogênicos, tais como bactérias, vírus, cistos de protozoários, ovos de helmintos, etc. Sua parcela de remoção de DBO e de sólidos em suspensão é desconsiderada.
- Polimento: esse processo objetiva o refinamento de outro processo biológico anterior, principalmente na remoção de DBO, nutrientes e organismos patogênicos. É conceitualmente similar às lagoas de maturação, se diferenciam por realizarem o polimento de um efluente vindo de um reator anaeróbio, principalmente o reator RAFA. Caso seja aplicada com o intuito de remover nutrientes, pode ser considerada como um tratamento terciário para polimento do efluente.
- Macrófitas: são usadas para conferir um polimento ao tratamento por lagoas, reduzindo os nutrientes, sólidos em suspensão e DBO. Como são lagoas com crescimento intenso de plantas, requerem maior manutenção, além de ser um método que incentiva a proliferação de moscas e mosquitos, não sendo por esse motivo recomendada. Caso seja aplicada com o intuito de remover nutrientes, pode ser considerada como um tratamento terciário para polimento do efluente.

A Figura 9 é uma imagem com vista para uma ETE com lagoas aeróbias, facultativas e de maturação.

FIGURA 9 – VISTA DE UMA ESTAÇÃO DE TRATAMENTO DE ESGOTO COM LAGOAS ANAERÓBIAS, LAGOAS FACULTATIVAS E LAGOAS DE MATURAÇÃO DA ETE DE ARCOS.



FONTE: Adaptado de Dias (2018)

3.5.4.2 Processos anaeróbios

Segundo Metcalf e Eddy (2016) e Chernicharo (2007), o tratamento de esgotos por processos anaeróbios apresenta menor produção de lodo e menor consumo de energia, podendo ser inclusive produtor de energia dependendo das características do esgoto tratado. O método também possibilita o tratamento de elevadas cargas orgânicas e maior tempo de retenção dos sólidos.

O tratamento anaeróbio costuma ser utilizado para o tratamento do lodo resultante das etapas do tratamento da fase líquida. Esse processo, devido à produção de gás metano pela decomposição da matéria orgânica realizada pelas bactérias, permite a geração de energia elétrica. A utilização de processos anaeróbios em esgotos domésticos não é economicamente viável em relação à produção de energia, uma vez que esse tipo de efluente é bem diluído e não permite produção de metano o suficiente. Porém, atualmente é bastante utilizado em efluentes de indústrias, que apresentam alta carga de DBO.

O processo anaeróbio é um tipo de tratamento que pode gerar maus odores e gases corrosivos. Além disso, caso se vise à remoção de nutrientes (importante para o tratamento terciário) e patógenos, ele não é eficaz. Por se tratar de um processo relativamente sensível, quanto ao ambiente propício para o desenvolvimento dos microrganismos, ele requer maior controle de compostos tóxicos e maior estabilidade operacional, que incluem temperatura, pH, entre outras variáveis. Outra desvantagem desse processo é sua necessidade de maior tempo para o desenvolvimento e estabelecimento da biomassa necessária para a realização do processo.

Para os tratamentos anaeróbios é necessário um tratamento adicional seguinte, que vise remover o restante de matéria orgânica presente no efluente, devido a ácidos graxos residuais e sólidos dispersos que não foram decompostos.

Segundo Sperling (2014), os tratamentos anaeróbios se dividem em basicamente dois tipos: de filtro anaeróbio e de reator anaeróbio de fluxo ascendente, de terminologia RAFA, também chamado de manta de lodo. Em ambos o efluente flui por uma massa de sólidos biológicos, sofrendo reações de decomposição pelas bactérias e sendo decomposto em produtos mais simples, como metano e gás carbônico.

a) Filtros anaeróbios

Nos filtros anaeróbios, os microrganismos se desenvolvem e crescem aderidos a um meio suporte, podendo ser de argila expandida ou brita. A fim de garantir condições anaeróbias, o filtro é trabalhado afogado, preenchendo os espaços vazios que poderiam ser ocupados por ar no meio suporte. Os filtros anaeróbios são mais recomendados para serem utilizados como um tratamento de polimento para o efluente, comumente, instalados a jusante de um RAFA, apresentando assim baixa concentração de matéria orgânica, porém rico em sais minerais e patogênicos (CHERNICHARO, 2007).

b) reatores anaeróbios

Segundo Sperling (2014) e Chernicharo (2007), no RAFA, não há um meio suporte colocado artificialmente e os microrganismos crescem dispersos no meio, podendo formar grânulos de diversas espécies bacterianas, formando assim um meio suporte natural para o crescimento de mais bactérias. Esse crescimento leva a uma alta concentração de biomassa, que será responsável pela decomposição da matéria orgânica, permitindo que o sistema apresente boa eficiência na decomposição de matéria orgânica.

Esse sistema de tratamento de esgoto é bem difundido no Brasil e pode apresentar unidades únicas de tratamento ou servir como pós tratamento de algum outro. Esse método não necessita que ocorra o tratamento primário de decantação, simplificando o processo como um todo. Além disso, é um tratamento compacto que necessita de pouca área para instalação e baixo custo para operação. Devido às reações anaeróbias, necessita de baixo consumo de energia, uma vez que não há necessidade de injeção de ar mecanicamente no processo.

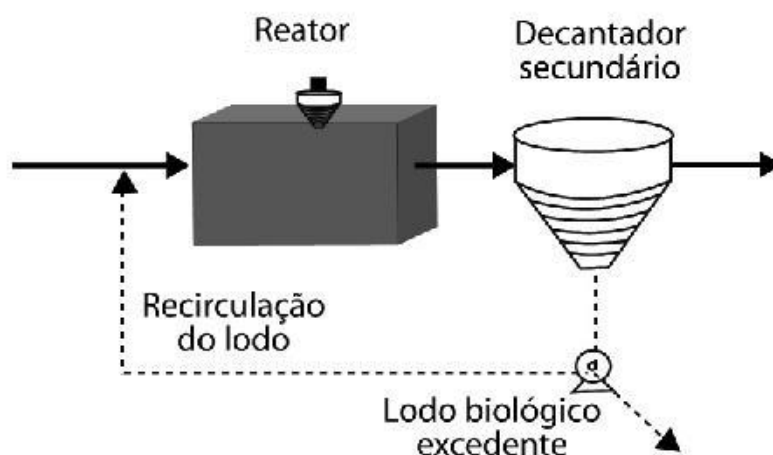
3.5.4.3 Lodos ativados

Conforme Sperling (2002) e Jordão e Pessoa (2009), o processo de lodos ativados para tratamento de esgoto tem como base as reações biológicas aeróbias de microrganismos presentes no efluente e que serão reutilizados para tratamentos posteriores. Lodos ativados é a denominação dada para os flocos de bactérias e outros microrganismos que crescem e se acumulam devido à recirculação do lodo. Este método consiste em dois estágios: tanque de aeração, também chamados de reatores, e decantadores, juntamente com a recirculação do lodo entre o primeiro e o segundo. Aos processos de tratamento por lodos ativados serão dados maiores detalhes devido à sua utilização também para a remoção de nutrientes, que será abordado à parte no capítulo 3.7.

Primeiramente, o esgoto, rico em matéria orgânica, que chega aos tanques de aeração é usado como alimento para que as bactérias realizem a respiração celular, cresçam e se multipliquem. O efluente que sai está clarificado e vai para os decantadores à jusante, nos quais os sólidos sofrem sedimentação. Esses sólidos são em grande parte a própria biomassa das bactérias, ou seja, o lodo ativado, os quais são recirculados para os tanques de aeração, aumentando assim a eficiência do processo, uma vez que há maior quantidade de microrganismos para realizarem a decomposição da matéria orgânica. Para evitar o excesso de lodo ativado que constantemente está crescendo e sendo recirculado, o que levaria à degradação do líquido final, uma parcela dessa massa biológica é retirada.

A Figura 10 esquematiza o processo por lodos ativados, considerando que o efluente já passou pelos tratamentos preliminar e primário.

FIGURA 10 – ESQUEMA DE UNIDADES DA ETAPA BIOLÓGICA DO SISTEMA POR LODOS ATIVADOS



FONTE: Sperling (2002)

Os métodos existentes do tratamento de esgoto por lodos ativados são basicamente quatro:

- **Convencional:** nesse método, ocorre com um fluxo contínuo de esgoto, ou seja, este está sempre entrando e saindo do reator. A fim de se economizar com os gastos referentes à aeração, o esgoto recebe um tratamento em decantadores primários antes de seguirem para os reatores de lodos ativados.
- **Aeração prolongada:** nesse método, também ocorre fluxo contínuo de esgoto. O aumento da população bacteriana diminui a disponibilidade de alimento, levando as mesmas a utilizarem a matéria orgânica de suas próprias células para os processos metabólicos. Isso permite uma economia nas instalações, uma vez que nem decantadores primários nem unidades de tratamento do lodo são necessárias. Porém, há a necessidade de fornecer maior aeração ao sistema para garantir o fornecimento de oxigênio aos microrganismos, assegurando as condições aeróbias do meio.
- **Fluxo intermitente, ou reatores sequencias por batelada:** nesse método, ocorre um fluxo intermitente de esgoto. Nesse processo, há uma incorporação das outras unidades que seriam necessárias nos outros métodos de tratamento por lodos ativados. Incorporando em uma só unidade as unidades de decantação primária, secundária, reator e bombeamento do lodo. Nesse tanque ocorrem todas as etapas do processo,

permitindo uma grande simplificação do processo. Para que todas as reações e etapas ocorram de maneira eficaz dentro do tanque, são estabelecidos ciclos operação. Estes ciclos se dividem em:

- Enchimento, no qual ocorre a entrada do esgoto bruto no tanque;
- Reação, na qual há a aeração e mistura da massa líquida;
- Sedimentação, onde os sólidos que estão em suspensão se sedimentam;
- Esvaziamento, em que ocorre a retirada do líquido tratado;
- Repouso, em qual se ajustam os ciclos para usos futuros e remove-se o lodo sedimentado ao fundo.

3.5.4.4 Filtros biológicos

Nos filtros biológicos os microrganismos crescem aderidos a um meio suporte que permite a circulação de ar, sendo portando um sistema aeróbio. A Figura 11 apresenta uma imagem de filtro biológico.

FIGURA 11 – IMAGEM DE UM FILTRO BIOLÓGICO



FONTE: (QUIP, 2018)

3.5.4.5 Valo de oxidação

Consiste em um tanque de aeração prolongada em formato orbital no qual o esgoto fica dando voltas. Durante o tempo de permanência, o esgoto é submetido à aeração mecânica, promovendo a decomposição da matéria orgânica pelos microrganismos e o desenvolvimento de flocos biológicos. Comumente a jusante, encontra-se um decantador para a sedimentação

de sólidos e do lodo ativado, sendo o lodo recirculado para o valo (JORDÃO e PESSÔA, 2011).

3.6 TRATAMENTO TERCIÁRIO PARA A REMOÇÃO DE NUTRIENTES

O tratamento terciário objetiva a remoção de partículas específicas que não foram removidas nos tratamentos. Segundo Metcalf e Eddy (2016), as partículas remanescentes podem ser divididas nas seguintes categorias:

- Material particulado ou coloidal, orgânico e inorgânico;
- Material orgânico dissolvido;
- Substâncias inorgânicas dissolvidas;
- Microrganismos;
- Nutrientes – fósforo e nitrogênio.

Como há uma grande variação de tipos de substâncias ao fim do tratamento secundário, os tipos de processos escolhidos no tratamento terciário são bastantes variados, sendo dependentes do tipo de efluente tratado e dos limites de concentração de substâncias que o corpo receptor pode apresentar. Por exemplo, a desinfecção do efluente, ou seja, a eliminação de microrganismos patógenos se dá pela radiação violeta, que inibe sua reprodução, ou pela cloração que age em suas enzimas, matando-os (JORDÃO e PESSOA, 2009).

Este trabalho objetiva abordar somente o tratamento terciário voltado para a remoção de nutrientes, uma vez que seu excesso pode causar problemas ambientais como a eutrofização.

A remoção de fósforo e nitrogênio embora abordada como um tratamento terciário quando a necessidade é a remoção desses nutrientes, o tratamento é empregado simultaneamente ao tratamento secundário.

3.6.1 Remoção de nitrogênio

Segundo Metcalf e Eddy (2016) e Sperling (2002), a remoção do nitrogênio de esgotos tem como base dois processos, a nitrificação e a desnitrificação, ambos abordados no ciclo do nitrogênio no capítulo 3.1.1. Na nitrificação, que ocorre predominantemente nos tratamentos secundários, a amônia é oxidada em nitritos e nitratos sob condições aeróbias. Na desnitrificação, que é o que se busca no tratamento terciário para a remoção desse nutriente, os nitratos são reduzidos a nitrogênio gasoso, podendo voltar para a atmosfera.

Esta última etapa, a desnitrificação, deve ocorrer em meios anaeróbios, para que as bactérias utilizem o NO_2^- e NO_3^- para a obtenção do oxigênio necessário à sua respiração celular e, consequentemente liberando o nitrogênio gasoso como produto da respiração. Caso houvesse meio aeróbio, não ocorreria a desnitrificação, pois as bactérias iriam utilizar o próprio O_2 presente no ar para suas funções metabólicas.

Nessa condição de ausência de oxigênio em que os organismos utilizam de nitratos para a respiração celular, dá-se o nome de condição anóxica.

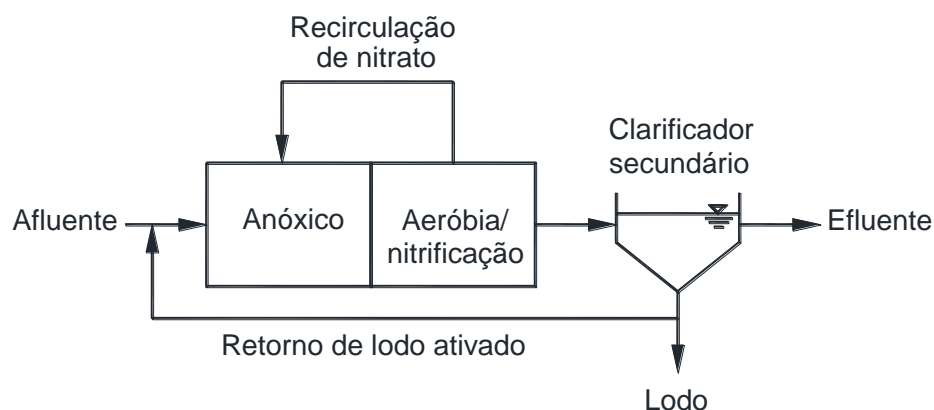
Para que a respiração celular ocorra, é necessário que haja alimento para as bactérias, no caso, matéria orgânica. Como a matéria orgânica é retirada durante o tratamento secundário, não há alimento disponível para as bactérias realizarem a desnitrificação. Para reverter esse problema, um processo difundido é a desnitrificação induzida junto ao processo de nitrificação. Para que isso ocorra, são criadas zonas anóxicas no reator em que haverá os dois fenômenos.

Serão abordados nos itens seguintes processos de desnitrificação para a remoção de nitrogênio do esgoto utilizando-se de sistemas convencionais de lodo ativado.

a) Pré-anóxica

Nesse processo, o reator possui uma zona anóxica a montante e uma zona aeróbia a jusante. Na zona aeróbia ocorrem as reações de nitrificação e a formação de nitratos. Esses nitratos são retornados à zona anóxica, onde a presença do esgoto rico em matéria orgânica, permitirá que as bactérias realizem a redução do nitrato em nitrogênio gasoso. Este, em forma de gás, escapa para a atmosfera diminuindo a concentração de nitrogênio no efluente final. A Figura 12 representa o fluxograma de um processo de pré-nitrificação.

FIGURA 12– FLUXOGRAMA DE UM SISTEMA DE PRÉ-NITRIFICAÇÃO

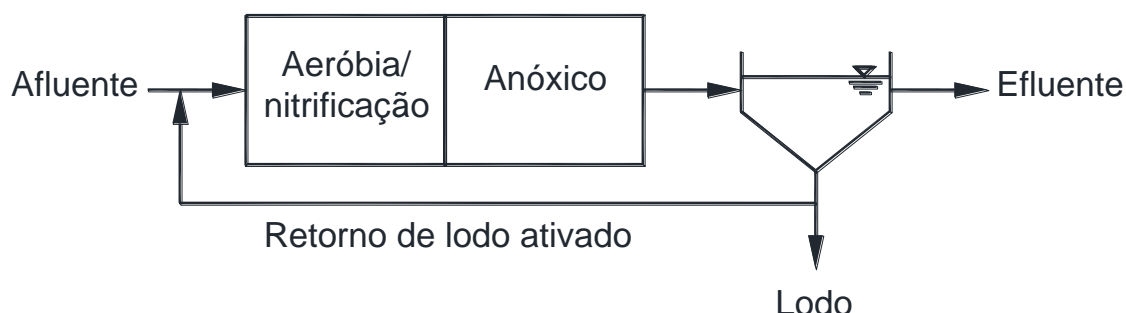


FONTE: Metcalf & Eddy (2016)

b) Pós-anóxica

Ao contrário da pré-desnitrificação, a pós-desnitrificação tem uma zona aeróbia a montante e uma zona anóxica a jusante. A matéria orgânica é degradada na zona aeróbia e como consequência das reações biológicas, há a formação de nitratos. Estes entram na zona anóxica onde serão reduzidos a N_2 pela desnitrificação realizada pelas bactérias. Porém, como o meio anóxico não é rico em matéria orgânica, os microrganismos utilizarão da respiração endógena para realizarem suas funções metabólicas. A respiração endógena ocorre quando o substrato que seria utilizado pelos microrganismos é totalmente consumido e eles passam a consumir a própria matéria orgânica de suas células para realizar suas reações celulares. Devido a esse processo, as reações de desnitrificação em sistemas pós-desnitrificação são muito mais lentas que aquelas que ocorrem em sistemas de pré-desnitrificação. A Figura 13 representa o fluxograma de um tratamento por pós-desnitrificação.

FIGURA 13 – FLUXOGRAMA DE UM TRATAMENTO POR PÓS-DESNITRIFICAÇÃO

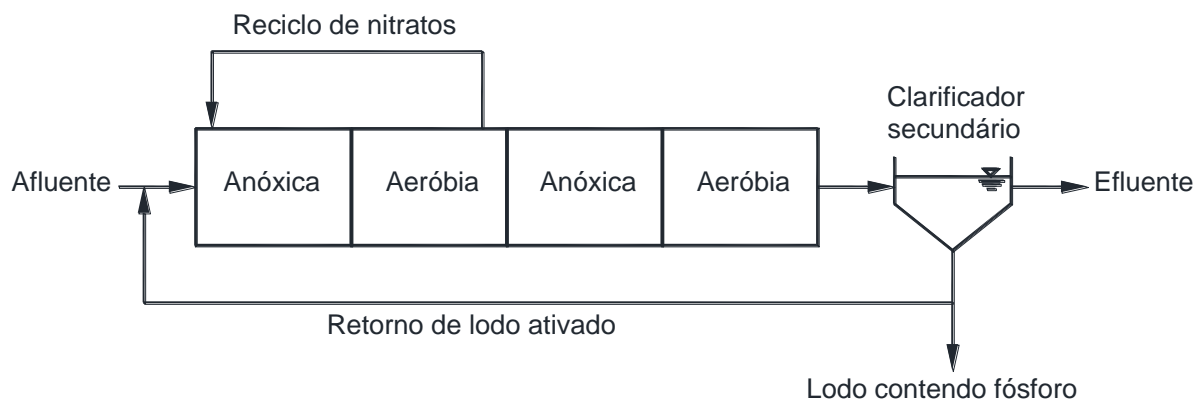


FONTE: Metcalf & Eddy (2016)

c) Bardenpho ou Bardenpho quatro estágios

Esse processo é uma combinação dos processos pré e pós-anóxicos com uma zona de aeração final. A remoção de nitrogênio é bastante elevada pois os nitratos podem ser removidos na primeira e na segunda zona anóxica. A Figura 14 representa o fluxograma desse sistema.

