



JAINY DE FÁTIMA PEDROSO

**Capacidade de autodepuração em diferentes cenários de
despejo de efluentes no ribeirão da Congonha em
Nepomuceno-MG utilizando o modelo de Streeter-Phelps**

**LAVRAS-MG
2023**

JAINY DE FÁTIMA PEDROSO

Capacidade de autodepuração em diferentes cenários de despejo de efluentes no ribeirão da Congonha em Nepomuceno-MG utilizando o modelo de Streeter-Phelps

Monografia apresentada à Universidade Federal de Lavras, como parte das exigências do Curso de Engenharia Ambiental e Sanitária, para a obtenção do título de Bacharel.

Prof. Dr. Ronaldo Fia
Orientador

Mestranda Thaís Caroline da Cruz
Coorientadora

LAVRAS-MG

2023

JAINY DE FÁTIMA PEDROSO

Capacidade de autodepuração em diferentes cenários de despejo de efluentes no ribeirão da Congonha em Nepomuceno–MG utilizando o modelo de Streeter-Phelps

Monografia apresentada à Universidade Federal de Lavras, como parte das exigências do Curso de Engenharia Ambiental e Sanitária, para a obtenção do título de Bacharel.

APROVADA em 30 de novembro de 2023.

Dr. Ronaldo Fia

UFLA

Mest. Isabelly Leite de Souza

UFLA

Dr^a. Josina Aparecida de Carvalho

ARPA Rio Grande

Prof. Dr. Ronaldo Fia

Orientador

Mestranda Thaís Caroline da Cruz

Coorientadora

LAVRAS-MG

2023

AGRADECIMENTOS

Gostaria de expressar minha gratidão a todos que contribuíram para o desenvolvimento deste trabalho de conclusão de curso. É com imensa alegria que compartilho este momento e reconheço o apoio que recebi ao longo de todo o curso de Engenharia Ambiental e Sanitária.

Em primeiro lugar, agradeço a Deus por ter me dado forças, saúde e discernimento para chegar até aqui. Além disso, agradeço a Ele pela vida dos meus pais, Vitor e Sônia, que me deram todo o apoio, base e sustentação, sempre com muito amor, carinho e compreensão.

Além disso, agradeço aos professores e colegas de curso que forneceram apoio e parceria durante toda a jornada acadêmica, em especial ao meu orientador Ronaldo Fia e minha coorientadora Thaís Caroline. A troca de informações e ensinamentos enriqueceram meu conhecimento e estimularam meu crescimento pessoal e profissional.

Também sou grata aos meus amigos e familiares que estiveram ao meu lado, oferecendo seu apoio e encorajamento durante todo o processo. Suas palavras de incentivo foram essenciais para superar desafios e perseverar na busca dos meus objetivos.

Agradeço a Universidade Federal de Lavras, que proporcionou um ambiente propício para o aprendizado e o desenvolvimento de pesquisas. Sou grata por ter tido a oportunidade de estudar aqui e por todo o conhecimento adquirido ao longo deste percurso.

Por fim, agradeço a ARPA Rio Grande pela oportunidade de estágio, onde pude me desenvolver e evoluir profissionalmente. Além disso, agradeço pela disponibilização dos documentos que auxiliaram na elaboração deste trabalho.

Este trabalho de conclusão de curso é o resultado de uma colaboração coletiva e do apoio generoso de muitas pessoas. Agradeço sinceramente a todos aqueles que, direta ou indiretamente, contribuíram para a realização deste projeto. Vocês foram fundamentais para o meu sucesso.

Muito obrigada a todos!

“Believe you can and you’re halfway there!” (Theodore Roosevelt)

RESUMO

O lançamento de efluentes é um dos principais agentes causadores de poluição dos corpos hídricos brasileiros, pois muitas das vezes a carga lançada é superior a capacidade autodepurativa do rio. No Brasil, o órgão responsável por instituir os padrões de lançamento de efluentes em corpos hídricos é o Conselho Nacional de Meio Ambiente – CONAMA e em Minas Gerais quem estabelece os padrões de qualidade do corpo hídrico é a Deliberação Normativa Conjunta COPAM/CERH nº8/2022. Com o intuito de averiguar a capacidade de autodepuração do Ribeirão da Congonha em Nepomuceno/MG, utilizou-se o modelo de Streeter-Phelps, utilizando o software Excel, tomando como referência as variáveis oxigênio dissolvido (OD) e demanda bioquímica de oxigênio (DBO). Todo o trabalho foi realizado tendo como base pesquisas bibliográficas, visita em campo, resultados de amostragens de qualidade de água do ribeirão e simulações computacionais. Para todos os cenários de estudo, o ribeirão da Congonha mostrou-se capaz de degradar a matéria orgânica, tendo a concentração de DBO reduzida ao longo do seu trecho, conseguindo assim atingir valores dentro dos estipulados pela Deliberação Normativa Conjunta COPAM/CERH nº8/2022. Em relação a concentração de OD, em todas as simulações, após o despejo do efluente, o ribeirão não conseguiu retornar ao valor mínimo de 6,0 mg L⁻¹ estipulado pela Deliberação Normativa supracitada para classe 1. O estudo mostrou que o ribeirão da Congonha não possui características e porte suficientes para receber efluentes brutos e/ou tratados em sistemas de baixa eficiência, a eficiência mínima para manter os padrões vitais do corpo hídrico, tratando todo o efluente, é de 95%.

Palavras-chave: Qualidade de água, Modelagem ambiental, Poluição hídrica, OD, DBO.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1: Zonas de autodepuração de um corpo hídrico	14
Figura 2: Localização do município de Nepomuceno/MG	20
Figura 3: Localização dos corpos hídricos que cortam Nepomuceno/MG	21
Figura 4: Estação de tratamento de esgotos da sede do município de Nepomuceno/MG	23
Figura 5: Caixa receptora de esgoto e fosso da bomba de sucção da estação elevatória final de esgotos.....	24
Figura 6: Pontos de coleta de amostra de água no Ribeirão da Congonha à jusante da ETE de Nepomuceno/MG.....	26
Figura 7: Córrego da estiva antes e depois de receber o lançamento de efluentes sem tratamento.....	30
Figura 8: Variação da concentração de DBO e de OD no Ribeirão da Congonha, no atual cenário, após receber efluente tratado no ribeirão.....	32
Figura 9: Variação da concentração de DBO e de OD no Ribeirão da Congonha, em um cenário hipotético, com 100% do efluente no ribeirão.....	34
Figura 10: Variação da concentração de DBO e de OD no Ribeirão da Congonha, em um cenário hipotético sem tratamento e com disposição final total do no ribeirão da Congonha.	35

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Valores dos parâmetros de DBO e OD a montante do lançamento de efluentes no Ribeirão da Congonha.	25
Tabela 2: Valores do parâmetro de DBO na saída da ETE de Nepomuceno/MG.....	26
Tabela 3: Valores de temperatura no Ribeirão da Congonha em Nepomuceno/MG....	27
Tabela 4: Coeficiente de desoxigenação para diferentes tipos de efluentes.....	28
Tabela 5: Coeficiente de rearação para diferentes tipos de corpos d'água.....	28
Tabela 6: Parâmetros de entrada para simulação do processo de autodepuração no ribeirão da Congonha em diferentes cenários de tratamento de esgoto no município de Nepomuceno/MG.	29

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	10
2	OBJETIVOS.....	11
3	REFERENCIAL TEÓRICO.....	12
3.1	Poluição hídrica.....	12
3.2	Autodepuração.....	13
3.3	Legislação Ambiental de lançamento de efluentes sanitários.....	16
3.4	Modelo de Streeter-Phelps.....	17
4	MATERIAL E MÉTODOS.....	19
4.1	Área de estudo.....	19
4.2	Sistema de abastecimento de água e esgoto.....	21
4.3	Pesquisa Metodológica.....	23
4.4	Reconhecimento da área de estudo.....	23
4.5	Dados para o estudo de autodepuração.....	24
4.5.1	Vazões e Velocidade.....	24
4.5.2	Matéria orgânica e Oxigênio dissolvido (DBO, OD e Cs).....	25
4.5.3	Coefficientes de desoxigenação e reaeração.....	27
4.5.4	Simulações dos cenários de despejos de efluentes.....	29
5	RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	30
5.1	Caracterização dos impactos no ribeirão da Congonha.....	30
5.2	Avaliação da autodepuração para os diferentes cenários.....	31
6	CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	37
7	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	38

1 INTRODUÇÃO

O Brasil ainda carece da implantação de sistemas de esgotamento sanitário que abranjam toda a população. De acordo com a Pesquisa Nacional de Saneamento Básico (PNSB), cerca de 39,7% dos municípios brasileiros não são contemplados com nenhum tipo de serviço de esgotamento sanitário e apenas 60,3% (3206 municípios) possuem rede coletora de esgoto doméstico (IBGE, 2017). A PNSB também traz que “49,5% dos municípios que possuem rede coletora realizam a disposição dos efluentes domésticos sem tratamento” (IBGE, 2017, p.67), esse cenário demonstra a necessidade de políticas públicas voltadas para a área de saneamento básico no Brasil, com o intuito de preservar a saúde humana e a qualidade dos recursos hídricos.

A qualidade da água nos corpos hídricos pode ser influenciada por fatores naturais, pelo tipo de uso e ocupação do solo, mas principalmente pelas atividades antrópicas (SOUZA NETO, 2021). A demanda pelo uso da água cresce de forma proporcional ao aumento populacional, já que à medida que a população cresce o consumo de água para usos essenciais também aumenta, e por consequência, a geração de efluentes domésticos segue o mesmo padrão de crescimento.