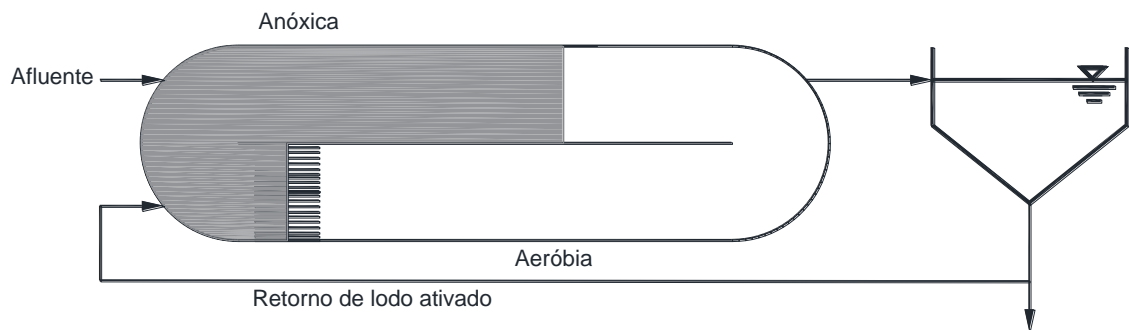
FIGURA 14 – FLUXOGRAMA DE UM SISTEMA DE BARDENPHO



FONTE: Metcalf & Eddy (2016)

d) Valo de oxidação: este processo, também pode ser utilizado para a remoção de nitrogênio. O líquido circulante percorre o valo muitas vezes ao dia, passando por zonas aeradas e anaeróbias com condição anóxica. Nas regiões de zona aerada, o meio líquido apresenta características aeróbias. À medida que se afasta da zona do aerador, o oxigênio dissolvido diminui. Após alguma distância, o meio adquire condições anóxicas até que o líquido passe novamente pela região do aerador. A Figura 15 representa o fluxograma desse processo.

FIGURA 15 – FLUXOGRAMA DE UM SISTEMA POR VALO DE OXIDAÇÃO

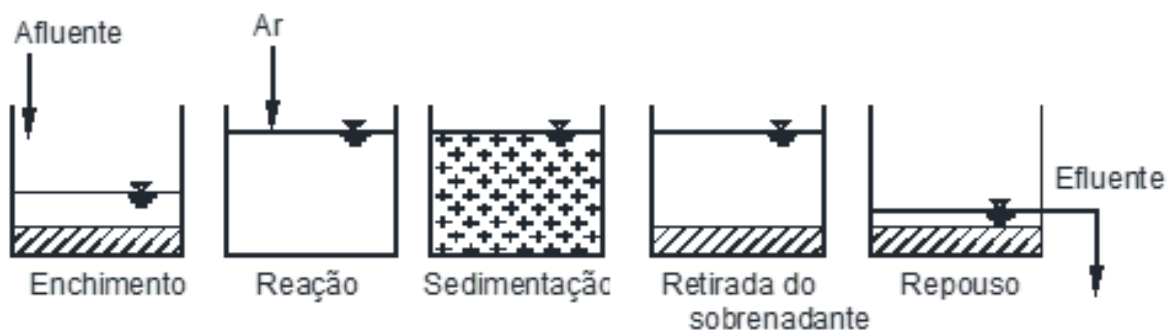


FONTE: Sperling (2002)

e) Lodos Ativados por Batelada

A batelada é um processo de tratamento secundário por lodos ativados que também pode ser utilizado para a remoção de nutrientes. Quando o ciclo se inicia com o enchimento do tanque, os nitratos que ficaram no lodo do ciclo anterior podem sofrer redução devido à carga de esgoto sendo usada para encher o tanque, ou seja, fonte de alimento para as bactérias realizem a respiração celular e utilizar o nitrato como fonte de oxigênio. Novamente, após a etapa de aeração, o meio adquire condições anóxicas devido à queda e ausência de oxigênio que não está mais sendo injetado no meio, permitindo assim a desnitrificação. A Figura 16 apresenta o fluxograma do processo batelada.

FIGURA 16 – FLUXOGRAMA DOS CICLOS DA OPERAÇÃO INTERMITENTE



FONTE: Sperling (2002)

3.6.2 Remoção de fósforo

O fósforo costuma ser o nutriente limitante na maioria dos sistemas de água doce, conforme explicado no capítulo 3.2, sendo necessário seu controle e remoção a fim de se evitar a eutrofização. Como o fósforo não apresenta forma gasosa, sua remoção se dá pela incorporação ao material particulado. Tratamentos convencionais de tratamento de esgoto reduzem menos que 20% do fósforo, sendo necessário a adição de processos adicionais caso vise sua remoção, logo, a instalação de tratamento terciário. O fósforo pode ser removido por processos de precipitação química, processos físicos por filtração ou membranas ou por processos biológicos (DEZOTTI, 2008).

De acordo com Metcalf e Eddy (2016) a concentração de fósforo típica nos efluentes de esgotos doméstico é de 3,7 a 11 mg/L. Outras referências, como o PROSAB (2009) sugerem a concentração de 4 a 12 mg/L e dão uma contribuição per capita de 0,7 a 2,0 g/hab.dia. A AESBE (2009), propõe uma concentração de fósforo de 14 mg/L como valor típico presente no esgoto e contribuição per capita de 2,5 g/hab.dia. Para Suplee, Hartman e Cleland (2007) a concentração de fósforo no esgoto doméstico varia de 6 a 8 mg/L.

I) Processos biológicos

Na remoção biológica do fósforo, este é incorporado à biomassa do sistema, sendo posteriormente removido através do descarte do lodo. Para a remoção de fósforo em processos biológicos, é necessário que haja zonas anaeróbias e aeróbias nas etapas do tratamento. A remoção biológica do fósforo é feita simultaneamente à remoção do nitrogênio nos sistemas de lodos ativados. Na zona anaeróbia, grupos de bactérias especializadas na absorção de fósforo, realizam a decomposição da matéria orgânica decompondo-a e uma das substâncias residuais é o fósforo. Porém, a quantidade que elas absorvem e armazenam em suas células é menor que a quantidade que produzem. Esse excesso de fósforo fica livre no meio. Quando passa para a zona aeróbia, outras bactérias absorvem esse excesso de fósforo para suas atividades metabólicas de crescimento e multiplicação. No fim do processo, quando remove-se o lodo excedente junto à populações de bactérias, remove-se o fósforo do sistema simultaneamente (SPERLING, 2002).

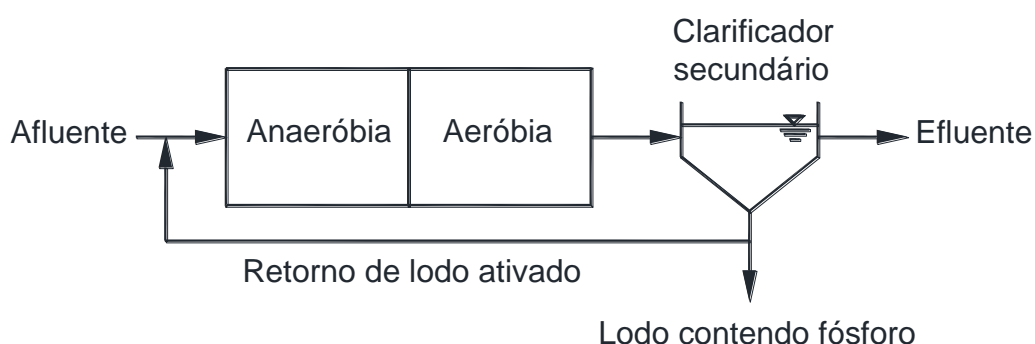
Para a remoção de nutrientes por processos biológicos, a concentração de fósforo é reduzida para 1 a 3 mg/L e de nitrogênio em 8 a 10 mg/L. Os processos biológicos podem ser melhorados para apresentar maior remoção, podendo chegar a concentrações de fósforo e

nitrogênio respectivamente de 0,3 mg/L, 3 mg/ ou menos (FREED, 2007 apud SUPLEE, HARTMAN e CLELAND, 207).

Os processos para a remoção de fósforo mais comumente usados são os seguintes (SPERLING, 2002; JORDÃO e PESSOA, 2009; METCALF & EDDY, 2016):

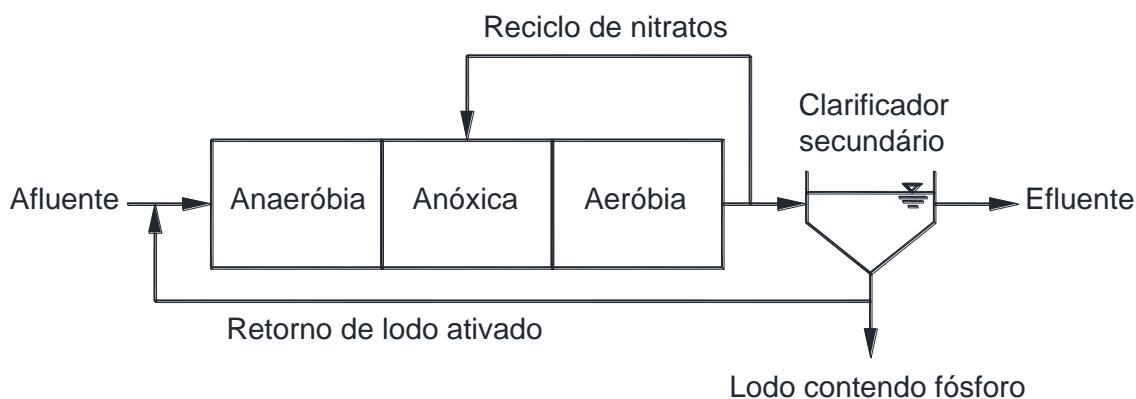
- a) Processo anaeróbio/aeróbio (A/O) ou Phoredox ou: nesse processo, a configuração básica e mais simples para uma boa remoção do fósforo é obtida com uma câmara anaeróbia seguida por uma câmara aeróbia de lodo ativado. Nesse processo, a nitrificação é desprezível. A Figura 17 representa esse processo.

FIGURA 17 – FLUXOGRAMA DO PROCESSO PHOREDOX



FONTE: Metcalf & Eddy (2016)

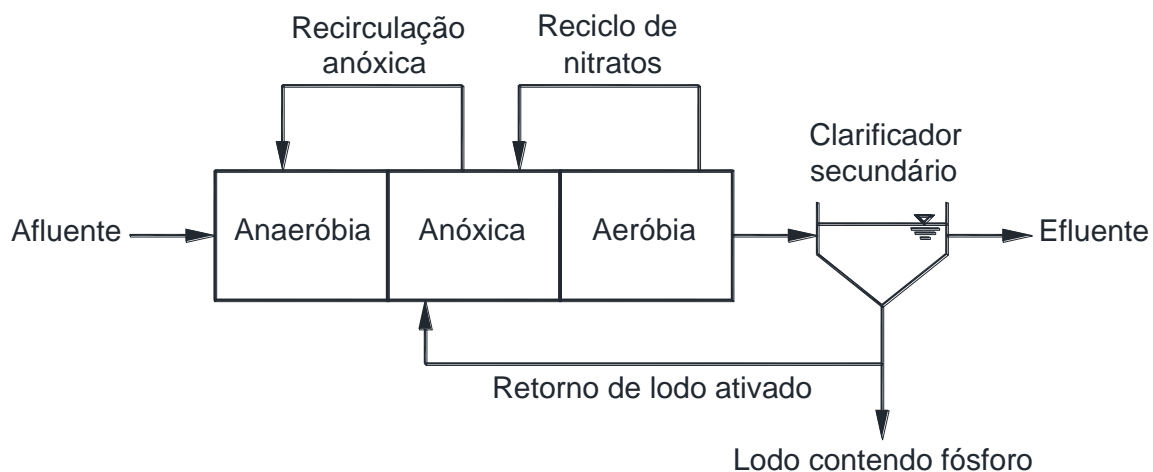
- b) Processo Anaeróbio/Anóxico/Aeróbio (A²/O), ou Phoredox 3 estágios ou Phoredox modificado: este processo apresenta uma região anóxica entre as regiões anaeróbia e aeróbia. O fósforo é removido pela alternância entre condições anaeróbias e aeróbias junto à recirculação do lodo. A existência da região anóxica diminui a disponibilidade de nitratos na zona anaeróbia, não prejudicando assim a remoção do fósforo. A Figura 18 representa o processo A²/O.

FIGURA 18 – FLUXOGRAMA DO PROCESSO A²/O

FONTE: Metcalf & Eddy (2016)

- c) Processo da Universidade de Capetown (UCT): este processo, constituído das mesmas etapas que o A²/O, distingui-se por evitar o retorno de nitratos à zona anaeróbia, sendo o lodo dirigido para a região anóxica. Foi desenvolvido para minimizar a quantidade de nitrato na região anaeróbia, o que aumenta a capacidade de remoção do fósforo. A Figura 19 representa o processo UCT.

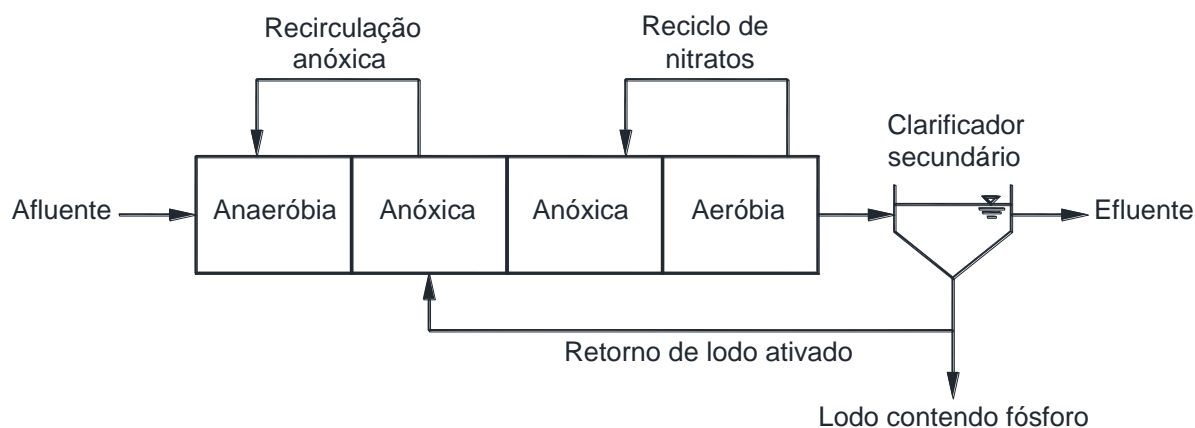
FIGURA 19 – FLUXOGRAMA DO PROCESSO UCT



FONTE: Metcalf & Eddy (2016)

- d) Processo UCT Modificado: neste processo, a zona anóxica é separada em duas. A primeira recebe o lodo retornado e promove a recirculação para a zona anaeróbia. A segunda recebe a recirculação interna da zona aeróbia, sendo a que ocorre a maior parte da desnitrificação. A Figura 20 representa o processo UCT modificado.

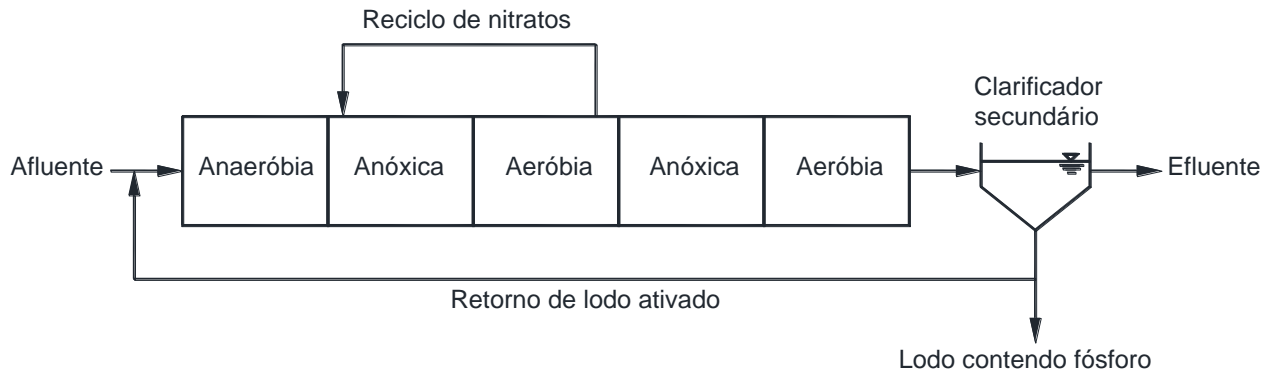
FIGURA 20 – FLUXOGRAMA DO PROCESSO UCT MODIFICADO



FONTE: Metcalf & Eddy (2016)

- e) Bardenpho modificado ou Bardenpho cinco estágios: semelhante ao Bardenpho quatro estágios, neste, adiciona-se uma zona anaeróbia à montante a remoção de fósforo. Na primeira região, a anaeróbia, as bactérias estão em grande quantidade devido ao retorno do lodo e possuem uma quantidade de alimento disponível vindo do esgoto, assim a demanda de oxigênio é muito maior que sua disponibilidade, levando à câmara às suas condições de anaerobiose e permitindo a liberação de fósforo no meio. Na segunda região, na região anóxica, ocorre a desnitrificação devido à recirculação dos nitratos. Na região seguinte, aeróbia, ocorre a redução da matéria orgânica e a nitrificação, ao mesmo tempo em que ocorre a absorção do fósforo disponibilizado no anteriormente. Na quarta câmara, na região anóxica, continua a ocorrer a desnitrificação e ocorre a respiração endógena. A câmara final aeróbia ocorre para interromper a desnitrificação. A Figura 21 representa o processo Bardenpho cinco estágios.

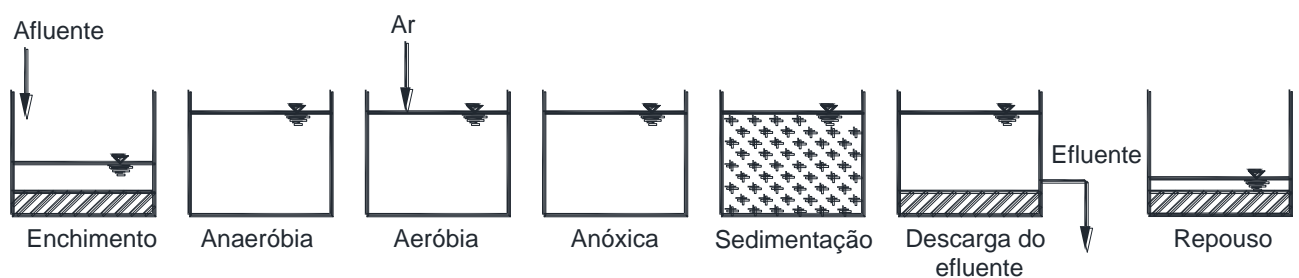
FIGURA 21 – FLUXOGRAMA DO PROCESSO BARDENPHO 5 ESTÁGIOS



FONTE: Metcalf & Eddy (2016)

- f) Batelada: semelhante ao processo batelada para a remoção de nitrogênio, porém para que haja remoção de fósforo é necessário adicionar uma fase anaeróbia à montante. A Figura 22 representa o fluxograma processo batelada com adição de fase anaeróbia

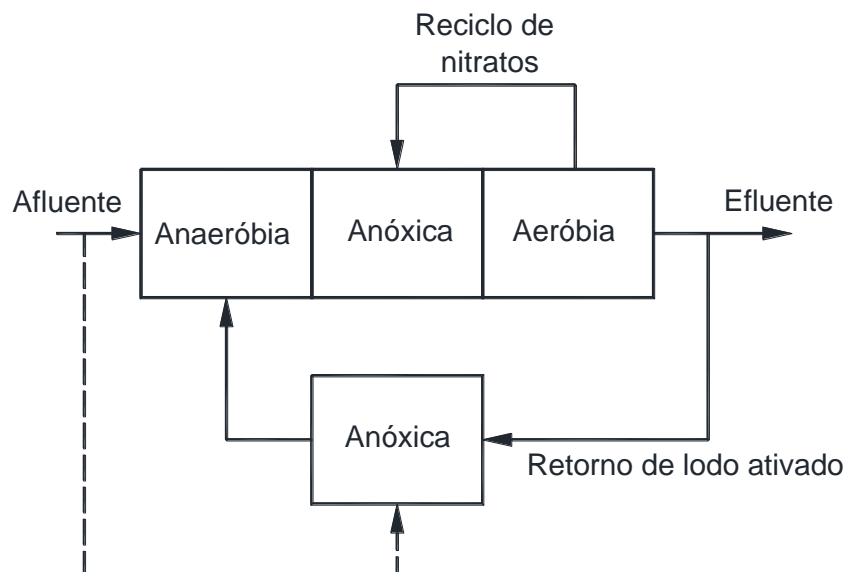
FIGURA 22 – FLUXOGRAMA DO PROCESSO BATELADA



FONTE: Metcalf & Eddy (2016)

- g) Johannesburg: o processo Johannesburg é uma modificação do processo Bardenpho, no qual se inclui um compartimento de desnitrificação do lodo ativado de retorno para reduzir os nitratos residuais desse lodo, o que permitirá a remoção do fósforo no compartimento anaeróbio de forma mais eficiente (WRC, 2018). A Figura 23 apresenta o fluxograma desse processo.