O Brasil possui regulamentações para as condições e padrões de lançamento de efluentes, como por exemplo a Resolução CONAMA n° 430 de maio de 2011, que estabelece os parâmetros necessários para o monitoramento e controle da qualidade dos efluentes que estão sendo lançados, com o intuito de garantir a qualidade da água e consequentemente cuidar do meio ambiente e proteger a saúde pública (BRASIL, 2011). Além disso, a Deliberação Normativa Copam n° 96, que convocou os municípios de Minas Gerais a realizarem o licenciamento ambiental referente ao sistema de esgotamento sanitário, colocando que até março de 2017 os municípios acima de 20.000 habitantes deveriam regularizar os sistemas de tratamento de esgoto (MINAS GERAIS, 2006).

Apesar da legislação do estado de Minas Gerais estabelecer sobre a regularização dos sistemas de esgotamento sanitário, o Painel ICMS Ecológico de Esgotamento Sanitário mostrou que até 2020 apenas 49,65% possuíam sistema de tratamento de esgoto (MINAS GERAIS, 2020). Em Nepomuceno/MG, toda a cidade conta com rede de coleta de esgoto e apesar de existir uma estação de tratamento de esgotos (ETE), apenas 31,8% do que é coletado é conduzido ao tratamento. O esgoto não tratado é lançado sem tratamento no Córrego da Estiva, afluente do ribeirão da Congonha (AGÊNCIA REGIONAL DE PROTEÇÃO AMBIENTAL DA BACIA DO RIO GRANDE - ARPA

RIO GRANDE, 2022). Esse lançamento de esgotos sem tratamento, pode influenciar na capacidade que um corpo hídrico tem de reestabelecer suas características naturais após o lançamento *in natura* de efluentes com alta carga orgânica (CORRÊA; ARAÚJO, 2015).

Todo corpo hídrico tem a capacidade de restabelecer suas características, até certo limite, de forma natural por processos físicos, químicos e biológicos (VON SPERLING, 2014), esse processo é chamado de capacidade de autodepuração. A autodepuração ocorre naturalmente e consiste na recuperação de um corpo d'água poluído por matéria orgânica biodegradável (BRAGA, 2010). Cada corpo d'água possui sua própria capacidade autodepurativa e a realização de estudos pontuais faz-se necessária para conhecer a quantidade e a qualidade de efluentes que cada rio é capaz de receber, de forma que suas características naturais não sejam prejudicadas (VON SPERLING, 2007).

Portanto, compreender o processo de autodepuração de um corpo d'água é extremamente importante para avaliar a capacidade do meio ambiente em receber os efluentes lançados, podendo assim evitar que o despejo de esgoto doméstico, naquela localidade, ocorra acima da capacidade de recuperação hídrica. Nesse contexto, os estudos de modelagem da qualidade da água, com representação computacional por modelos matemáticos, se tornam métodos eficientes de avaliar e medir os impactos causados por esses lançamentos (SOUZA NETO, 2021). Segundo Von Sperling (2014), o modelo matemático de Streeter-Phelps é a base para vários modelos avançados utilizados atualmente. Além de ter uma base conceitual simples, esse modelo requer menos dados e parâmetros de entrada.

Assim, dada a importância de entender o processo de autodepuração dos cursos d'água e a intensidade dos impactos gerados pelos lançamentos de esgotos sem tratamento nos mananciais, o ribeirão da Congonha, principal corpo d'água que percorre as proximidades da zona urbana de Nepomuceno-MG, e seu afluente, Córrego da Estiva, foram escolhidos como objetos de estudo neste presente trabalho.

2 OBJETIVOS

O objetivo desse trabalho foi aplicar o modelo matemático de Streeter-Phelps para estudar a capacidade de autodepuração e compreender como o Ribeirão da Congonha na cidade de Nepomuceno- MG se comporta com diferentes cenários de despejo de efluentes, utilizando como base a variável DBO e OD.

Os objetivos específicos foram:

- Avaliar a qualidade da água do ribeirão da Congonha;
- Estudar regulações sobre despejo no ribeirão da Congonha;
- Obter a capacidade de autodepuração do ribeirão da Congonha para diferentes cenários de despejo de esgotos;
- Simular diferentes cenários de despejos de efluentes para avaliação dos impactos ambientais gerados no ribeirão da Congonha.

3 REFERENCIAL TEÓRICO

3.1 Poluição hídrica

O uso dos recursos hídricos pela população, tem o intuito de suprir as necessidades básicas de sobrevivência, tal como o consumo residencial, produção agrícola, produção industrial e o comércio. O volume populacional e a disponibilidade dos recursos naturais marcam a relação entre os indivíduos e o meio ambiente (DO CARMO, 2014).