FIGURA 23 – FLUXOGRAMA DO PROCESSO JOHANNESBURG



FONTE: (PROSAB, 2009)

- h) Valo de oxidação: semelhante ao processo para remoção de nitrogênio, também pode ser utilizado para a remoção de fósforo. (EPA, 2007).

II) Processos físico-químicos

Segundo Chao (2006) e Hartman e Cleland (2007) os processos físico-químicos costumam ser auxiliares do tratamento biológico, sendo utilizados quando as concentrações de fósforo ainda estiverem acima do limite para um determinado corpo d'água.

Esse tratamento consiste na aplicação de agentes coagulantes no líquido, tais como alumínio, cal e sais de ferro. Com a ação de agentes, as partículas pequenas vão se unir em massas maiores, sofrendo precipitação nas unidades de decantadores. O lodo, juntamente com o fósforo aderido a ele pode ser em seguida retirado por filtração ou flotação em unidades de decantadores.

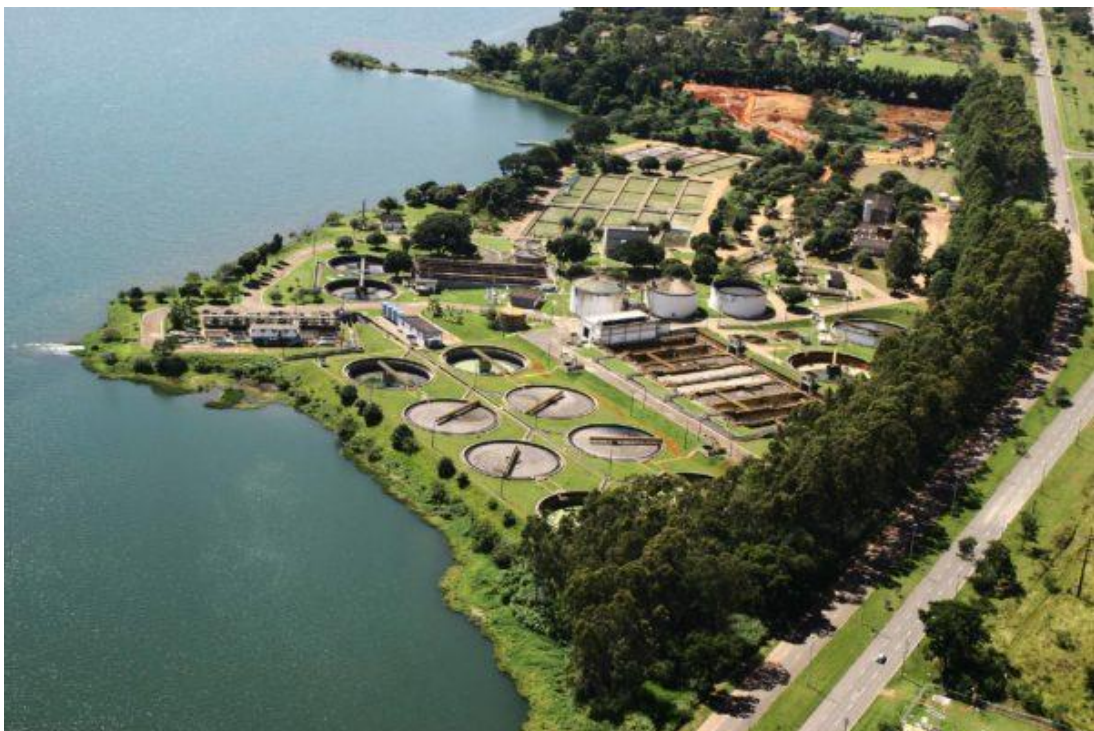
Esse tipo de processo adotado para remoção de fósforo é altamente eficiente, podendo diminuir a concentração de fósforo em mais de 95%, além de possuir baixo custo para implantação. Porém os custos operacionais relativos aos gastos com insumos químicos e maior volume de lodo produzido aumentam. Segundo a United States Environmental Protection Agency - EPA (2015), tratamentos com adição química de sais metálicos podem atingir concentração de fósforo de 0,5 mg/L a 0,1 mg/L e, quando utilizado filtração avançada

(constituído por uma membranas de microporos que farão a separação das partículas com o uso de altas pressões) essa concentração pode ser até menor.

Ao abordar o tratamento primário avançado, é citado que ele também pode ser utilizado para a remoção de nutrientes, no caso, o fósforo, através da adição de coagulantes, quando isso ocorre, o tratamento primário avançado pode ser considerado como um tratamento terciário visando a remoção de nutrientes.

As Figuras 24 e 25 apresentam imagens das ETEs Norte e Sul de Brasília, respectivamente, nas quais o tratamento terciário para remoção de fósforo é aplicado. Ambas foram projetadas para operarem com o processo A^2/O ou UCT, porém tem sido utilizado o processo (LUDUVICE, 1999).

FIGURA 24 – IMAGEM DA ETE NORTE EM BRASÍLIA



FONTE: (CAESB, 2018)

FIGURA 25 – IMAGEM DA ETE SUL EM BRASÍLIA



FONTE: (CAESB, 2018)

A Figura 26 apresenta imagens da ETE Gama no Distrito Federal que possui tratamento terciário. Nela, são aplicados os reatores anaeróbios de fluxo ascendente – RAFA, seguido por lodos ativados e precipitação química.

FIGURA 26 – IMAGEM DA ETE GAMA



FONTE: Adaptado de Pereira (2013)

3.7 LEGISLAÇÃO PARA CONTROLE DE NUTRIENTES

No Brasil, as leis responsáveis pela segurança ambiental com relação ao lançamento de esgotos são a Resolução CONAMA N° 430 (CONAMA, 2011), que aborda as condições e padrões de lançamento de efluentes”, e a Resolução CONAMA N° 357, que aborda sobre a classificação dos corpos de água e diretrizes ambientais para o seu enquadramento. No Estado de São Paulo, o Decreto Estadual N° 8.468, de 8 de setembro de 1976, aborda a prevenção e o controle da poluição do meio ambiente.

A Resolução CONAMA N°357 (CONAMA, 2011), de 17 de março de 2005, que tem como objetivo a classificação de corpos d’água conforme exposto no Quadro 8.

QUADRO 8 - CLASSES DAS ÁGUAS DOÇES DE ACORDO COM A CONAMA N° 357

| | Águas doces |
|-----------------|---|
| Classe especial | <ul style="list-style-type: none"> - Abastecimento para consumo humano, com desinfecção - Preservação do equilíbrio natural das comunidades aquáticas - Preservação dos ambientes aquáticos em unidades de conservação de |
| Classe 1 | <ul style="list-style-type: none"> - Abastecimento para consumo humano, após tratamento simplificado - Proteção das comunidades aquáticas - Recreação de contato primário - Irrigação de hortaliças que são consumidas cruas e de frutas - Proteção das comunidades aquáticas em Terras Indígenas |
| Classe 2 | <ul style="list-style-type: none"> - Abastecimento para consumo humano, após tratamento convencional - Proteção das comunidades aquáticas - Recreação de contato primário - Irrigação de hortaliças , plantas frutíferas e de parques, jardins, campos de esportes e lazer, com os quais o público possa vir a ter contato direto - Aquicultura e à atividade de pesca |
| Classe 3 | <ul style="list-style-type: none"> - Abastecimento para consumo humano, após tratamento convencional ou avançado - Irrigação de culturas arbóreas, cerealíferas e forrageiras - Pesca amadora - Recreação de contato secundário |
| Classe 4 | <ul style="list-style-type: none"> - Navegação - Harmonia paisagística |

FONTE: (CONAMA, 2011)

A partir de sua classificação são definidas as concentrações limites de nutrientes para os corpos d’água (Quadro 9).

QUADRO 9 - CONCENTRAÇÕES MÁXIMAS DE SUBSTÂNCIAS RELACIONADAS À EUTROFIZAÇÃO EM ÁGUAS DOCES

| Águas doces | | | |
|--|--------------|-------------|--------------|
| Padrões | | | |
| Parâmetros inorgânicos | Valor Máximo | | |
| | Classe 1 | Classe 2 | Classe 3 |
| Fósforo total (ambiente lântico) | 0,02 mg/L P | 0,03 mg/L P | 0,05 mg/L P |
| Fósforo total (ambiente lântico, com tempo de residência entre 2 e 40 dias, e tributários diretos de ambiente lântico) | 0,025 mg/L P | 0,05 mg/L P | 0,075 mg/L P |
| Fósforo total (ambiente lótico e tributários de ambientes intermediários) | 0,1 mg/L P | 0,15 mg/L P | 0,15 mg/L P |
| Nitrato | 10 mg/L N | 10 mg/L N | 10 mg/L N |

FONTE: (CONAMA, 2011)

A Resolução CONAMA N° 430, de 13 de maio de 2011, é uma complementação da Resolução CONAMA N° 357 e define como padrão para o lançamento de esgotos 20,0 mg/L de nitrogênio amoniacal, não abordando, porém, concentrações de nitratos ou fósforo.

O Decreto n° 8.468 (1976) é válido apenas no estado de São Paulo, sendo o órgão responsável pela aplicação deste decreto, a CETESB. Este, proíbe o despejo de qualquer tipo de efluente em águas de classe 1 e define alguns limites máximos de concentrações de substâncias potencialmente prejudiciais para as águas de outras classes. Entre estas concentrações, há a tolerância máxima de nitratos de 10mg/l, coincidindo com a Resolução CONAMA n°430. Não há valores limites de concentração de fósforo.

3.8 COMPILAÇÃO E INTERPRETAÇÃO DE CUSTOS PARA A IMPLANTAÇÃO E OPERAÇÃO DE TRATAMENTO TERCIÁRIO PARA REMOÇÃO DE FÓSFORO

Com o objetivo de se compilar dados de custos sobre o tratamento terciário, foram feitas revisões na literatura de diversos autores, visando-se tratamento para remoção de fósforo, uma vez que este é o nutriente limitante nos corpos d'água brasileiros.

Os valores de custos obtidos nos estudos foram atualizados utilizando uma calculadora universal que considera a inflação do período. Além disso, unidades utilizadas nos estudos serão padronizadas para unidades mais comumente utilizadas em território nacional brasileiro, como o quilo, vazão em metros cúbicos por segundo ou litros por segundo, entre outras medidas pertinentes à cada caso. Para a calculadora de atualização de moedas, foi usado o site: <http://fxtop.com/pt/calculadora-de-inflacao.php>. Os valores em dólares foram utilizados a sigla USD (United States Dollar) e para valores em reais foram utilizados a sigla BRL (Brasil Real).

O relatório de Luduvise (1999) aborda as ETEs Norte e Sul de da cidade de Brasília, as quais possuem tratamento para remoção de nutrientes, tendo sido as primeiras estações com essa finalidade da América Latina. Em ambas são aplicados tratamentos de remoção biológica de nutrientes, consecutivamente para o polimento final são usados coagulantes metálicos e polieletrólitos seguido de flotação para reduzir a concentração de fósforo a valores menores que 0,3 mg/L.

As ETEs foram projetadas para utilizarem o processo A²/O ou o processo UCT. Ambas tem sido operadas no modo A²/O. A ETE Norte tem capacidade de projeto para tratar 80.000m³/dia de esgoto enquanto a Sul apresenta capacidade de 120.000m³/dia. Em ambas as ETE's, o sistema é composto por tratamento preliminar, decantadores primários, lodos ativados com zonas anaeróbia, anóxica e aeróbia, seguido por decantadores secundários. Após a fase de remoção biológica da DBO e dos nutrientes, o efluente recebe o tratamento químico em unidades de flotação por ar dissolvido.

Outro estudo, de Neder (1999) em seu relatório sobre a ETE Riacho Fundo no Distrito Federal, cita que o tratamento aplicado para a remoção de fósforo é o de lodo ativado por batelada. O projeto foi concebido para atender uma população prevista de 40.000 habitantes. Seu dimensionamento, usou como vazão média de 93 L/s e máxima de 167 L/s. A eficiência de remoção de fósforo é da ordem de 90%. O custo para a construção da ETE foi de BRL

301,78 por habitante. Atualmente, de acordo com a CAESB (2018) a vazão média da estação é de 46 L/s e tem vazão de projeto de 94 L/s.

O relatório também apresenta que a construção das estações das ETEs Norte e Sul de Brasília custou USD 303,04 por habitante atendido. Tal valor é superior ao da construção da ETE Riacho Fundo devido ao alto grau de mecanização e equipamentos mais sofisticados da aeração e do polimento final presentes nas ETEs Norte e Sul.

O livro disponibilizado pelo Programa de Pesquisa em Saneamento Básico (2009) também aborda a experiência no Brasil com remoção de fósforo e fornece os seguintes dados. A ETE Sul apresenta uma vazão de projeto de 1,5 m³/s; a Norte, 0,92 m³/s; Riacho Fundo 0,07 m³/s; Gama 0,33 m³/s e; Melchior 1,47 m³/s. As ETEs Sul e Norte apresentam padrão de lançamento de 0,3 mg/L de fósforo. As ETE's Norte e Sul utilizam processos Phoredox ou Bardenpho, que atingem uma concentração de fósforo de 1,0 a 1,5 mg/L, sendo complementado por polimento químico para atingir o padrão de 0,3 mg/L. A ETE Riacho Fundo utiliza o sistema de lodos ativado por batelada. A Gama e Melchior utilizam processos de remoção biológica e química. Os Quadros 10 e 11 apresentam informações compiladas sobre os custos das ETEs citadas. As células em cinza são as quais não se têm dados.

QUADRO 10 – COMPILADO DE INFORMAÇÕES DE CUSTOS E VAZÕES DAS ETES NORTE, SUL E RIACHO FUNDO

| Processo | | | | |
|----------|--------------|--|---------------------|---------------------------------------|
| A2/O | | | | |
| Ano | Estação | Custo de construção da estação (USD/hab) | Vazão tratada (L/s) | Custo de operação atualizado (BRL/m³) |
| 2018 | Sul | 307,38 | 1319 | |
| 2009 | | - | | 0,89 |
| 1998 | | - | 925,24 | 0,77 |
| 1997 | | - | 912,73 | 0,84 |
| 1996 | | - | 953,13 | 0,70 |
| 2018 | Norte | 307,38 | 450 | |
| 2009 | | - | | 1,31 |
| 1998 | | - | 418,64 | 1,19 |
| 1997 | | - | 372,15 | 1,26 |
| 1996 | | - | 349,80 | 1,26 |
| Batelada | | | | |
| Ano | Estação | Custo de construção da estação (BRL/hab) | Vazão tratada (L/s) | Custo de operação atualizado (BRL/m³) |
| 1999 | Riacho Fundo | 90 | | |
| 2018 | | - | 46 | |

FONTE: Adaptado de (LUDUVICE, 1999), (NEDER, 1999) e (PROSAB, 2009)

QUADRO 11 – CUSTO E VAZÕES DAS ETES GAMA E MELCHIOR

| ETE | Custo de operação (R\$/m ³) | Vazão de projeto (m ³ /s) | Vazão média atual (m ³ /s) |
|----------|---|--------------------------------------|---------------------------------------|
| Gama | 1,32 | 0,33 | 0,187 |
| Melchior | 0,52 | 1,47 | 0,77 |

FONTE: Adaptado de (PROSAB, 2009)

Sperling (2014) em seu livro aborda brevemente dados sobre custos para alguns tipos de tratamentos. No estudo do livro, foram abordados os custos para diferentes concentrações finais de fósforo e eficiência de remoção. O Quadro 12 apresenta os valores dos custos para diferentes tratamentos.

QUADRO 12 – CUSTOS DE IMPLANTAÇÃO E OPERAÇÃO PARA DIFERENTES TRATAMENTOS

| Tratamento | Ano | Concentração final de fósforo (mg/L) | Eficiência de remoção de fósforo (%) | Custo | |
|---|------|--------------------------------------|--------------------------------------|-----------------------|-------------------------------------|
| | | | | Implantação (BRL/hab) | Operação e manutenção (BRL/hab.ano) |
| Primário avançado | 2004 | < 2,0 | 75 - 90 | 40 - 60 | 8 - 15 |
| | 2018 | | | 88,26 - 132,39 | 17,65 - 33,10 |
| Lodos ativados com remoção biológica de | 2004 | 1 - 2 | 75 - 88 | 130 - 190 | 15 - 25 |
| | 2018 | | | 286,85 - 419,24 | 33,10 - 55,16 |
| Lodos ativados com filtração | 2004 | 3 - 4 | 50 - 60 | 130 - 190 | 15 - 25 |
| | 2018 | | | 286,85 - 419,24 | 33,10 - 55,16 |

FONTE: Adaptado de (PROSAB, 2009)

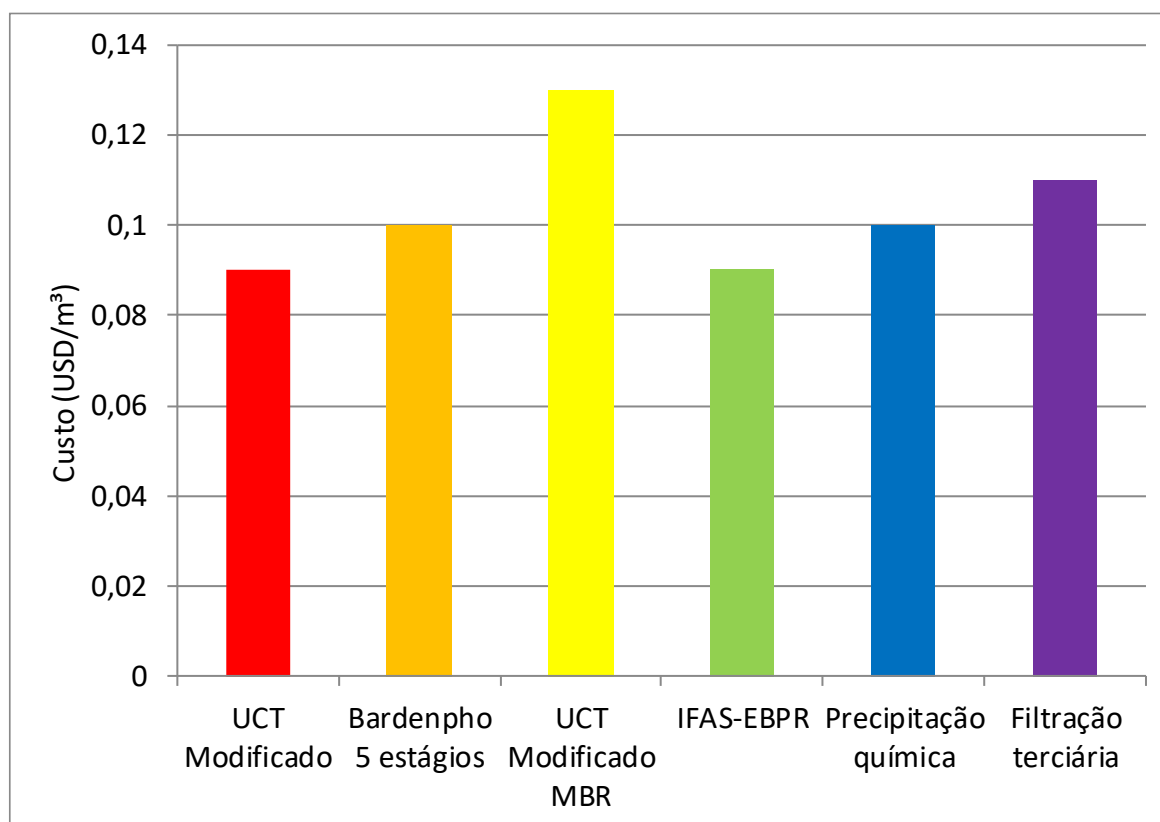
Outra literatura utilizada foi de Bashar, Gungor e outros (2018), na qual o estudo foi feito utilizando-se de seis tipos de tratamentos: I) UCT Modificado; II) Bardenpho 5 estágios; III) UCT Modificado com biorreatores de membrana; IV) Lodo ativado por filme fixo com remoção biológica de fósforo melhorada (IFAS-EBPR: Integrated Fixed-Film Activated Sludge Systems with Enhanced Biological Phosphorus Removal); V) precipitação química com precipitação de estruvita; VI) filtração terciária. Todas as configurações citadas apresentam tratamento preliminar e primário. Para o estudo, foram utilizadas nas estações uma vazão de média de 2628 L/s e concentração de fósforo no afluente de 5,73 mg/L. A partir desse estudo, foi possível confeccionar a tabela do Quadro 13. O Quadro 13 apresenta os custos e eficiência de remoção de fósforo para cada tipo de tratamento utilizado. A Figura 27 apresenta um gráfico com a relação tratamento e custo.