Com a atual expansão demográfica, cada vez mais a população demanda pelo uso da água, e por consequência há um aumento no descarte de esgoto (ANDRADE et al, 2019). O esgoto, que também pode ser chamado de efluente, é um termo usado para águas que perderam suas características naturais, ou seja, aquelas que foram de alguma forma alteradas, elas podem ser compostas por água de uso doméstico, excretas dos seres humanos, água dos comércios e também das indústrias (MELLO; OLIVO, 2016).

Um crescimento demográfico sem planejamento urbano pode acarretar inúmeros problemas para a população e para o meio ambiente. Quando não há, por exemplo, uma infraestrutura urbana dos serviços de saneamento básico os corpos hídricos ficam susceptíveis a contaminação e poluição (ANDRADE et al., 2019).

Os danos provocados pelo descarte de efluentes, apesar de estarem relacionados com grandes concentrações de poluentes e fontes pontuais de emissão, provocam distúrbios no meio aquático e podem ser observados mesmo em pequenas concentrações, afetando o equilíbrio ambiental (ANDRADE et al., 2019).

Os corpos d'água possuem processos naturais de diluição e dispersão dos poluentes e contaminantes, que são facilitados pelo movimento ativo desses corpos hídricos e funcionam como mecanismos de defesa, contudo, o lançamento de forma contínua de efluentes ricos em carga poluidora podem influenciar no processo de autodepuração, que consiste na capacidade que o rio possui de se reestabelecer após uma

intervenção, o que causa enormes prejuízos na qualidade da água (SILVA; SOUZA, 2013).

3.2 Autodepuração

A autodepuração de um ambiente aquático pode ser entendida como um fenômeno de sucessão ecológica, que tem como objetivo o restabelecimento do equilíbrio no meio aquático, ou seja, o processo tenta trazer o corpo hídrico ao estágio inicial antes do lançamento de efluentes, através de mecanismos essencialmente naturais (MATOS et al, 2011; VON SPERLING, 1996).

A autodepuração ocorre devido a associação de vários processos de naturais físicos, químicos e biológicos (PAIXÃO, 2021). No processo físico podemos encontrar a diluição, sedimentação e reaeração atmosférica, no processo químico e biológica podemos observar a oxidação e a decomposição de matéria orgânica (nitrificação e demanda bentônica) (HYNES, 1960; VON SPERLING, 1996; VON SPERLING, 2014).

Segundo Von Sperling (2014), as áreas de autodepuração são subdivididas em: zona de degradação, zona de decomposição ativa, zona de recuperação e zona de águas limpas. A zona de águas limpas fica localizada à montante do lançamento do efluente (caso não haja poluição anterior) e após a zona de recuperação. Ela é definida por elevada concentração de oxigênio dissolvido - OD e abundância de vida aquática. A zona de degradação se localiza à jusante do ponto de lançamento de efluentes e tem como principais características a depleção da concentração de OD e conta com a presença de alguns organismos com maior resistência. Já a zona de decomposição ativa, dentre as demais regiões, é aquela que atinge a menor concentração de oxigênio dissolvido e a predominância da vida aquática se dá por bactérias e fungos, os chamados microrganismos anaeróbicos). Por fim, a zona de recuperação, que é área onde se inicia o processo de restauração do equilíbrio prévio à poluição, nela a vida aquática superior começa novamente a se restabelecer (BRAGA, 2002).

O processo de fotossíntese geralmente ocorre em corpos hídricos de movimento lento. É o processo utilizado pelos organismos autotróficos para consumir a matéria orgânica. Os seres autótrofos realizam mais síntese do que oxidação, o que gera um superávit de oxigênio (VON SPERLING, 2008).

A oxidação trata-se de um processo químico em que elétrons são removidos de um corpo ou substância (PASQUALINI, 2010). A nitrificação é o processo pelo qual os microrganismos autotróficos utilizam o oxigênio dissolvido na água para transformar as formas nitrogenadas de matéria orgânica em nitritos (NO_2^-) e nitratos (NO_3^-) (DUTRA, 2021).

De acordo com Von Sperling (1996), a demanda bentônica ocorre quando a matéria orgânica decantada consome oxigênio dissolvido. Parte da conversão da matéria orgânica nesse processo ocorre em condições anaeróbias, já que a matéria orgânica decantada se torna lodo e o oxigênio tem dificuldade de penetrá-lo. Como essa conversão ocorre de forma anaeróbia, não há consumo de oxigênio, entretanto, a camada do lodo que entra em contato com a água sofre decomposição aeróbia e resulta assim no consumo de oxigênio (VON SPERLING, 1996).