QUADRO 13 – RELAÇÃO ENTRE TRATAMENTOS, EFICIÊNCIA, CONCENTRAÇÃO DO EFLUENTE E CUSTO

| Variáveis | UCT Modificado | Bardenpho 5 estágios | UCT Modificado MBR | IFAS-EBPR | Precipitação química | Filtração terciária |
|--|----------------|----------------------|--------------------|-----------|----------------------|---------------------|
| Vazão (L/s) | 2628 | 2628 | 2628 | 2628 | 2628 | 2628 |
| Concentração de fósforo inicial (mg/L) | 5,73 | 5,73 | 5,73 | 5,73 | 5,73 | 5,73 |
| Eficiência de remoção (%) | 84,4 | 83,5 | 82,4 | 85,5 | 90,2 | 99,1 |
| Concentração final (mg/L) | 0,93 | 0,95 | 1,02 | 0,82 | 0,58 | 0,05 |
| Custo (USD/kg removido) | 19,16 | 20,87 | 27,61 | 19,15 | 20,23 | 19,98 |
| Custo (USD/m ³) | 0,09 | 0,10 | 0,13 | 0,09 | 0,10 | 0,11 |

FONTE: ADAPTADO DE (BASHAR, GUNGOR, ET AL., 2018)

FIGURA 27 – RELAÇÃO CUSTO POR TIPO DE TRATAMENTO EMPREGADO



FONTE: ADAPTADO DE (BASHAR, GUNGOR, ET AL., 2018)

As opções mais favoráveis do ponto de vista de rentabilidade foram: I, IV, V, VI. A opção II, embora bastante atraente, foi maior que as outras (I, IV, V, VI). A opção IV foi a que apresentou menor custo. A opção III, de sistema de membranas, apresentou um alto custo, devido aos custos operacionais, de manutenção e a curta vida útil das membranas.

No estudo, um efluente final com concentração de 0,05 mg/L, o processo biológico UCT Modificado seguido por filtração nas membranas, foi a configuração mais econômica e eficiente.

Uma outra abordagem sobre os custos foi feita por Suplee, Hartman e Cleland (2007) que especificam alguns processos e sua relevância para a remoção de nutrientes, entre eles, aqueles voltados para a remoção de fósforo são Bardenpho 5 estágios, A/O, A²/O, Johannesburg; além de processos físicos como osmose reversa e filtração por areia e os químicos, os quais utilizam adição química. Utilizando processos biológicos para remoção de nutrientes reduz o fósforo total para uma concentração de 1 a 3 mg/L.

Os processos de remoção de fósforo utilizados no estudo incluem remoção biológica, adição química e tecnologias de filtração. Tais processos combinados podem atingir um efluente com concentração de fósforo de 0,01 mg/L. O estudo não foi capaz de compilar os custos de tratamento do fósforo especificamente, porém dados apontam que o custo mensal residencial de esgoto varia de USD 21,79 para uma estação com vazão de 87,6 L/s no Colorado e USD 55,68 para 245,4 L/s em Oregon.

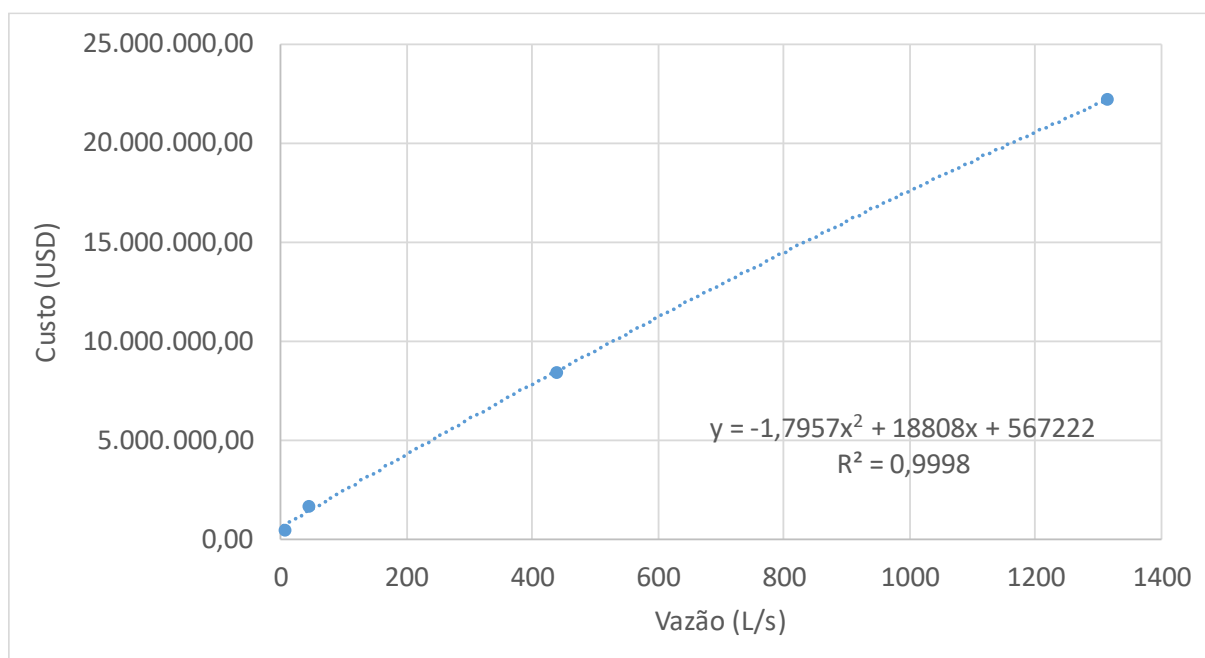
O estudo relata que a carga de fósforo despejada analisada é de 10,76 mg/L e sua redução por remoção biológica, adição química de sais metálicos e microfiltração alcança uma concentração final de 0,1 mg/L de fósforo. Os custos estimados para reduzir a concentração de fósforo para 0,1mg/L foram apresentados no Quadro 14. Nele, estão dispostos os custos de implantação e, operação e manutenção para cada vazão tratada. A Figura 28 e 29 apresentam os gráficos referentes aos custos de implantação e operação apresentados no Quadro 14. Para se obter as curvas de custo das tabelas presentes nas Figuras 28 e 29 utilizou-se a função de linha de tendência polinomial de segundo grau do Excel.

QUADRO 14 – CUSTOS PARA ATINGIR CONCENTRAÇÃO DE 0,1 MG/L EM DIFERENTES VAZÕES

| Tipo de custo | Custo médio anual (USD) | | | |
|-----------------------|-------------------------|--------------|--------------|---------------|
| | Vazão L/s | | | |
| | 4,38 L/s | 43,81 L/s | 438,13 L/s | 1314,38 L/s |
| Capital | 469.661,83 | 1.591.766,24 | 8.435.755,84 | 22.187.889,88 |
| Operação e Manutenção | 65.831,34 | 229.746,94 | 1.325.463,14 | 3.711.296,80 |

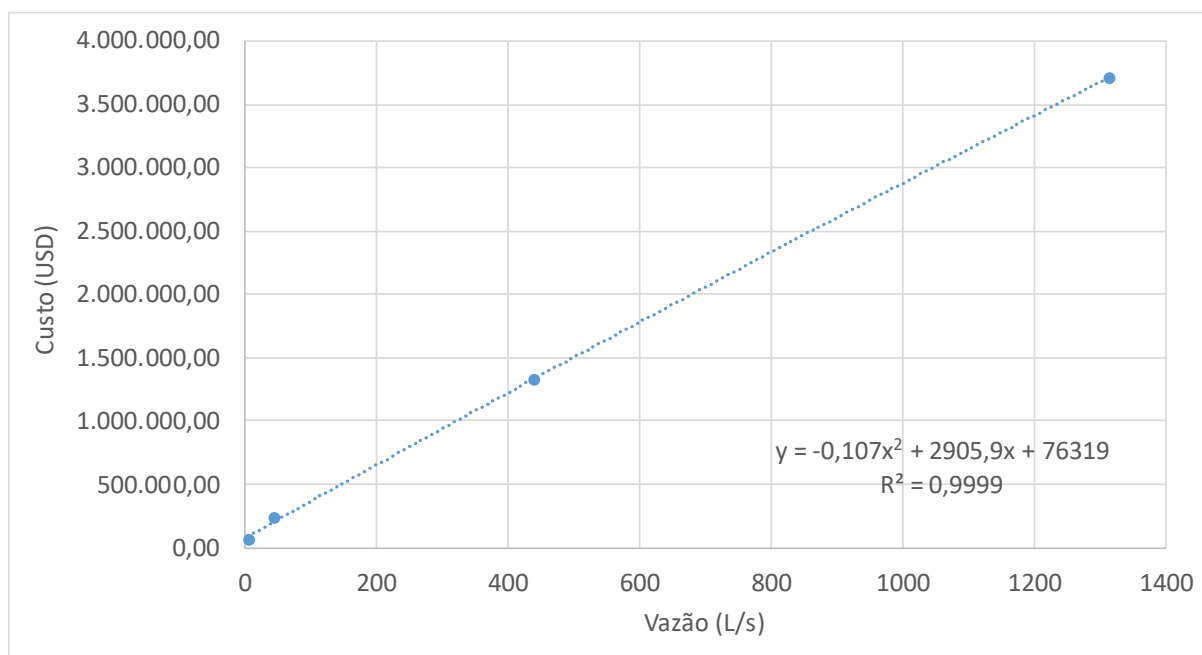
FONTE: Adaptado de (SUPLEE, HARTMAN e CLELAND, 2007)

FIGURA 28 – CUSTO DE IMPLANTAÇÃO EM FUNÇÃO DAS VAZÕES



FONTE: Adaptado de (SUPLEE, HARTMAN e CLELAND, 2007)

FIGURA 29 – CUSTO DE OPERAÇÃO E MANUTENÇÃO EM FUNÇÃO DAS VAZÕES



FONTE: Adaptado de (SUPLEE, HARTMAN e CLELAND, 2007)

O estudo de Jiang, Cummings, Rowles e Russell (2005) aborda a variação de custos para diferentes variáveis desejadas, como concentração, vazão e tipos de tratamento. No estudo, apresentaram os custos para a adição de um tratamento de remoção de fósforo, utilizando processos de lodos ativados, A/O e A²/O e adição química. Como as características padrões de esgotos do estado da Georgia, foram adotadas para o estudo 20 anos de vida útil e uma concentração de fósforo que chega na ETE de 6,34 mg/L.

O estudo feito apresenta resultados para a redução do efluente até a concentração de 2,0 mg/L, 1,0mg/L, 0,5 mg/L, 0,13 mg/L e 0,05mg/L para diferentes volumes a serem tratados, variando entre 43,81 e 4381,26 L/s. No estudo, para atingir uma menor concentração mais restritiva de fósforo, é necessário a adição de equipamentos, como o decantador e o filtro de areia.

A estimativa foi feita pela soma do TAEC (Total Annual Economic Cost) que engloba o custo de implantação e os custos de manutenção e operação do tratamento pelo custo por quilo de fósforo removido.

As tecnologias necessárias para variáveis concentrações de fósforo desejadas estão dispostas no Quadro 15.

QUADRO 15 – TECNOLOGIAS E MELHORAS EMPREGADAS PARA ATINGIR DETERMINADAS CONCENTRAÇÕES FINAIS DE FÓSFORO

| Concentração | Lodo ativado básico | A/O | A ² /O |
|--------------|--|--|--|
| 2 mg/L | - Adição de alume | | |
| 1 mg/L | - Adição de alume | - Adição de alume | - Adição de alume |
| 0,5 mg/L | - Adição de alume - Filtro | - Adição de alume - Filtro | - Adição de alume - Filtro |
| 0,13 mg/L | - Adição de alume - Filtro | - Adição de alume - Filtro | - Adição de alume - Filtro |
| 0,05 mg/L | - Decantador terciário - Adição de alume - Filtro - Ultrafiltro | - Decantador terciário - Adição de alume - Filtro - Ultrafiltro | - Decantador terciário - Adição de alume - Filtro - Ultrafiltro |

FONTE: Adaptado de (JIANG, CUMMINGS, *et al.*, 2005)

As tabelas dos Quadros 16 a 20 foram formadas com as informações do estudo. Neles, estão relacionados os custos de implantação e o custo de operação por quilo removido de fósforo para diferentes vazões e concentrações finais desejadas. Os custos referentes à energia, trabalho, disposição do lodo, manutenção e seguro são incluídas no item de operação e manutenção.

QUADRO 16 – CUSTOS PARA DIFERENTES TRATAMENTOS PARA
ATINGIR CONCENTRAÇÃO DE 0,05 mg/L DE P

| Custo em USD para 0,05 mg/L | | |
|-----------------------------|------------------------|--------------------------|
| A/O | | |
| L/s | Custo de implementação | Custo por quilo removido |
| 43,81 | 1.483.094,13 | 531,87 |
| 438,13 | 7.351.544,18 | 264,66 |
| 876,25 | 13.309.491,28 | 239,09 |
| 2.190,63 | 30.083.797,30 | 216,07 |
| 4.381,26 | 58.083.591,64 | 208,40 |
| A ² /O | | |
| L/s | Custo de implementação | Custo por quilo removido |
| 43,81 | 1.508.664,72 | 540,82 |
| 438,13 | 7.351.544,18 | 263,38 |
| 876,25 | 13.309.491,28 | 237,81 |
| 2.190,63 | 30.083.797,30 | 214,79 |
| 4.381,26 | 58.083.591,64 | 207,12 |
| Lodo ativado | | |
| L/s | Custo de implementação | Custo por quilo removido |
| 43,81 | 1.368.026,48 | 494,79 |
| 438,13 | 7.095.838,29 | 255,71 |
| 876,25 | 12.989.858,93 | 233,97 |
| 2.190,63 | 29.853.662,00 | 213,51 |
| 4.381,26 | 57.738.388,70 | 207,12 |

FONTE: Adaptado de (JIANG, CUMMINGS, *et al.*, 2005)

QUADRO 17 – CUSTOS PARA DIFERENTES TRATAMENTOS PARA
ATINGIR CONCENTRAÇÃO DE 0,5 mg/L DE P

| Custo em USD para 0,5 mg/L | | |
|----------------------------|------------------------|--------------------------|
| A/O | | |
| L/s | Custo de implementação | Custo por quilo removido |
| 43,81 | 726.204,71 | 303,01 |
| 438,13 | 2.672.126,49 | 111,74 |
| 876,25 | 4.577.135,33 | 95,63 |
| 2.190,63 | 10.215.450,08 | 85,41 |
| 4.381,26 | 19.714.923,69 | 82,34 |
| A ² /O | | |
| L/s | Custo de implementação | Custo por quilo removido |
| 43,81 | 828.487,07 | 343,92 |
| 438,13 | 2.736.052,96 | 113,79 |
| 876,25 | 4.666.632,39 | 96,91 |
| 2.190,63 | 10.330.517,73 | 85,79 |
| 4.381,26 | 20.008.985,45 | 71,73 |
| Lodo ativado | | |
| L/s | Custo de implementação | Custo por quilo removido |
| 43,81 | 594.516,18 | 249,31 |
| 438,13 | 2.186.285,31 | 91,54 |
| 876,25 | 3.746.091,21 | 78,50 |
| 2.190,63 | 8.502.220,66 | 71,34 |
| 4.381,26 | 16.620.882,49 | 69,68 |

FONTE: Adaptado de (JIANG, CUMMINGS, *et al.*, 2005)

QUADRO 18 – CUSTOS PARA DIFERENTES TRATAMENTOS PARA
ATINGIR CONCENTRAÇÃO DE 0,13 mg/L DE P

| Custo em USD para 0,13mg/L | | |
|----------------------------|------------------------|--------------------------|
| A/O | | |
| L/s | Custo de implementação | Custo por quilo removido |
| 43,81 | 930.769,42 | 342,65 |
| 438,13 | 4.513.208,86 | 166,21 |
| 876,25 | 8.220.944,18 | 150,87 |
| 2.190,63 | 19.293.008,98 | 141,92 |
| 4.381,26 | 37.895.612,07 | 139,36 |
| A ² /O | | |
| L/s | Custo de implementação | Custo por quilo removido |
| 43,81 | 962.732,65 | 354,15 |
| 438,13 | 4.564.350,04 | 167,49 |
| 876,25 | 8.284.870,65 | 152,15 |
| 2.190,63 | 19.356.935,45 | 141,92 |
| 4.381,26 | 38.074.606,19 | 140,64 |
| Lodo ativado | | |
| L/s | Custo de implementação | Custo por quilo removido |
| 43,81 | 857.893,24 | 319,63 |
| 438,13 | 4.743.344,16 | 176,44 |
| 876,25 | 8.860.208,89 | 164,93 |
| 2.190,63 | 21.377.011,94 | 159,82 |
| 4.381,26 | 42.344.894,46 | 157,26 |

FONTE: Adaptado de (JIANG, CUMMINGS, *et al.*, 2005)

QUADRO 19 – CUSTOS PARA DIFERENTES TRATAMENTOS PARA
ATINGIR CONCENTRAÇÃO DE 1,00 mg/L DE P

| Custo em USD para 1,00 mg/L | | |
|-----------------------------|------------------------|--------------------------|
| A/O | | |
| L/s | Custo de implementação | Custo por quilo removido |
| 43,81 | 190.500,88 | 86,94 |
| 438,13 | 994.695,89 | 45,26 |
| 876,25 | 1.764.370,60 | 40,27 |
| 2.190,63 | 3.976.226,50 | 36,18 |
| 4.381,26 | 7.568.894,18 | 34,39 |
| A ² /O | | |
| L/s | Custo de implementação | Custo por quilo removido |
| 43,81 | 245.477,65 | 111,23 |
| 438,13 | 1.061.179,42 | 48,20 |
| 876,25 | 1.853.867,66 | 42,06 |
| 2.190,63 | 4.104.079,44 | 37,21 |
| 4.381,26 | 7.786.244,18 | 35,29 |
| Lodo ativado | | |
| L/s | Custo de implementação | Custo por quilo removido |
| 43,81 | 82.848,71 | 36,31 |
| 438,13 | 434.700,00 | 19,05 |
| 876,25 | 820.815,89 | 18,03 |
| 2.190,63 | 1.968.935,31 | 17,26 |
| 4.381,26 | 3.861.158,85 | 17,00 |

FONTE: Adaptado de (JIANG, CUMMINGS, *et al.*, 2005)