O despejo de matéria orgânica em um corpo hídrico causa um aumento no consumo de oxigênio dissolvido - OD, em consequência da digestão dessa matéria pelas bactérias decompositoras e aeróbias (VON SPERLING, 2014). Quando há o lançamento de efluente em um rio, os microrganismos aeróbicos degradam de forma rápida a matéria orgânica, já os organismos anaeróbios são menos eficientes nessa degradação (LIMA, 2011). Desse modo, a forma como ocorre a degradação da matéria orgânica pode ser totalmente aeróbia, se o oxigênio do processo não acabar, ou aeróbia e anaeróbia após o fim do oxigênio. Quando há uma queda brusca de OD pode ocorrer uma insuficiência de oxigênio (hipóxia) e causar uma redução na biodiversidade aquática (LIMA, 2011).

Para Von Sperling (2005), a Demanda Bioquímica de Oxigênio – DBO, descreve a quantidade de oxigênio necessária para estabilizar a matéria orgânica carbonácea. De uma maneira simplificada, a DBO pode ser descrita como a quantidade de oxigênio consumida em um efluente pelos organismos nele presentes, desse modo, quanto maior a DBO, mais matéria orgânica há no efluente ou no corpo hídrico. Para os estudos de autodepuração, os valores de DBO são extremamente importantes (VON SPERLING, 2014).

3.3 Legislação Ambiental de lançamento de efluentes sanitários

A Resolução CONAMA n° 430/2011 estabelece os padrões e condições de lançamento de efluentes em corpos hídricos brasileiros. Nessa resolução são estabelecidos os parâmetros necessários para o monitoramento e controle da qualidade dos efluentes que estão sendo lançados, com o intuito de garantir a qualidade da água e consequentemente cuidar do meio ambiente e proteger a saúde pública (BRASIL, 2011)

A CONAMA n° 430 define também os limites máximos para a concentração de substâncias biológicas e químicas que estão presentes nos efluentes, estabelecendo assim condições específicas para cada tipo de lançamento em diferentes usos do corpo hídrico, como por exemplo em rios destinados ao abastecimento público, pesca, lazer, entre outros (BRASIL, 2011)

De acordo com o artigo 3° da Resolução CONAMA n° 430: “Os efluentes de qualquer fonte poluidora somente poderão ser lançados diretamente nos corpos receptores após o devido tratamento e desde que obedeçam às condições, padrões e exigências dispostos nesta Resolução e em outras normas aplicáveis”.

Ainda de acordo com a Resolução supracitada, em seu artigo 21°, para o lançamento direto de efluentes oriundos de sistemas de tratamento de esgotos sanitários deverão ser obedecidas as seguintes condições em relação a DBO

...”Demanda Bioquímica de Oxigênio-DBO 5 dias, 20°C: máximo de 120 mg/L, sendo que este limite somente poderá ser ultrapassado no caso de efluente de sistema de tratamento com eficiência de remoção mínima de 60% de DBO, ou mediante estudo de autodepuração do corpo hídrico que comprove atendimento às metas do enquadramento do corpo receptor (BRASIL, 2011)”.

Em Minas Gerais, as Deliberações Normativas Conjuntas COPAM/CERH n°8/2022, estabelece padrões de enquadramento para águas superficiais classe 1, classe essa onde está enquadrado o corpo hídrico objeto de estudo (MINAS GERAIS, 2022). No artigo 15 da deliberação normativa, são estabelecidos os seguintes parâmetros de qualidade:

*...”DBO₅ dias a 20°C (grau Celsius): até 3 mg/L (miligrama por Litro) O₂;
OD, em qualquer amostra: não inferior a 6 mg/L (miligrama por Litro) O₂” (MINAS GERAIS, 2022).*

Além disso, a DN COPAM/CERH n°8/2022 também estabelece em seu Artigo 36 – “Para o lançamento direto de efluentes oriundos de sistemas de tratamento de esgotos sanitários”, para o parâmetro de DBO, deverão ser obedecidas as seguintes condições e padrões específicos, desde que não comprometa os usos previstos para o corpo de água:

... ”DBO 5 dias a 20°C (grau Celsius): até 60 mg/L(miligramas por Litro) ou tratamento com eficiência de redução de DBO 5 dias a 20°C (grau Celsius) em no mínimo 60% (por cento) e média anual igual ou superior a 70% (por cento) para sistemas de esgotos sanitários” (BRASIL, 2022).

Essas legislações, ajudam a identificar os padrões que necessitam ser melhorados ou ajustados em um sistema de tratamento de esgotos e auxiliam no monitoramento da qualidade dos corpos hídricos, que são fundamentais para as atividades antrópicas.

3.4 Modelo de Streeter-Phelps

O modelo matemático de Streeter-Phelps foi criado em 1925 com o intuito de estudar a autodepuração do Rio Ohio, com o intuito de tornar mais eficiente as ações de controle da poluição (STREETER; PHELPS, 1925). Esse modelo é um clássico no estudo de qualidade das águas e tem por objetivo avaliar a DBO e o OD ao longo do eixo longitudinal do corpo hídrico. O modelo se tornou um marco na história dos estudos de qualidade hídrica e com o passar do tempo auxiliou na criação de novos modelos mais complexos, no entanto, manteve-se o conceito do clássico modelo original (VON SPERLING, 2005).

De maneira genérica o modelo de Streeter-Phelps é composto por duas equações diferenciais ordinárias, onde uma é responsável por modelar a oxidação da matéria orgânica em sua parte biodegradável e a outra, modela o fluxo de oxigênio oriundo da reaeração atmosférica. O nome dado para essas equações são: equação de demanda bioquímica de oxigênio e equação de reaeração (BEZERRA et al., 2008).

Para o modelo Streeter-Phelps, é considerado que a taxa de desoxigenação (dL/dt) da matéria orgânica no meio aquático é proporcional à concentração da matéria orgânica em um determinado instante de tempo (ANDRADE, 2010). A equação (1) desse processo também, conhecido como cinética do déficit (BEZERRA et al., 2008), é dada por:

$$\frac{dl}{dt} = -K_1 L \quad (1)$$

A variável L representa a DBO remanescente ao final de tempo (t) e K_1 é a constante de desoxigenação e t é o tempo, em dias. O K_1 na literatura também pode é chamado também de coeficiente de decomposição (K_d).

A partir da integração da equação (1), entre L e L_0 , obtém-se;

$$L = L_0 e^{-K_1 t} \quad (2)$$

Onde a L_0 é a DBO no ponto inicial de mistura do efluente e o corpo receptor, em mg L^{-1} .

A concentração de oxigênio em um determinado tempo é dada pela diferença entre a concentração de saturação (C_s) e o déficit de oxigênio dissolvido naquele tempo $D(t)$ (ANDRADE, 2010). Desse modo, pode-se escrever a concentração de oxigênio como sendo:

$$C(t) = C_s - D(t) \quad (3)$$

No que se diz respeito ao consumo de oxigênio, a quantificação da DBO exercida é de extrema importância e pode ser obtida pela equação abaixo:

$$y = L_0 (1 - e^{-K_1 t}) \quad (4)$$

A variável y é a DBO exercida em um tempo t (mg L^{-1}).

A conceituação da DBO pode ser representada pela DBO remanescente e pela ou pela DBO exercida. A DBO remanescente significa a concentração de matéria orgânica remanescente na massa líquida em um dado instante. A DBO exercida é o oxigênio consumido para estabilizar a matéria orgânica até determinado instante (VON SPERLING, 2005).

O consumo de oxigênio dissolvido em meio aquoso ocorre juntamente com a reação de reoxigenação, nesse processo o oxigênio passa da atmosfera para o corpo hídrico (ANDRADE, 2010). A equação que modela esse processo é:

$$\frac{dl}{dt} = -K_2 D \quad (5)$$

Com isso, o déficit de saturação do oxigênio dissolvido é o resultado da soma dos efeitos de desoxigenação e reaeração, obtendo assim a seguinte equação diferencial:

$$\frac{dl}{dt} = K_1L - K_2D \quad (6)$$

A variável D é o déficit de oxigênio, e representa a diferença entre a concentração de saturação do oxigênio no meio líquido e a concentração de oxigênio dissolvido na água em um dado instante, e K_2 é a constante de reoxigenação do corpo d'água (ANDRADE, 2010). A partir da resolução da integral da Equação 6, tem-se:

$$D_t = \frac{K_1L_2}{K_2 - K_1} (e^{K_1t} - e^{K_2t}) + D_0e^{-K_2t} \quad (7)$$

em que:

D_t é o déficit de saturação de oxigênio no tempo t, em mg L⁻¹;

D_0 é o déficit inicial de oxigênio dissolvido no curso de água, em mg L⁻¹;

L_0 é a DBO no ponto de lançamento.

A concentração de oxigênio no tempo C(t) se dá pela diferença entre a concentração de saturação (C_s) e o déficit de oxigênio dissolvido num tempo D(t):