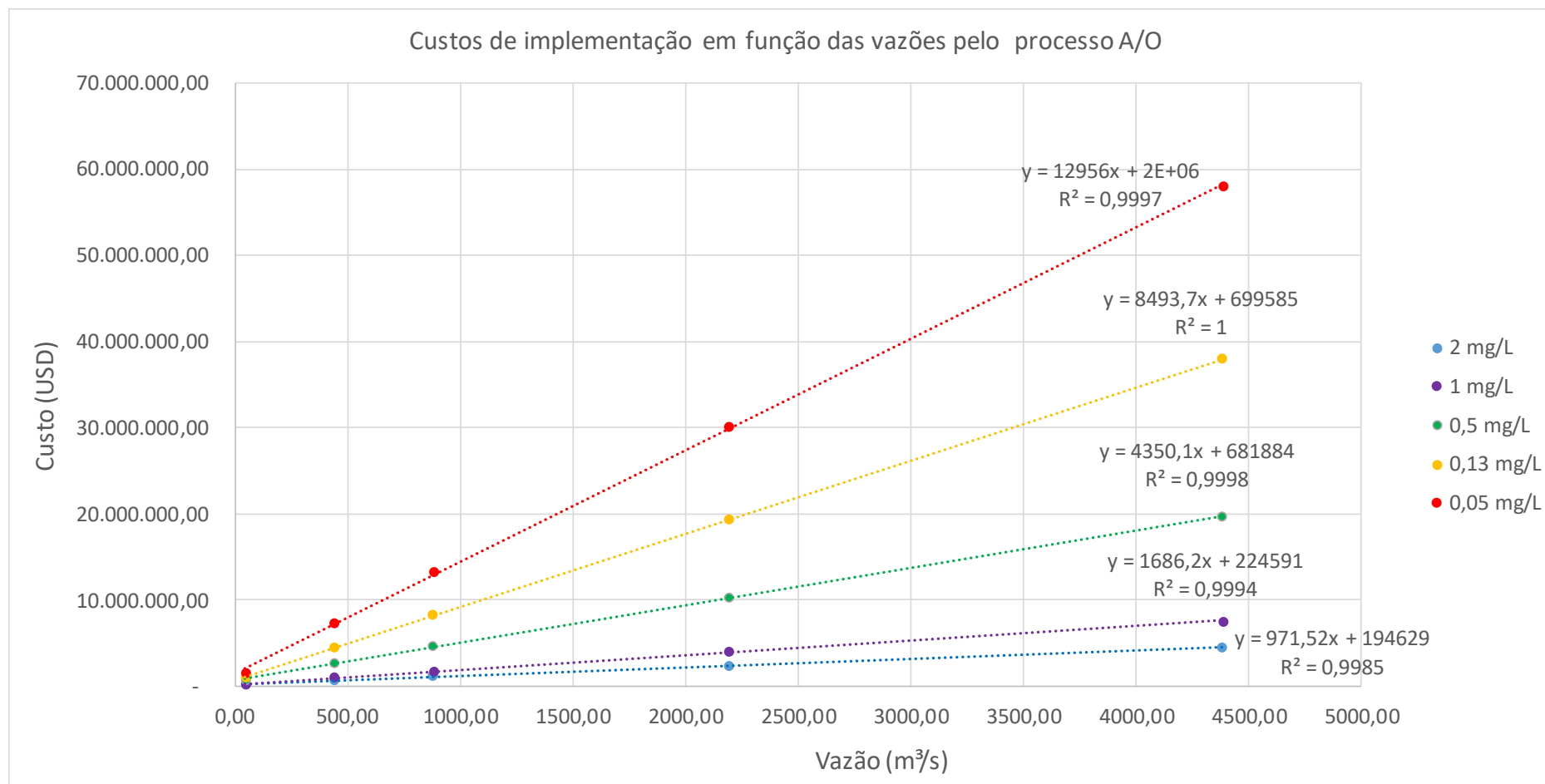
QUADRO 20 – CUSTOS PARA DIFERENTES TRATAMENTOS PARA ATINGIR CONCENTRAÇÃO DE 2,00 mg/L DE P

| Custo em USD para 2,00 mg/L | | |
|-----------------------------|------------------------|--------------------------|
| A/O | | |
| L/s | Custo de implementação | Custo por quilo removido |
| 43,81 | 144.473,82 | 78,25 |
| 438,13 | 640.543,24 | 34,78 |
| 876,25 | 1.103.370,89 | 29,92 |
| 2.190,63 | 2.378.064,72 | 25,83 |
| 4.381,26 | 4.410.926,51 | 23,91 |
| A ² /O | | |
| L/s | Custo de implementação | Custo por quilo removido |
| 43,81 | 178.994,12 | 92,82 |
| 438,13 | 713.419,42 | 37,08 |
| 876,25 | 1.204.374,72 | 31,32 |
| 2.190,63 | 2.531.488,26 | 26,34 |
| 4.381,26 | 4.794.485,33 | 24,93 |
| Lodo ativado | | |
| L/s | Custo de implementação | Custo por quilo removido |
| 43,81 | 57.661,68 | 39,38 |
| 438,13 | 191.779,41 | 13,04 |
| 876,25 | 336.253,24 | 11,48 |
| 2.190,63 | 769.674,71 | 10,48 |
| 4.381,26 | 1.483.094,13 | 10,11 |

FONTE: Adaptado de (JIANG, CUMMINGS, *et al.*, 2005)

A partir dessas tabelas, foi possível confeccionar gráficos que relacionam o custo para diferentes tipos de tratamentos, vazões e concentrações finais de fósforo. Os gráficos estão expostos nas Figuras 30 a 35. As curvas coloridas dos gráficos representam as diferentes concentrações finais de fósforo que se objetiva atingir para diferentes vazões. Cada concentração final de fósforo foi assinalada com uma cor diferente para melhor identificação. Lembrando que a concentração inicial de fósforo foi adotado como sendo de 6,34 mg/L.

FIGURA 30 – CUSTOS DE IMPLANTAÇÃO EM FUNÇÃO DAS VAZÕES PELO PROCESSO A/O



FONTE: Adaptado de (JIANG, CUMMINGS, *et al.*, 2005)

FIGURA 31 – CUSTOS POR QUILO DE FÓSFORO REMOVIDO EM FUNÇÃO DAS VAZÕES PELO PROCESSO A/O

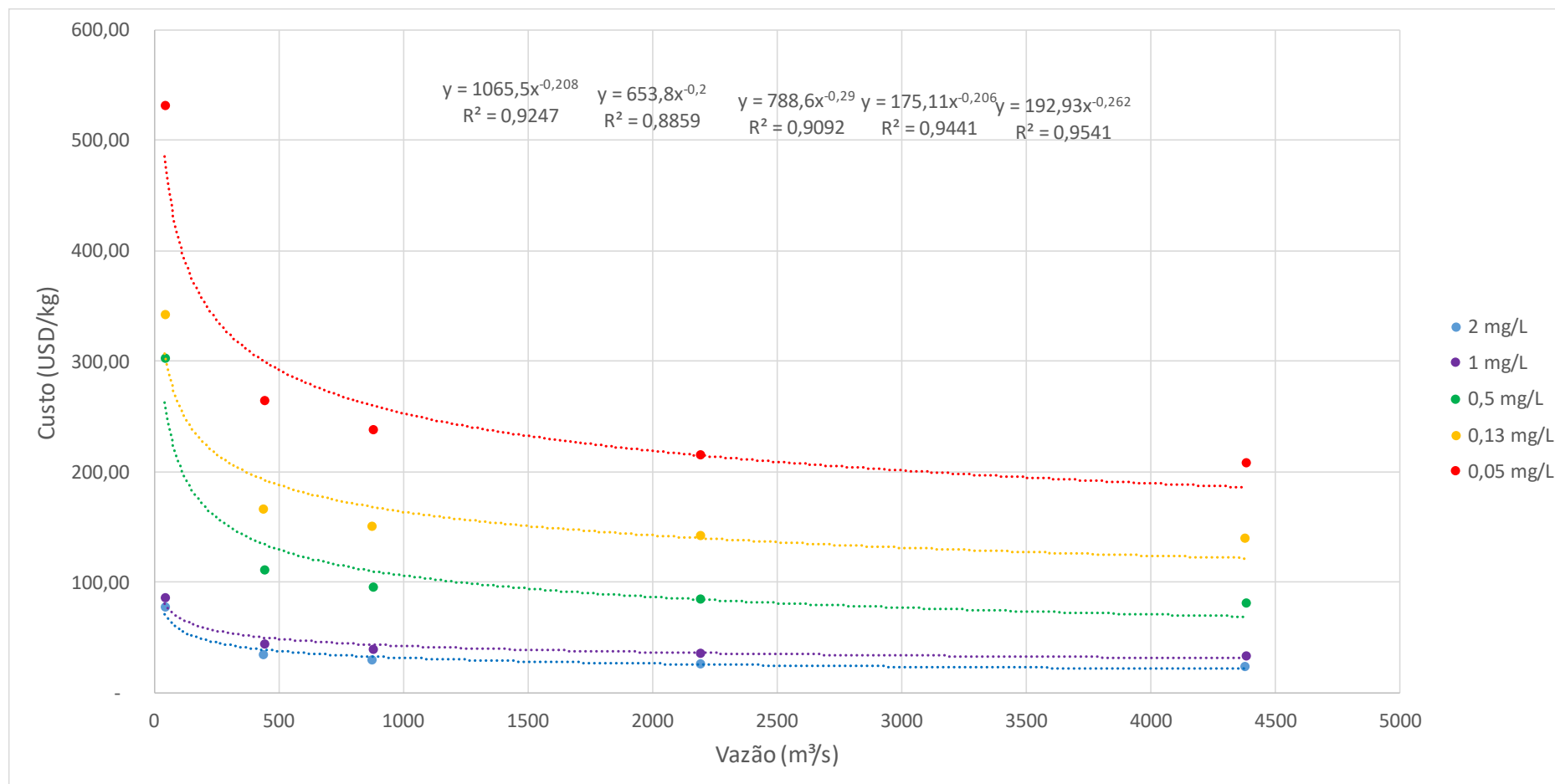
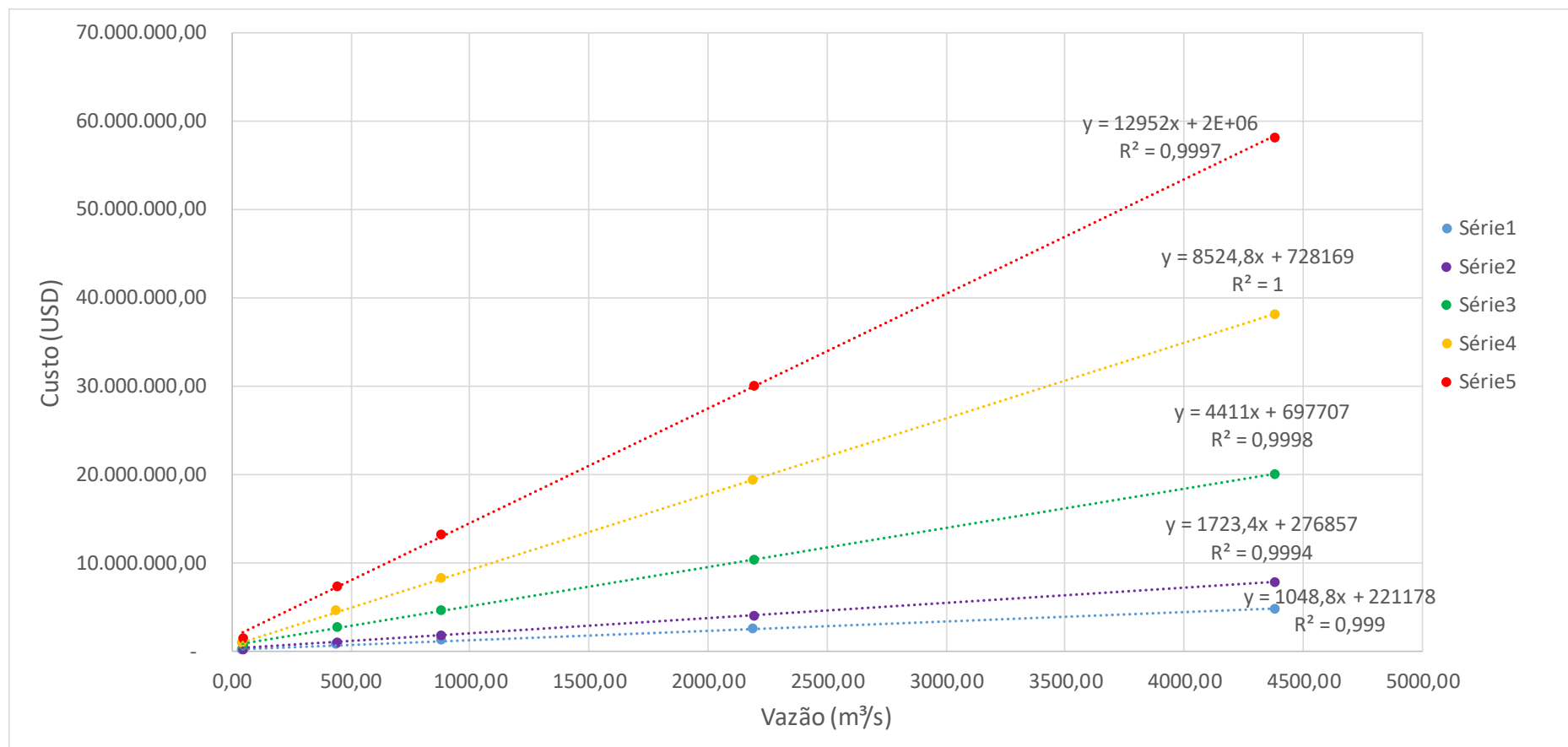
FONTE: Adaptado de (JIANG, CUMMINGS, *et al.*, 2005)

FIGURA 32 – CUSTOS DE IMPLANTAÇÃO EM FUNÇÃO DAS VAZÕES PELO PROCESSO A²/O

FONTE: Adaptado de (JIANG, CUMMINGS, *et al.*, 2005)

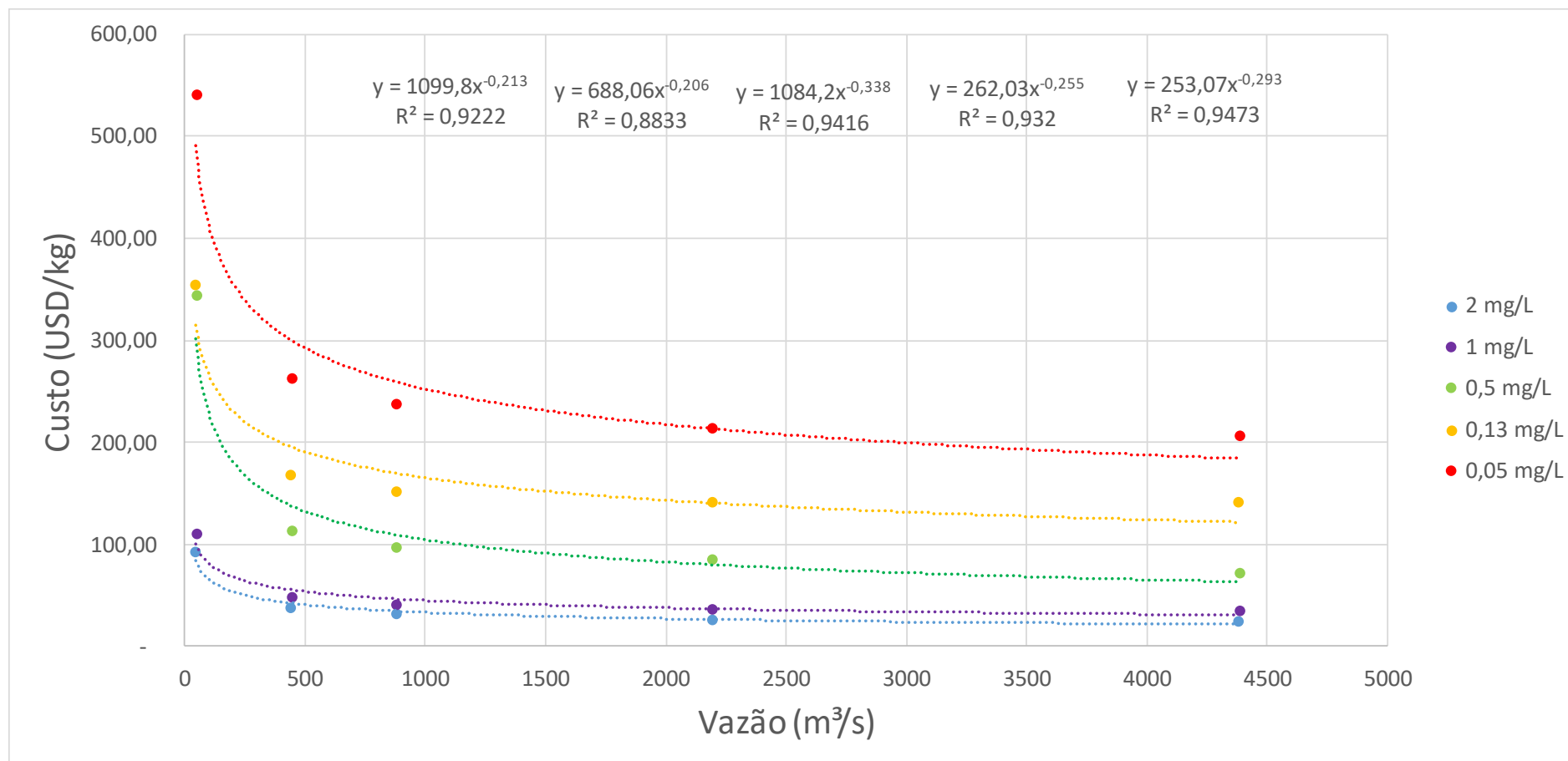
FIGURA 33 – CUSTOS POR QUILO DE FÓSFORO REMOVIDO EM FUNÇÃO DAS VAZÕES PELO PROCESSO A²/OFONTE: Adaptado de (JIANG, CUMMINGS, *et al.*, 2005)

FIGURA 34 – CUSTOS DE IMPLANTAÇÃO EM FUNÇÃO DAS VAZÕES PELO PROCESSO LODOS ATIVADOS

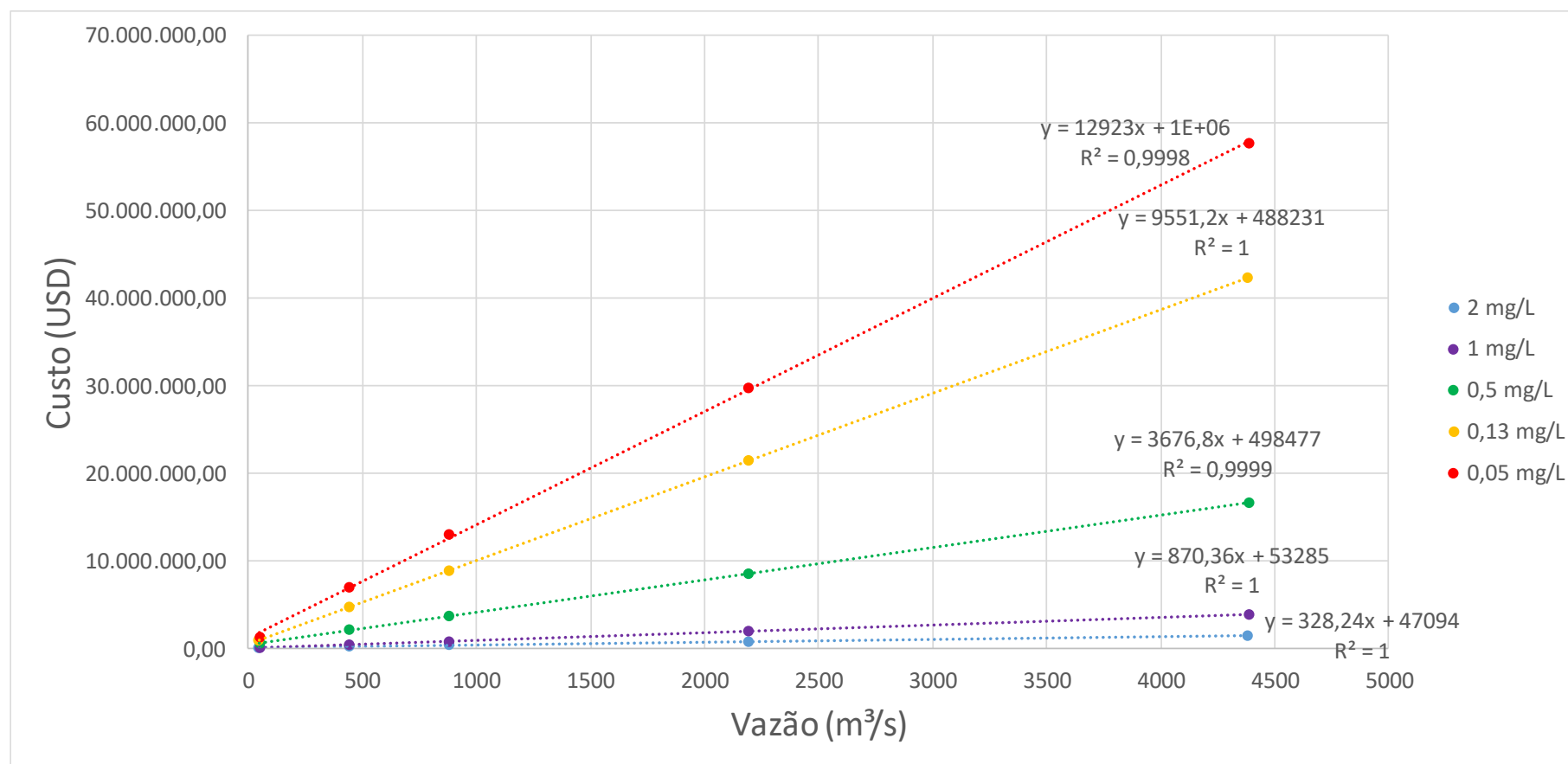
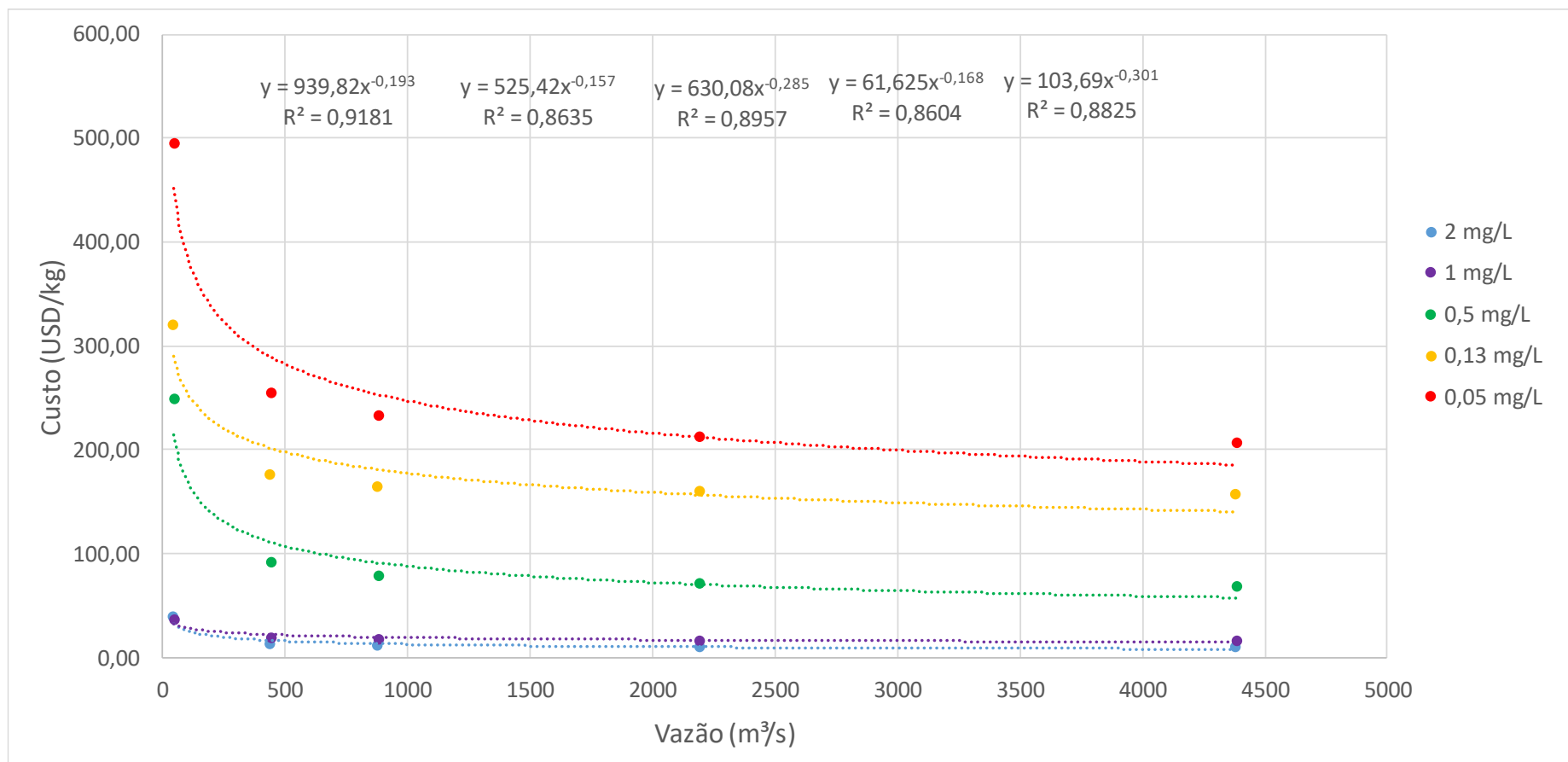
FONTE: Adaptado de (JIANG, CUMMINGS, *et al.*, 2005)