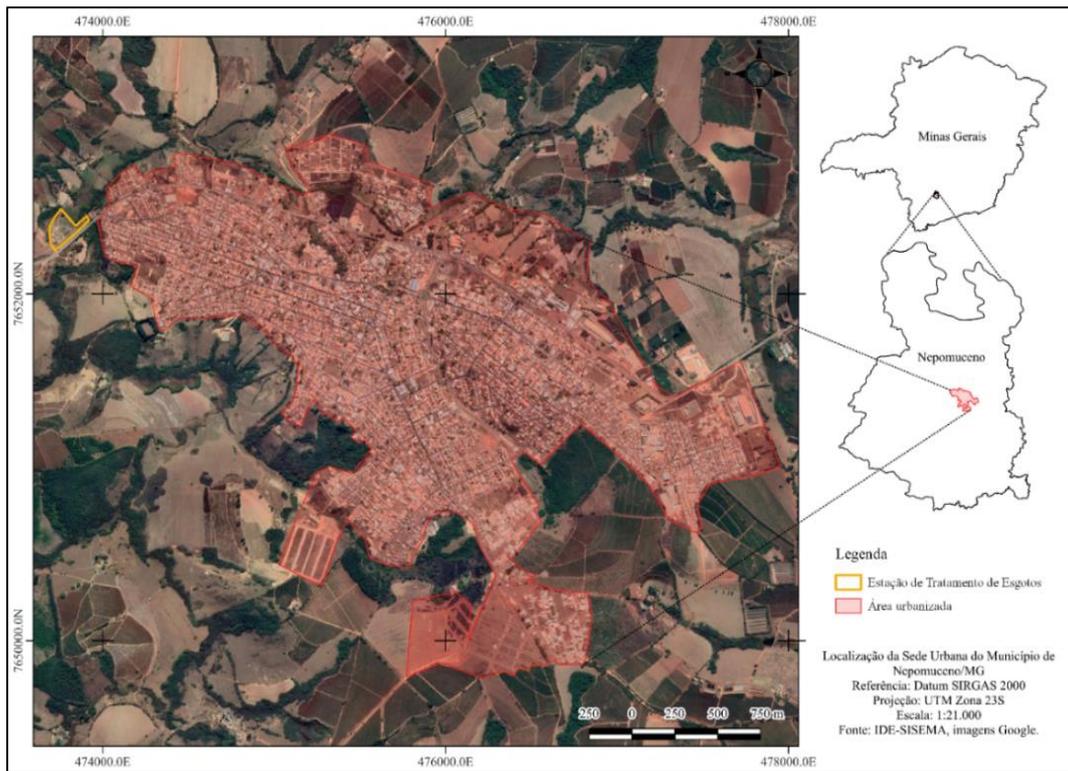
$$C_t = C_s - \left\{ \frac{K_1L_2}{K_2 - K_1} (e^{-K_1t} - e^{-K_2t}) + (C_s - C_0)e^{-K_2t} \right\} \quad (8)$$

4 MATERIAL E MÉTODOS

4.1 Área de estudo

O município de Nepomuceno, área de estudo deste trabalho, situa-se na região sul do Estado de Minas Gerais e está localizado entre as coordenadas de latitude 21°2'23" S e 21°22'48" S, e de longitude 45°24'14" O e 45°8'23" O, e apresenta uma altitude média de 843 m (CARVALHO et al., 2019).

Figura 2: Localização do município de Nepomuceno no estado de Minas Gerais.