FIGURA 35 – CUSTOS POR QUILO DE FÓSFORO REMOVIDO EM FUNÇÃO DAS VAZÕES PELO PROCESSO LODOS ATIVADOS

FONTE: Adaptado de (JIANG, CUMMINGS, *et al.*, 2005)

A Agência de Proteção do Meio Ambiente dos Estados Unidos nomeado “A Compilation of Cost Data Associated with the Impacts and Control of Nutrient Pollution” (USEPA, 2015) fez um compilado que contém informações pertinentes sobre o assunto da eutrofização. O compilado aborda informações sobre custos da poluição e custos de controle da poluição pelos nutrientes no qual são abordados os custos para a redução dos impactos causados pelos nutrientes e os custos de controle da poluição pelos nutrientes de acordo com o tipo de tratamento aplicado.

Para o estudo de custos de tratamentos realizados as concentrações de fósforo inicial foram variáveis e a concentração final adotado foi menor que 1 mg/L. Obteve-se assim uma faixa ampla de valores de custo devido à variação de concentração inicial de fósforo. Os valores dos custos com o tratamento emprego está exposto no Quadro 21.

QUADRO 21 – RELAÇÃO DE CONCENTRAÇÃO DE FÓSFORO, CUSTOS E TECNOLOGIAS EMPREGADAS

| Qualidade do efluente (mg/L de P) | Faixa de eficiência da remoção (%) | Faixa de custo de implantação (\$) | Faixa do custo anual de operação e manutenção (\$/(L/s)/ano) | Tecnologia empregada |
|-----------------------------------|------------------------------------|------------------------------------|--|---|
| < 1,0 | 75 - 99 | \$741,03 a \$547.620,92 | \$ 247,01 a \$55.083,21 | Precipitação química ou qualquer variante tecnológica da remoção biológica de nutrientes (frequentemente usada em combinação com a filtração terciária, ultrafiltração e/ou osmose reversa) |
| < 1,0 | 81 - 99 | \$3.458,14 a \$2.430.577,31 | \$988,04 a \$45.696,83 | Lagoas e vales de oxidação capazes de alcançar este padrão mas com um custo unitário relativamente alto |
| < 1,0 | 22 - 85 | \$1.235,05 a \$316.666,68 | \$247,01 a \$38.286,53 | Vale de oxidação, lagoas e outros sistemas de remoção biológica de nutrientes |

FONTE: Adaptado de (USEPA, 2015)

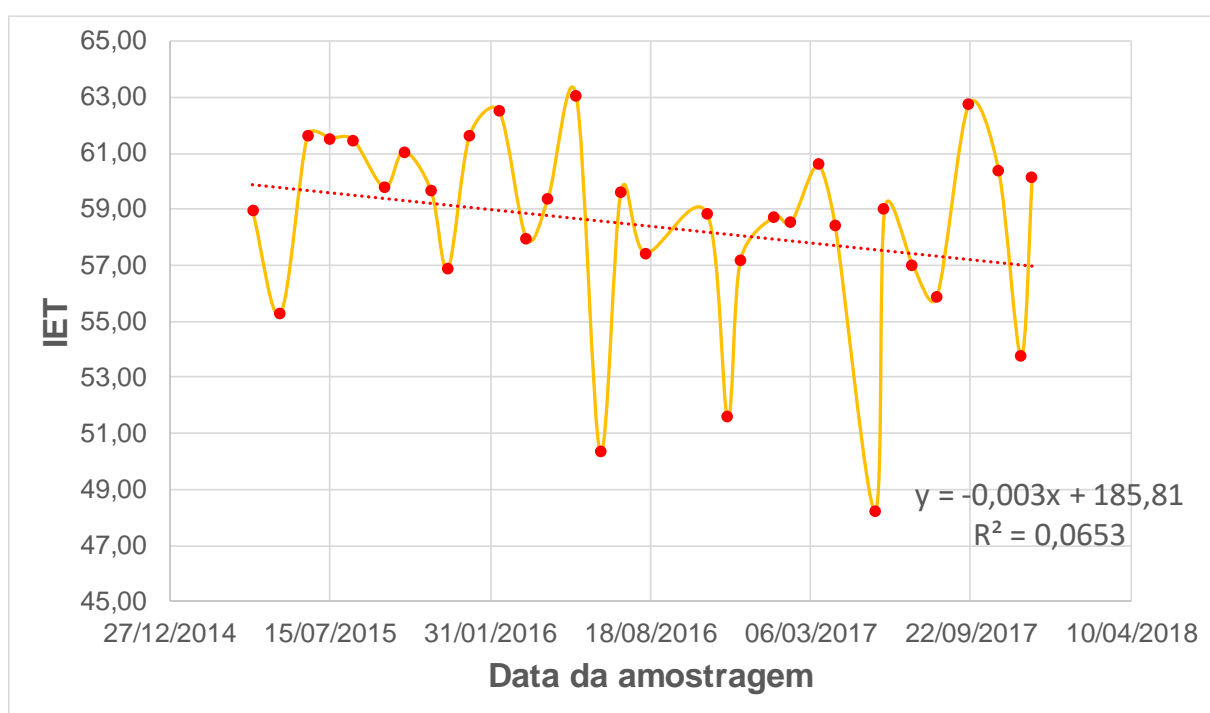
4. METODOLOGIA

A metodologia empregada neste trabalho foi a revisão da literatura com relação ao fenômeno da eutrofização e o cenário no Estado de São Paulo, processos de remoção de nutrientes dos esgotos predominantemente domésticos e os custos correspondentes. Também verificou-se o método empregado pela CETESB para a avaliação de tendência do Índice do Estado Trófico utilizando a ferramenta de linha de tendência do programa Excel. Foram utilizados os dados amostrais de IET do reservatório Billings no braço do Rio Grande disponibilizados pela CETESB. A partir desses dados foram recriadas as linhas de tendência com a análise linear utilizada pela CETESB, em seguida foram adicionadas linhas de tendência de polinômios de ordem 6, que é o grau máximo permitido pelo Excel, para observar se ocorreria uma maior precisão dos resultados.

5. VERIFICAÇÃO DA ANÁLISE DE TENDÊNCIA DO IET

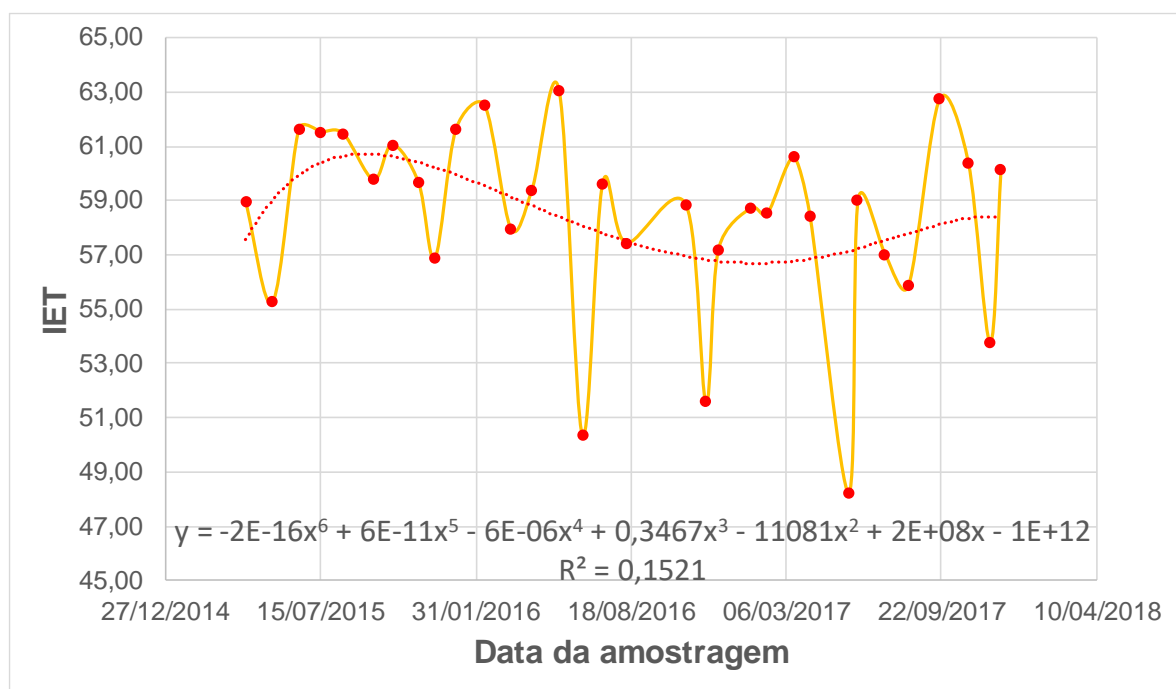
A CETESB calcula a tendência de IET para os pontos amostrais com a utilização de “linha de tendência linear do Excel” e, a partir desse resultado, foi possível prever a melhora ou piora dos corpos d’água em relação à eutrofização em seu relatório de 2016. As Figuras 36 a 41 apresentam as nuvens de pontos com os traçados das linhas de tendência linear e polinomial para os diferentes pontos amostrais.

FIGURA 36 – GRÁFICO COM NUVEM DE PONTOS DE IET DO PONTO DE AMOSTRAGEM RGDE02030 – BILLINGS COM A LINHA DE TENDÊNCIA LINEAR



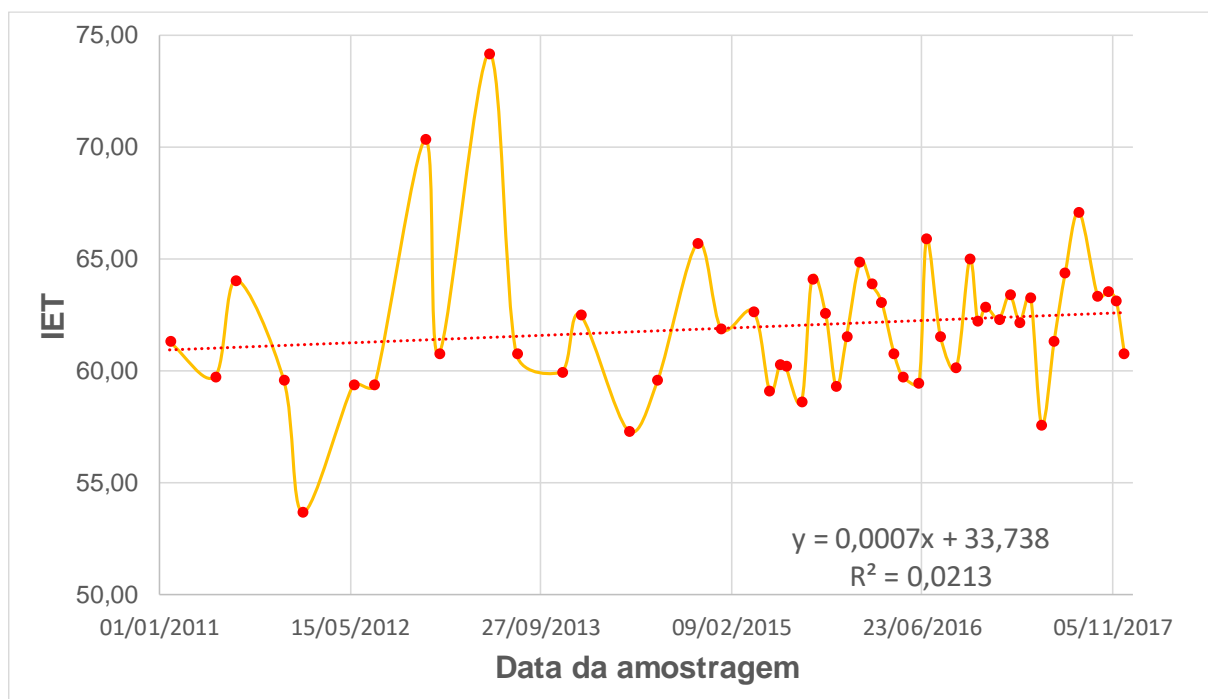
FONTE: Adaptado de (CETESB, 2017)

FIGURA 37 – GRÁFICO COM NUVEM DE PONTOS DE IET DO PONTO DE AMOSTRAGEM
RGDE02030 - BILLINGS COM A LINHA DE TENDÊNCIA POLINOMIAL DE ORDEM 6



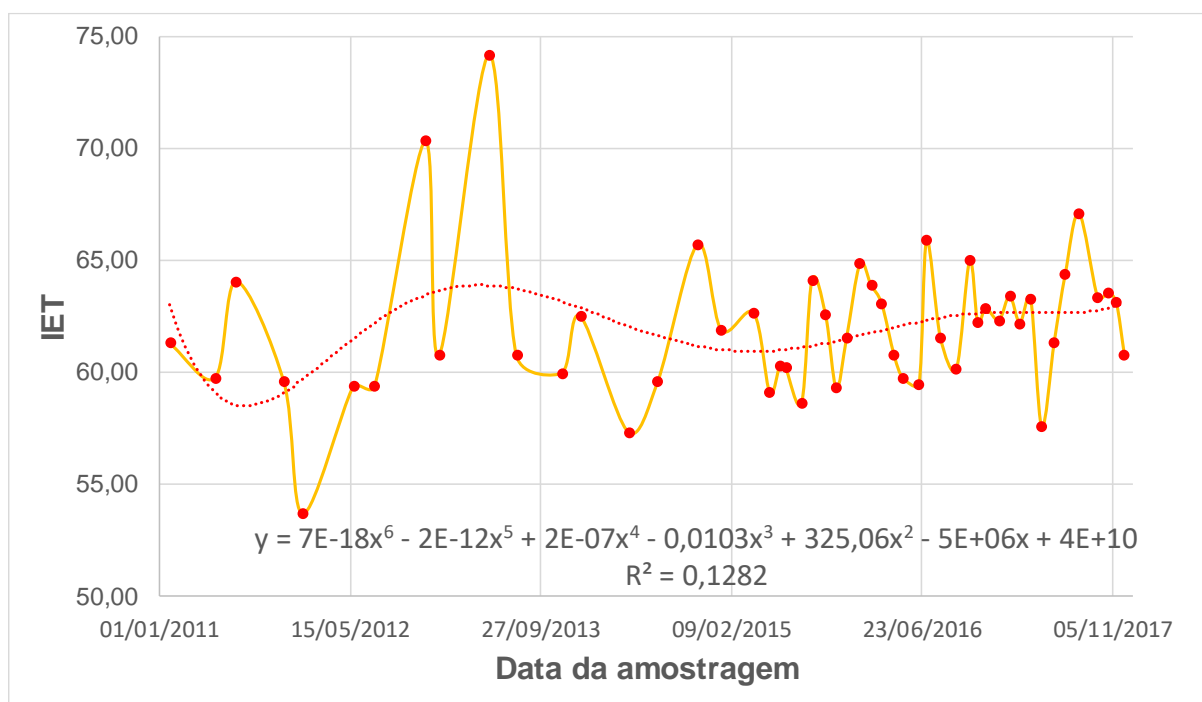
FONTE: Adaptado de (CETESB, 2017)

FIGURA 38 – GRÁFICO COM NUVEM DE PONTOS DE IET DO PONTO DE AMOSTRAGEM
RGDE02200 – BILLINGS COM A LINHA DE TENDÊNCIA LINEAR



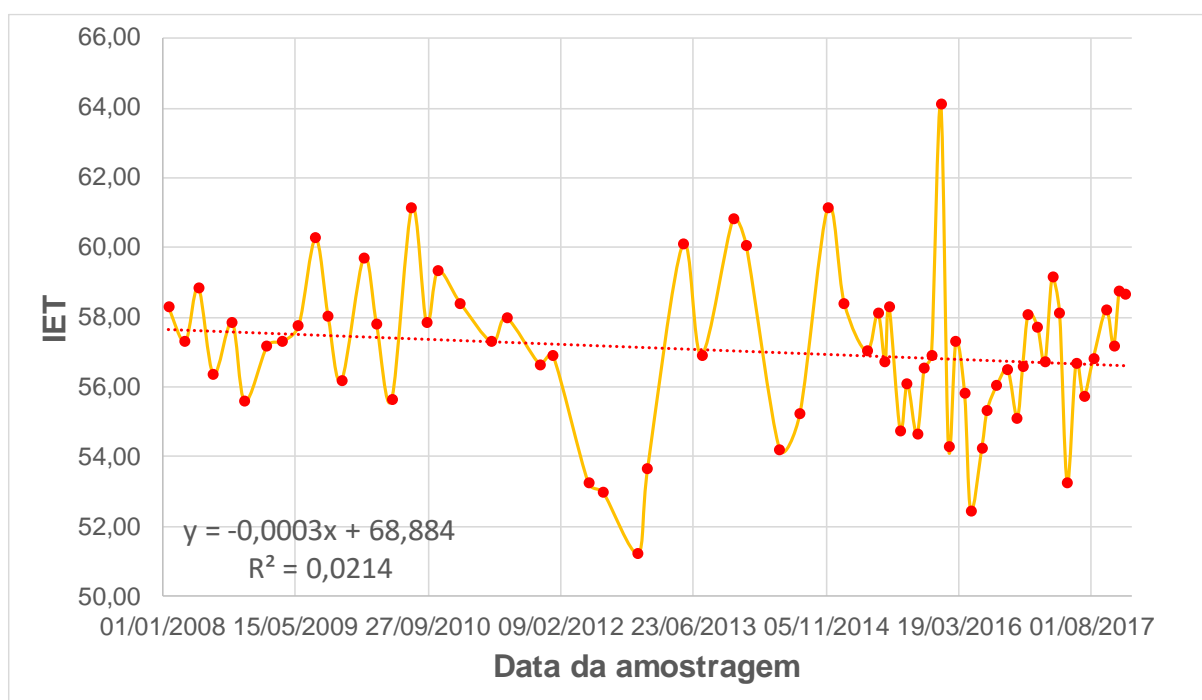
FONTE: Adaptado de (CETESB, 2017)

FIGURA 39 – GRÁFICO COM NUVEM DE PONTOS DE IET DO PONTO DE AMOSTRAGEM RGDE02200 - BILLINGS COM A LINHA DE TENDÊNCIA POLINOMIAL DE ORDEM 6



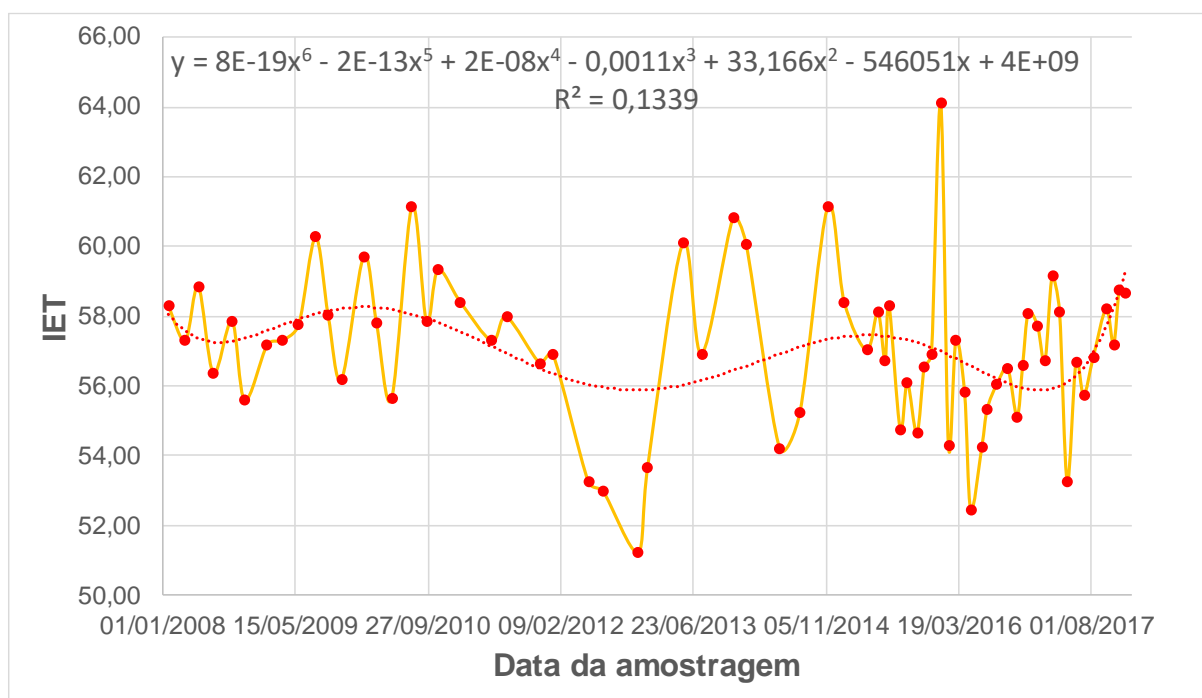
FONTE: Adaptado de (CETESB, 2017)

FIGURA 40 – GRÁFICO COM NUVEM DE PONTOS DE IET DO PONTO DE AMOSTRAGEM RGDE02900 – BILLINGS COM A LINHA DE TENDÊNCIA LINEAR



FONTE: Adaptado de (CETESB, 2017)

FIGURA 41 – GRÁFICO COM NUVEM DE PONTOS DE IET DO PONTO DE AMOSTRAGEM RGDE02900 - BILLINGS COM A LINHA DE TENDÊNCIA POLINOMIAL DE ORDEM 6



FONTE: Adaptado de (CETESB, 2017)

Os resultados do R^2 foram compilados para a tabela do Quadro 22.

QUADRO 22 – VALORES OBTIDOS DO R^2 PARA DIFERENTES ANÁLISES DE TENDÊNCIA

| Ponto amostral | Equação | |
|----------------|---------|--------------------|
| | R^2 | |
| | Linear | Polinomial ordem 6 |
| RGDE02030 | 0,0653 | 0,1521 |
| RGDE02200 | 0,0213 | 0,1282 |
| RGDE02200 | 0,0214 | 0,1339 |

FONTE: Adaptado de (CETESB, 2017)

Baseando-se nos resultados do R^2 , pode-se concluir que o método utilizado pela CETESB de linha de tendência linear apresenta um grande erro, pois o valor do R^2 está distante do valor 1, configurando um resultado longe de uma tendência ideal. Utilizando-se uma análise polinomial de grau 6, os resultados do R^2 melhoraram, porém, a mudança foi pouco significativa e encontra-se ainda muito distante do ideal valor 1. Além disso, os pontos de

picos máximos e mínimos dificultam ainda mais o ajuste de alguma equação que represente idealmente a dispersão e tendência dos pontos.

Vale ressaltar que os fatores naturais e antropológicos agem diretamente no IET, o que dificulta a previsão da trofia dos corpos d'água. Entre os fatores que influenciam a variação do IET estão fatores climáticos, como a escassez ou excesso de chuvas. Além disso, diversos outros fatores devem ser analisados para se obter uma tendência com maior precisão, como o descarte nos corpos d'água de esgoto *in natura* ou sem tratamento terciário, o crescimento populacional das áreas atendidas pela bacia, uso e ocupação do solo, dentre outros.

6. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Medidas preventivas que diminuem o aporte de nutrientes aos corpos d'água do Estado de São Paulo ainda não foram adotadas de forma abrangente. Em geral, o tratamento de esgoto ocorre somente até nível secundário e, além disso, grande parte do esgoto é lançado *in natura* nos corpos d'água, não passando por tratamento algum, o que tem contribuído substancialmente para o aumento contínuo da concentração de fósforo nos corpos d'água ao longo dos anos. A eutrofização já é um problema que a Região Metropolitana de São Paulo tem que enfrentar, por exemplo, com as águas da represa Billings eutrofizada, sua utilização fica bastante limitada e são necessários maiores montantes econômicos para seu tratamento. Outro exemplo é o caso da represa de Salto Grande, que apresenta uma concentração de nutrientes bastante alta, o que tem intensificado o crescimento de algas e plantas aquáticas, prejudicando diretamente a utilização dessas águas e encarecendo seu tratamento para abastecimento público.

Neste trabalho, foram apresentados os principais tratamentos para remoção de nutrientes, com foco na remoção de fósforo, por ser o nutriente limitante dos corpos d'água tropicais. Além disso, foram abordados os custos para esses tratamentos. Estes custos apresentaram grande variabilidade em todos os seus parâmetros de análise, podendo-se obter uma faixa de variação de custos para remoção de nutrientes, que variam de USD 10,00 a 540,82 por quilo de fósforo removido, como custo de operação e manutenção, e de USD 57.661,68 a 58.083.591,64 como custo de implantação. Também é possível extrair a faixa de valores para o custo por metro cúbico tratado, podendo variar de USD 0,09 a 0,4.

Os custos revisados para os diversos tipos de tratamento apresentaram uma grande variabilidade devido às características principais adotadas em cada estudo, entre elas, a concentração inicial e final de fósforo, vazões, tecnologia empregada, habitantes atendidos, local de implantação, etc.

Outra dificuldade encontrada neste trabalho para reunir informações dos tratamentos se refere à não conformidade entre os diversos autores em nomear e padronizar os tratamentos. Devido a essa variação entre os autores, optou-se por adotar a nomenclatura utilizada pelos autores Metcalf e Eddy, por serem altamente respeitados na área de saneamento, porém, ao comparar com outros autores, surge uma discordância, complicando a padronização dos nomes. Ocorreu também a não especificação do tratamento utilizado em alguns estudos, por exemplo, apresentaram o custo de tratamento para o tipo por lodos ativados, porém há uma grande

variação entre os tipos de tratamento de remoção de fósforo com a utilização de lodos ativados. Logo, sem essa especificação, não é possível determinar qual processo foi utilizado entre os tantos disponíveis para lodos ativados.

A interpretação da análise de tendência do IET da CETESB com a utilização de equações lineares e polinomiais resultaram em valores de R^2 não muito discrepantes, mas ainda sim longe do ideal 1. Essa pequena diferença entre os métodos foi muito pequena quanto ao R^2 devido à grande dispersão entre os pontos. Dessa maneira, a previsão exata de uma tendência é muito difícil devido aos diversos fatores que influenciam a variação do IET, entre eles, fatores antropológicos e naturais, como uso e ocupação do solo, clima, tratamento de esgoto, etc. Essas diversas variáveis contribuem para dificultar uma análise exata e precisa sobre como o IET deve se comportar em algum tempo futuro.

REFERÊNCIAS

ABC, D. D. G. Diário do Grande ABC. **Diário do Grande ABC**, 2017. Disponível em: <http://www.dgabc.com.br/Noticia/2773963/e-tanto-esgoto-que-ate-a-cor-da-agua-da-billings-sofre-os-efeitos?fb_comment_id=1819258798114636_1819770758063440#f1b256bc2ed6bf4>. Acesso em: Maio 2018.

ADI. ADI Systems. **ADI Systems**, 2017. Disponível em: <<https://www.adisystemsinc.com/pt/tecnologias-1/tratamento-aerobio/adi-sbr>>. Acesso em: 2018.

AESBE, A. D. E. E. D. S. B. AESBE. **Associação das Empresas Estaduais de Saneamento Básico**, 2009. Disponível em: <<https://docplayer.com.br/6708797-Padrees-de-lancamento-para-estacoes-de-tratamento-de-esgotos-domesticos-reuniao-aesbe-10-02-09.html>>. Acesso em: Agosto 2018.

ANA, A. N. D. Á. **Atlas Esgotos - Despoluição de Bacias Hidrográficas**. Brasília: Agência Nacional de Águas, 2017. Disponível em: <http://arquivos.ana.gov.br/impressa/publicacoes/ATLASESGOTOSDespoluicaoDeBaciasHidrograficas-ResumoExecutivo_livro.pdf>.

ANA, A. N. D. Á. Portal da Qualidade das Águas. **ANA, Agência Nacional de Águas**, 2018. Disponível em: <<http://portalpnqa.ana.gov.br/indicadores-estado-trofico.aspx>>. Acesso em: Maio 2018.

ANA, A. N. D. Á. Portal da Qualidade das Águas. **Portal da Qualidade das Águas**, 2018. Disponível em: <<http://portalpnqa.ana.gov.br/indicadores-estado-trofico.aspx>>. Acesso em: 05 Abril 2018.

ANA, A. N. D. Á.-. Portal da Qualidade das Águas. **Portal da Qualidade das Águas**, 2018. Disponível em: <<http://portalpnqa.ana.gov.br/indicadores-estado-trofico.aspx>>. Acesso em: 05 Abril 2018.

ASSUNÇÃO, F. A. L. D. **Estudo da remoção de nitrogênio, com ênfase na volatilização de amônia, em lagoas de polimento de efluentes de reatores UASB tratando esgotos urbanos de Belo Horizonte**. UFMG - Universidade Federal de Minas Gerais. Belo Horizonte. 2009.

B2E. Zonas de autodepuração. **Blog 2 Engenheiros**, 2018. Disponível em: <<http://2engenheiros.com/2018/01/23/autodepuracao-de-rios/zona-de-recuperacao-zona-de-aguas-limpas-autodepuracao/>>. Acesso em: Maio 2018.

BASHAR, R. et al. Cost effectiveness of phosphorus removal process in municipal wastewater treatment. **USA**, 2018.

BISHEN. BISHEN ENGENHARIA AMBIENTAL. **BISHEN AMBIENTAL**. Disponível em: <<http://www.bishenambiental.com.br/grade-mecanizada-manual>>. Acesso em: 2018.

BRASIL. Decreto N° 8.468, de 8 de Setembro de 1976, São Paulo, 1976.

CAERN. Companhia de Águas e Esgotos do Rio Grande do Norte. **Companhia de Águas e Esgotos do Rio Grande do Norte**, 2014. Disponível em: <<http://www.caern.rn.gov.br/Conteudo.asp?TRAN=ITEM&TARG=12037>>. Acesso em: Maio 2018.

CAESB. CAESB. **CAESB**, 2018. Disponível em: <<https://www.caesb.df.gov.br/balneabilidade-do-lago-paranoa/3-portal/esgoto.html>>. Acesso em: 05 Abril 2018.

CAESB. Companhia de Saneamento Ambiental do Distrito Federal. **CAESB**, 2018. Disponível em: <<https://www.caesb.df.gov.br/>>. Acesso em: 2018.

CARDOSO. Calha Parshall. **Fenômenos da Engenharia**, 2013. Disponível em: <<http://fenomenosdaengenharia.blogspot.com/2013/06/calha-parshall.html>>. Acesso em: Maio 2018.

CETESB. **Atlas de cianobactérias da bacia do Alto Tietê**, 2015. Disponível em: <<https://cetesb.sp.gov.br/laboratorios/wp-content/uploads/sites/24/2015/01/atlas-ciano-mar-2014.pdf>>.

CETESB. **Qualidade das Águas Interiores no Estado de São Paulo**. CETESB. São Paulo. 2016.

CETESB. **Qualidade das Águas Interiores no Estado de São Paulo**. CETESB. São Paulo. 2017.

CHAO, I. R. S. **Remoção de fósforo de efluentes de estações de tratamento biológico de esgotos utilizando lodo de estação de tratamento de água**. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. São Paulo. 2006.

CHERNICHARO, C. A. D. L. **Reatores Anaeróbios**. 2ª. ed. Belo Horizonte: Editora UFMG, v. 5, 2007.

CONAMA, 2005, 2011.

CONAMA, C. N. D. M. A., 2005, 2011.

CONAMA, C. N. D. M. A., 2011.

CONAMA, C. N. D. M. A., 480/11.

CYCLE. Ciclo do fósforo. **ECycle**, 2016. Disponível em: <<https://www.ecycle.com.br/component/content/article/63-meio-ambiente/3204-ciclo-do-fosforo-o-que-e-biogeoquimico-fosfato-fertilizantes-nitrogenio-eutrofizacao-rochas-sedimentar-p-ion-fosfato-fluxo-biomassa-microbiana-solubilizacao-inorganico-fungos-micori>>. Acesso em: 2018.

CYCLE. Ciclo do Nitrogênio. **ECycle**, 2016. Disponível em: <<https://www.ecycle.com.br/3056-ciclo-do-nitrogenio>>. Acesso em: 21 Maio 2018.

DAGA. DAGA Equipment for the environment. **DAGA Equipment**, 2018. Disponível em: <<http://www.dagequipment.com/products/en-puentes/en-puente-decantador---circular.html>>. Acesso em: Junho 2018.

DEZOTTI, M. **Processos e Técnicas para o Controle Ambiental de Efluentes Líquidos**. Rio de Janeiro: E-papers, 2008.

DIAS, R. Jaime Martins. **Jaime Martins**, 2018. Disponível em: <<http://www.jaiminhomartins.com.br/jaime-martins-reune-liderancas-e-faz-visita-tecnica-ete-de-arcos/>>. Acesso em: Junho 2018.

EBC, E. B. D. C. EBC. **EBC**, 2013. Disponível em: <<http://memoria.ebc.com.br/agenciabrasil/noticia/2013-11-25/coleta-e-tratamento-de-esgoto-estao-entre-principais-problemas-do-gerenciamento-de-recursos-hidricos>>. Acesso em: 16 Maio 2018.

EPA, U. S. E. P. A. **Biological Nutrient Removal Processes and Costs**. Washington. 2007.

EPA, U. S. E. P. A. **Case Studies on Implementing Low-Cost Modifications to Improve Nutrient Reduction at Wastewater Treatment Plants**. Washington. 2015.

FEDERAL, G. Tesouro Nacional - SIAFI, 2018. Disponível em: <<http://www.tesouro.fazenda.gov.br/-/series-historicas>>.

FILHO, N. SlideShare. **SlideShare**, 2012. Disponível em: <<https://pt.slideshare.net/neoson/aula-14-tratamentos-biolgicos-2710>>. Acesso em: Junho 2018.

FOGAÇA, J. Brasil Escola. **Brasil Escola**, 2018. Disponível em: <<https://brasilecola.uol.com.br/quimica/coagulacao-floculacao.htm>>. Acesso em: 2018.

GLOBO. G1. **G1**, 2018. Disponível em: <<https://g1.globo.com/jornal-nacional/noticia/2018/11/12/poluicao-provoca-crescimento-de-plantas-que-cobrem-rios-e-lagoas-em-sao-paulo.ghtml>>. Acesso em: 2018.

GLOBO, G. G1. **G1**, 2016. Disponível em: <<http://g1.globo.com/sp/campinas-regiao/noticia/2016/11/mp-pede-aco-es-prefeituras-e-preve-r-236-milhoes-para-recuperar-represa.html>>. Acesso em: 06 Abril 2018.

GLOBO, G. Globo, 2018. Disponível em: <<https://g1.globo.com/sp/sao-paulo/noticia/2018/10/10/represa-billings-amanhece-com-tapete-de-algas-verdes-em-sao-paulo.ghtml>>. Acesso em: Outubro 2018.

GOVERNO FEDERAL, B. Lei nº 11.445, de 5 de janeiro de 2007. **Lei do Saneamento Básico**, Brasília, DF, jan 2007.

HARTMAN, P.; CLELAND, J. Wastewater Treatment Performance and Cost Data to Support an Affordability Analysis for Water Quality Standards, Massachusetts, 31 May 2007.

JIANG, F. et al. **Estimation of Costs of Phosphorus Removal in Wasterwater Treatment Facilities: Adaptation of Existing Facilities**. Georgia. 2005.

JORDÃO, E. P.; PESSOA, C. A. **Tratamento de Esgotos Domésticos**. 5ª. ed. Rio de Janeiro: ABES, 2009.

JORDÃO, E. P.; PESSOA, C. A. **Tratamento de Esgotos Domésticos**. 5ª. ed. Rio de Janeiro: ABES, 2009.

JORDÃO, E. P.; PESSÔA, C. A. **Tratamento de Esgotos Domésticos**. Rio de Janeiro: ABES, 2011.

LAMPARELLI, C. C. **Desafios para o Licenciamento e Monitoramento Ambiental de Emissários**: a Experiência de São Paulo. São Paulo: CETESB, 2007.

LUDUVICE, M. **ETE's Norte e Sul: 5 anos de sucesso operacional**. Congresso da Associação Brasileira de Engenharia Sanitária e Ambiental. Rio de Janeiro. 1999.

MARCELO. Aerador Cachoeira. **Youtube**, 2014. Disponível em: <<https://www.youtube.com/watch?v=V0eiU8iW6D0>>. Acesso em: Junho 2018.

METCALF & EDDY, A. **Tratamento de efluentes e recuperação de recursos**. 5ª. ed. Porto Alegre: AMGH Editora LTDA, 2016.

MINISTÉRIO DAS CIDADES, G. **Plano Nacional de Saneamento Básico**. Brasília. 2013.

MOTA, S. **Preservação e Conservação de Recursos Hídricos**. Rio de Janeiro: ABES, 1995.

MURRAY. Slide Share. **Slide Share**, 2013. Disponível em: <<https://www.slideshare.net/MagnusMurray/constructed-wetlands-summary-code-innovation-feb-2013>>. Acesso em: Junho 2018.

NEDER, K. D. **Projeto da estação de tratamento de esgotos do Riacho Fundo. Remoção biológica de nutrientes pelo processo de lodos ativados por batelada**. Brasília. 1999.

PEREIRA, C. E. B. **Controle do aporte de nutrientes para evitar a eutrofização dos corpos d'água**. São Paulo. 2013.

PIVELI, R. P.; KATO, M. T. **Qualidade das Águas e Poluição: Aspectos Físico-Químicos**. São Paulo: Abes, 2006.

PLATZER. Brasil.rotaria. **Rotária do Brasil**, 2018. Disponível em: <<http://brasil.rotaria.net/wetlands-uma-solucao-ecologica-de-tratamento-de-efluentes/>>. Acesso em: 2018.

PROSAB, P. D. P. E. S. B. **Nutrientes de esgoto sanitário: utilização e remoção**. 1ª. ed. Rio de Janeiro: ABES RJ, 2009.

QUIP, E. Environ Quip. **Environ Quip**, 2018. Disponível em: <<http://www.environquip.com.br/sistemas/equipamentos/>>. Acesso em: 2018.

ROQUE, O. C. D. C.; NASCIMENTO, V. B. D. Coletânea em Saneamento Ambiental - UERJ. **Coletânea em Saneamento Ambiental - UERJ**, Rio de Janeiro, 2010.

SAAE. Serviço Autônomo de Água e Esgoto. **SAAE Boa Esperança**. Disponível em: <<http://saae.boaesperanca.mg.gov.br/tratamento-de-esgoto-2/>>. Acesso em: Maio 2018.

SAAEC. SAAE Cerquilho. **Serviço Autônomo de Água e Esgoto de Cerquilho**, 2014. Disponível em: <<http://www.saaec.com.br/saaec-assina-contrato-4a-lagoa/>>. Acesso em: Junho 2018.

SABESP. SABESP. **SABESP**, 2018. Disponível em: <<http://site.sabesp.com.br/site/saneamento/esgoto.aspx?secaoId=48>>. Acesso em: 05 Abril 2018.

SAEC. Superintendência de Água e Esgoto de Catanduva. **SAEC**, 2018. Disponível em: <<http://www.saec.sp.gov.br/site/index.php/estacao-de-tratamento-de-esgoto-de-catanduva/>>. Acesso em: 2018.

SANTOS, A. S. P. Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental. **UFJF**, 2013. Disponível em: <<http://www.ufjf.br/engsanitariaeambiental/files/2013/06/A-Import%C3%A2ncia-do-Tratamento-de-Esgotos.pdf>>. Acesso em: Maio 2018.

SANTOS, V. S. D. Ciclo do nitrogênio. **Mundo Educação**, 2016. Disponível em: <<https://mundoeducacao.bol.uol.com.br/biologia/ciclo-nitrogenio.htm>>. Acesso em: Maio 2018.

SANTOS, V. S. D. Brasil Escola. **Brasil Escola**, 2018. Disponível em: <<https://brasilecola.uol.com.br/biologia/organismos-autotroficos-heterotroficos.htm>>. Acesso em: Maio 2018.

SIGMA. Sigma. **Sigma Tratamento de Águas**, 2016. Disponível em: <<http://sigma.ind.br/produto/desarenadores>>. Acesso em: Junho 2018.

SIQUEIRA, ; FILHO, E. C. O. **Cianobactérias de água doce e saúde pública**. IniCEUB. [S.l.].

SIQUEIRA, D. B.; FILHO, E. C. O. **Cianobactérias de água doce e saúde pública**. UniCEUB - Centro Universitário de Brasília. Brasília. 2008.

SOARES. Praia Seca. **Praia Seca**, 2016. Disponível em: <<http://guiavirtualpraiaseca.com.br/estacao-de-tratamento-de-esgoto-wetland/>>. Acesso em: 2018.

SOUZA. Rede Souza. **Rede Souza**, 2017. Disponível em: <<https://www.rscportal.com.br/artigo/prefeitura-visita-estacao-de-tratamento-de-esgoto-ecologica>>. Acesso em: Junho 2018.

SPERLING, M. V. **Lodos Ativados**. 2ª. ed. Belo Horizonte: FCO, v. 4, 2002.

SPERLING, M. V. **Introdução à Qualidade das Águas e ao Tratamento de Esgotos**. 3ª. ed. Belo Horizonte: UFMG, v. 1, 2014.

STAKEHOLDER, G. **Nutrient Reduction Technology Cost Estimations for Point Sources in the Chesapeake Bay Watershed**. [S.l.]. 2002.

SUPLEE, M.; HARTMAN, P.; CLELAND, J. Wastewater treatment performance and cost data do support an affordability analysis for water quality standards, Massachussetts, 31 Maio 2007.

TERA, A. Tera Ambiental. **Tera Ambiental**, 2015. Disponível em: <<http://www.teraambiental.com.br/blog-da-tera-ambiental/entenda-a-importancia-do-tratamento-de-efluentes-industriais-com-a-escassez-de-agua>>. Acesso em: 19 Maio 2018.

THOMANN, R. V.; MUELLER, J. A. **Principles of Surface Water Quality Modeling and Control**. New York: Pearson, 1987.

TRATA BRASIL, I. Trata Brasil. **Trata Brasil**, 2017. Disponível em: <<http://m.tratabrasil.org.br/saneamento-no-brasil>>. Acesso em: 17 Maio 2018.

USEPA, U. S. E. P. A. **A compilation of cost data associated with the impacts and control of nutrient pollution.** [S.l.]. 2015.

VIRTUOUS. Só Biologia. **Só Biologia**, 2008. Disponível em: <https://www.sobiologia.com.br/conteudos/bio_ecologia/ecologia28.php>. Acesso em: 2018.

VIRTUOUS, T. D. I. Só Biologia. **Só Biologia**, 2008. Disponível em: <https://www.sobiologia.com.br/conteudos/bio_ecologia/ecologia26_1.php>. Acesso em: 20 Maio 2018.

WRC, W. R. C. South African Water Research Commission. **South African Water Research Commission**, 2018. Disponível em: <http://www.wrc.org.za/Lists/Knowledge%20Hub%20Items/Attachments/11606/WRC_Booklet_Interactive.pdf>.

ANEXO

QUADRO 23 – DADOS DE COLETA DO PONTO DE COLETA RGDE02030

| Data de coleta | Clorofila (ug/L) | Fósforo (mg/L) | IET Clorofila | IET Fósforo | IET |
|----------------|------------------|----------------|---------------|-------------|-------|
| 09/04/2015 | 6,95 | 0,09 | 56,24 | 61,73 | 58,98 |
| 14/05/2015 | 1,34 | 0,1 | 48,16 | 62,37 | 55,27 |
| 17/06/2015 | 16,04 | 0,11 | 60,34 | 62,95 | 61,64 |
| 15/07/2015 | 26,73 | 0,07 | 62,84 | 60,21 | 61,53 |
| 13/08/2015 | 39,43 | 0,05 | 64,75 | 58,17 | 61,46 |
| 21/09/2015 | 19,78 | 0,05 | 61,37 | 58,17 | 59,77 |
| 15/10/2015 | 26,73 | 0,06 | 62,84 | 59,27 | 61,06 |
| 18/11/2015 | 8,02 | 0,1 | 56,94 | 62,37 | 59,65 |
| 09/12/2015 | 4,01 | 0,07 | 53,54 | 60,21 | 56,87 |
| 05/01/2016 | 17,82 | 0,1 | 60,86 | 62,37 | 61,61 |
| 11/02/2016 | 60,14 | 0,05 | 66,82 | 58,17 | 62,50 |
| 16/03/2016 | 6,24 | 0,07 | 55,71 | 60,21 | 57,96 |
| 12/04/2016 | 16,98 | 0,05 | 60,62 | 58,17 | 59,39 |
| 17/05/2016 | 42 | 0,08 | 65,06 | 61,02 | 63,04 |
| 16/06/2016 | 0,56 | 0,04 | 43,88 | 56,82 | 50,35 |
| 12/07/2016 | 14,97 | 0,06 | 60,00 | 59,27 | 59,64 |
| 11/08/2016 | 4,28 | 0,08 | 53,86 | 61,02 | 57,44 |
| 27/10/2016 | 7,64 | 0,08 | 56,70 | 61,02 | 58,86 |
| 22/11/2016 | 0,56 | 0,06 | 43,88 | 59,27 | 51,58 |
| 08/12/2016 | 9,09 | 0,04 | 57,55 | 56,82 | 57,19 |
| 19/01/2017 | 8,55 | 0,07 | 57,25 | 60,21 | 58,73 |
| 09/02/2017 | 11,88 | 0,05 | 58,87 | 58,17 | 58,52 |
| 15/03/2017 | 18,27 | 0,07 | 60,98 | 60,21 | 60,59 |
| 05/04/2017 | 15,15 | 0,04 | 60,06 | 56,82 | 58,44 |
| 25/05/2017 | 0,56 | 0,02 | 43,88 | 52,62 | 48,25 |
| 06/06/2017 | 19,25 | 0,04 | 61,23 | 56,82 | 59,03 |
| 11/07/2017 | 12,03 | 0,03 | 58,93 | 55,07 | 57,00 |
| 10/08/2017 | 2,67 | 0,07 | 51,54 | 60,21 | 55,88 |
| 19/09/2017 | 32,08 | 0,09 | 63,74 | 61,73 | 62,73 |
| 26/10/2017 | 7,13 | 0,14 | 56,36 | 64,41 | 60,38 |
| 23/11/2017 | 1,13 | 0,07 | 47,33 | 60,21 | 53,77 |
| 07/12/2017 | 18,33 | 0,06 | 60,99 | 59,27 | 60,13 |

FONTE: Dados fornecidos pela CETESB e adaptado pelos autores

QUADRO 24 – DADOS DE COLETA DO PONTO DE COLETA RGDE02200

| Data de coleta | Clorofila (ug/L) | Fósforo (mg/L) | IET Clorofila | IET Fósforo | IET |
|----------------|------------------|----------------|---------------|-------------|-------|
| 27/01/2011 | 36,89 | 0,05 | 64,42 | 58,17 | 61,30 |
| 26/05/2011 | 19,6 | 0,05 | 61,32 | 58,17 | 59,75 |
| 21/07/2011 | 66,83 | 0,077 | 67,34 | 60,78 | 64,06 |
| 23/11/2011 | 64,15 | 0,018 | 67,14 | 51,98 | 59,56 |
| 12/01/2012 | 18,71 | 0,007 | 61,09 | 46,26 | 53,67 |
| 24/05/2012 | 40,1 | 0,025 | 64,83 | 53,97 | 59,40 |

| | | | | | |
|------------|--------|-------|-------|-------|-------|
| 18/07/2012 | 26,06 | 0,035 | 62,72 | 56,01 | 59,36 |
| 28/11/2012 | 264,63 | 0,2 | 74,09 | 66,57 | 70,33 |
| 03/01/2013 | 45,74 | 0,035 | 65,48 | 56,01 | 60,74 |
| 15/05/2013 | 43,96 | 3,06 | 65,28 | 83,10 | 74,19 |
| 25/07/2013 | 29,78 | 0,05 | 63,37 | 58,17 | 60,77 |
| 21/11/2013 | 21,38 | 0,05 | 61,75 | 58,17 | 59,96 |
| 09/01/2014 | 48,11 | 0,06 | 65,73 | 59,27 | 62,50 |
| 15/05/2014 | 13,75 | 0,03 | 59,58 | 55,07 | 57,33 |
| 31/07/2014 | 24,06 | 0,04 | 62,33 | 56,82 | 59,57 |
| 13/11/2014 | 84,47 | 0,11 | 68,49 | 62,95 | 65,72 |
| 14/01/2015 | 31,01 | 0,07 | 63,57 | 60,21 | 61,89 |
| 09/04/2015 | 42,23 | 0,07 | 65,09 | 60,21 | 62,65 |
| 21/05/2015 | 19,86 | 0,04 | 61,39 | 56,82 | 59,10 |
| 17/06/2015 | 24,73 | 0,05 | 62,46 | 58,17 | 60,32 |
| 02/07/2015 | 18,71 | 0,06 | 61,09 | 59,27 | 60,18 |
| 13/08/2015 | 23,52 | 0,03 | 62,22 | 55,07 | 58,65 |
| 09/09/2015 | 49,45 | 0,1 | 65,86 | 62,37 | 64,12 |
| 15/10/2015 | 40,48 | 0,07 | 64,88 | 60,21 | 62,54 |
| 12/11/2015 | 21,38 | 0,04 | 61,75 | 56,82 | 59,28 |
| 09/12/2015 | 32,61 | 0,06 | 63,82 | 59,27 | 61,55 |
| 13/01/2016 | 25,13 | 0,22 | 62,54 | 67,15 | 64,84 |
| 11/02/2016 | 59,7 | 0,08 | 66,79 | 61,02 | 63,90 |
| 10/03/2016 | 60,81 | 0,06 | 66,88 | 59,27 | 63,07 |
| 12/04/2016 | 29,4 | 0,05 | 63,31 | 58,17 | 60,74 |
| 05/05/2016 | 25,84 | 0,04 | 62,68 | 56,82 | 59,75 |
| 16/06/2016 | 23,17 | 0,04 | 62,14 | 56,82 | 59,48 |
| 06/07/2016 | 116,01 | 0,09 | 70,04 | 61,73 | 65,89 |
| 11/08/2016 | 22,99 | 0,08 | 62,11 | 61,02 | 61,56 |
| 22/09/2016 | 22,91 | 0,05 | 62,09 | 58,17 | 60,13 |
| 27/10/2016 | 70,83 | 0,1 | 67,62 | 62,37 | 65,00 |
| 17/11/2016 | 53,91 | 0,05 | 66,29 | 58,17 | 62,23 |
| 08/12/2016 | 45,98 | 0,07 | 65,51 | 60,21 | 62,86 |
| 12/01/2017 | 56,13 | 0,05 | 66,48 | 58,17 | 62,33 |
| 09/02/2017 | 57,74 | 0,07 | 66,62 | 60,21 | 63,41 |
| 08/03/2017 | 42,1 | 0,06 | 65,07 | 59,27 | 62,17 |
| 05/04/2017 | 46,78 | 0,08 | 65,59 | 61,02 | 63,30 |
| 04/05/2017 | 15,15 | 0,03 | 60,06 | 55,07 | 57,57 |
| 06/06/2017 | 24,95 | 0,07 | 62,51 | 60,21 | 61,36 |
| 05/07/2017 | 40,1 | 0,13 | 64,83 | 63,96 | 64,40 |
| 10/08/2017 | 35,64 | 0,35 | 64,26 | 69,96 | 67,11 |
| 28/09/2017 | 40,99 | 0,09 | 64,94 | 61,73 | 63,34 |
| 26/10/2017 | 52,12 | 0,08 | 66,12 | 61,02 | 63,57 |
| 16/11/2017 | 32,97 | 0,1 | 63,87 | 62,37 | 63,12 |
| 07/12/2017 | 30,07 | 0,05 | 63,42 | 58,17 | 60,80 |

FONTE: Dados fornecidos pela CETESB e adaptado pelos autores

QUADRO 25 – DADOS DE COLETA DO PONTO DE COLETA RGDE02900

| Data de coleta | Clorofila (ug/L) | Fósforo (mg/L) | IET Clorofila | IET Fósforo | IET |
|----------------|------------------|----------------|---------------|-------------|-------|
| 22/01/2008 | 14,26 | 0,04 | 59,76 | 56,82 | 58,29 |
| 26/03/2008 | 22,45 | 0,02 | 61,99 | 52,62 | 57,30 |
| 14/05/2008 | 7,64 | 0,08 | 56,70 | 61,02 | 58,86 |
| 10/07/2008 | 6,49 | 0,04 | 55,90 | 56,82 | 56,36 |
| 18/09/2008 | 17,11 | 0,03 | 60,66 | 55,07 | 57,86 |
| 05/11/2008 | 11,14 | 0,02 | 58,55 | 52,62 | 55,58 |
| 29/01/2009 | 12,92 | 0,03 | 59,28 | 55,07 | 57,18 |
| 26/03/2009 | 22,45 | 0,02 | 61,99 | 52,62 | 57,30 |
| 28/05/2009 | 16,42 | 0,03 | 60,45 | 55,07 | 57,76 |
| 30/07/2009 | 13,54 | 0,08 | 59,51 | 61,02 | 60,26 |
| 16/09/2009 | 18,18 | 0,03 | 60,95 | 55,07 | 58,01 |
| 05/11/2009 | 8,61 | 0,03 | 57,29 | 55,07 | 56,18 |
| 28/01/2010 | 36,35 | 0,03 | 64,35 | 55,07 | 59,71 |
| 17/03/2010 | 27,62 | 0,02 | 63,01 | 52,62 | 57,81 |
| 13/05/2010 | 11,36 | 0,02 | 58,65 | 52,62 | 55,63 |
| 29/07/2010 | 22,96 | 0,07 | 62,10 | 60,21 | 61,15 |
| 22/09/2010 | 11,82 | 0,04 | 58,84 | 56,82 | 57,83 |
| 04/11/2010 | 31,01 | 0,03 | 63,57 | 55,07 | 59,32 |
| 27/01/2011 | 21,38 | 0,03 | 61,75 | 55,07 | 58,41 |
| 26/05/2011 | 22,39 | 0,02 | 61,98 | 52,62 | 57,30 |
| 21/07/2011 | 22,39 | 0,025 | 61,98 | 53,97 | 57,97 |
| 23/11/2011 | 26,73 | 0,014 | 62,84 | 50,46 | 56,65 |
| 12/01/2012 | 69,5 | 0,007 | 67,53 | 46,26 | 56,89 |
| 24/05/2012 | 15,7 | 0,007 | 60,23 | 46,26 | 53,24 |
| 18/07/2012 | 14,13 | 0,007 | 59,72 | 46,26 | 52,99 |
| 28/11/2012 | 6,87 | 0,007 | 56,18 | 46,26 | 51,22 |
| 03/01/2013 | 18,71 | 0,007 | 61,09 | 46,26 | 53,67 |
| 15/05/2013 | 12,6 | 0,08 | 59,16 | 61,02 | 60,09 |
| 25/07/2013 | 19,16 | 0,02 | 61,21 | 52,62 | 56,91 |
| 21/11/2013 | 40,1 | 0,04 | 64,83 | 56,82 | 60,83 |
| 09/01/2014 | 22,45 | 0,05 | 61,99 | 58,17 | 60,08 |
| 15/05/2014 | 15,04 | 0,01 | 60,02 | 48,42 | 54,22 |
| 31/07/2014 | 9,66 | 0,02 | 57,85 | 52,62 | 55,23 |
| 13/11/2014 | 14,7 | 0,1 | 59,91 | 62,37 | 61,14 |
| 14/01/2015 | 21,38 | 0,03 | 61,75 | 55,07 | 58,41 |
| 09/04/2015 | 12,12 | 0,03 | 58,96 | 55,07 | 57,02 |
| 21/05/2015 | 13,37 | 0,04 | 59,45 | 56,82 | 58,13 |
| 17/06/2015 | 10,69 | 0,03 | 58,35 | 55,07 | 56,71 |
| 02/07/2015 | 14,43 | 0,04 | 59,82 | 56,82 | 58,32 |
| 13/08/2015 | 18,78 | 0,01 | 61,11 | 48,42 | 54,76 |
| 09/09/2015 | 13,75 | 0,02 | 59,58 | 52,62 | 56,10 |

| | | | | | |
|------------|-------|------|-------|-------|-------|
| 15/10/2015 | 7,57 | 0,02 | 56,66 | 52,62 | 54,64 |
| 12/11/2015 | 10,02 | 0,03 | 58,03 | 55,07 | 56,55 |
| 09/12/2015 | 11,58 | 0,03 | 58,74 | 55,07 | 56,91 |
| 13/01/2016 | 14,51 | 0,27 | 59,85 | 68,39 | 64,12 |
| 11/02/2016 | 15,5 | 0,01 | 60,17 | 48,42 | 54,29 |
| 10/03/2016 | 13,54 | 0,03 | 59,51 | 55,07 | 57,29 |
| 12/04/2016 | 12,22 | 0,02 | 59,01 | 52,62 | 55,81 |
| 05/05/2016 | 3,1 | 0,02 | 52,28 | 52,62 | 52,45 |
| 16/06/2016 | 6,47 | 0,02 | 55,89 | 52,62 | 54,25 |
| 06/07/2016 | 10,02 | 0,02 | 58,03 | 52,62 | 55,32 |
| 11/08/2016 | 13,37 | 0,02 | 59,45 | 52,62 | 56,03 |
| 22/09/2016 | 16,04 | 0,02 | 60,34 | 52,62 | 56,48 |
| 27/10/2016 | 9,21 | 0,02 | 57,62 | 52,62 | 55,12 |
| 17/11/2016 | 16,8 | 0,02 | 60,57 | 52,62 | 56,59 |
| 08/12/2016 | 18,71 | 0,03 | 61,09 | 55,07 | 58,08 |
| 12/01/2017 | 26,73 | 0,02 | 62,84 | 52,62 | 57,73 |
| 09/02/2017 | 17,64 | 0,02 | 60,81 | 52,62 | 56,71 |
| 08/03/2017 | 28,73 | 0,03 | 63,20 | 55,07 | 59,14 |
| 05/04/2017 | 19,16 | 0,03 | 61,21 | 55,07 | 58,14 |
| 04/05/2017 | 10,1 | 0,01 | 58,07 | 48,42 | 53,24 |
| 06/06/2017 | 7,35 | 0,04 | 56,51 | 56,82 | 56,66 |
| 05/07/2017 | 11,82 | 0,02 | 58,84 | 52,62 | 55,73 |
| 10/08/2017 | 11,14 | 0,03 | 58,55 | 55,07 | 56,81 |
| 28/09/2017 | 19,71 | 0,03 | 61,35 | 55,07 | 58,21 |
| 26/10/2017 | 12,98 | 0,03 | 59,30 | 55,07 | 57,19 |
| 16/11/2017 | 17,11 | 0,04 | 60,66 | 56,82 | 58,74 |
| 07/12/2017 | 23,52 | 0,03 | 62,22 | 55,07 | 58,65 |

FONTE: Dados fornecidos pela CETESB e adaptado pelos autores