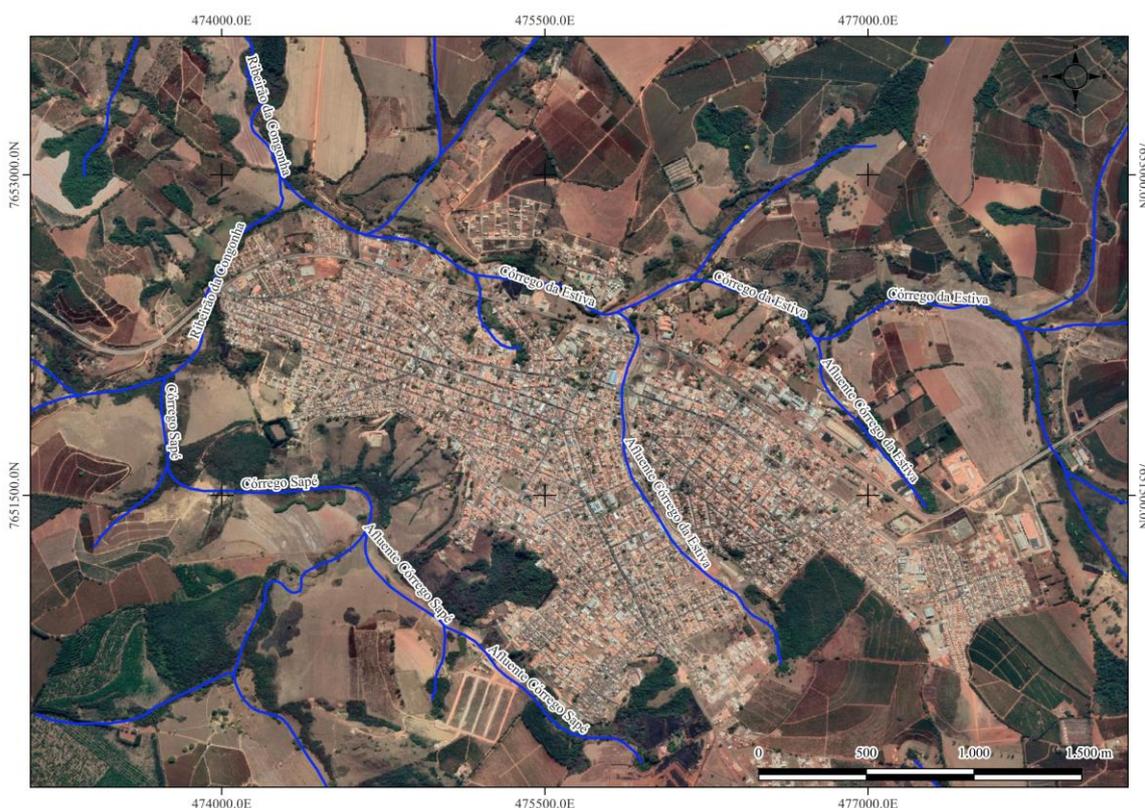


Fonte: Adaptado do Google Earth Pro (2022).

A localização do município situa-se na área de abrangência do bioma da Mata Atlântica e do cerrado, detendo uma área territorial de 582.553 km² (IBGE, 2021). A população estimada pelo IBGE no município para o ano de 2022 é de 25.018 habitantes e as principais atividades econômicas desenvolvidas na localidade são a avicultura e a cafeicultura, sendo esta responsável por 70% da economia do município (NEPOMUCENO, 2017).

O município de estudo é integrante da Bacia Hidrográfica do Rio Grande, sendo denominada como Vertentes do Rio Grande GD2. O Ribeirão da Congonha é um importante curso d'água para o município e recebe a drenagem da área urbana pelo Córrego da Estiva ao norte e ao sul pelo córrego Sapé (IDE SISEMA, 2021). O Córrego da estiva, atravessa cerca de 2 km ao longo da área urbana até desaguar no Ribeirão da Congonha (Figura 3). Segundo a Agência Nacional das Águas – ANA, o Ribeirão da Congonha possui 25,93% de sua extensão dentro do município de Nepomuceno/MG. A bacia hidrográfica do Córrego Sapé, localizada ao Sul do município, possui área de 4,965 km² (CARVALHO et al., 2019).

Figura 3: Localização dos corpos hídricos que cortam a cidade de Nepomuceno/MG.



Fonte: Google Earth Pro (2022).

O clima na área que abriga a Bacia hidrográfica do Córrego Sapé é categorizado como Cwb, caracterizando-se por um clima úmido com verões amenos, propenso a períodos prolongados de estiagem e, ocasionalmente, invernos rigorosos, conforme a classificação de Köppen. A média anual de temperatura atinge 18,9°C, com índice pluviométrico anual médio de 1.630 mm e índice médio de umidade relativa anual de 76%. A fase mais quente estende-se de setembro a março, enquanto as temperaturas mínimas são registradas de abril a agosto. O período chuvoso abrange os meses de outubro a março, deixando o período seco de abril a setembro. Em resumo, a região experimenta verões úmidos e invernos secos (CARVALHO et al., 2019).

4.2 Sistema de abastecimento de água e esgoto

De acordo com o Plano Municipal de Saneamento Básico – PMSB de Nepomuceno, o sistema de abastecimento de água da sede do município possui 8287 ligações ativas que contemplam 100% dos habitantes. O sistema de abastecimento de água é composto por uma captação realizada no ribeirão Sapé, por meio de barragem de nível em concreto; o tratamento é realizado em uma estação de tratamento de água - ETA

do tipo convencional, composta por flocculadores, decantadores e filtros de areia de escoamento descendente; o sistema de reserva de água é constituído por oito reservatórios com capacidade total de 2.895 m³. O sistema de captação tem capacidade de succionar até 130 L s⁻¹ e a ETA possui uma capacidade de tratamento de 100 L s⁻¹.

Os corpos hídricos utilizados para abastecer a sede do município são os mananciais Sapé e Bela Vista, as bacias dos dois mananciais a montante do ponto de captação totalizam uma área de 84,01 km². Ainda de acordo com o PMSB, a captação no Córrego Sapé é feita em um barramento de concreto com 42 m de comprimento e 3 m de altura, com um vertedor retangular de 14,8 m de comprimento, sendo que a tomada de água é realizada diretamente. O ponto de captação está localizado nas coordenadas S 21°15'36,5" e W 45°14'39,2" na altitude de 827 m (NEPOMUCENO, 2019).

O esgotamento sanitário em Nepomuceno/MG abrange toda a malha urbana, com aproximadamente 100 mil metros de rede. Todo o esgoto sanitário produzido na sede do município é coletado, contudo, apenas uma parcela aproximada de 30% recebe o devido tratamento (NEPOMUCENO, 2019).

A ETE municipal foi projetada para atender a população da sede do município de Nepomuceno até 2030, e está localizada nas coordenadas S 21°13'50.1" e W 45°15'12.1". Entretanto, até o momento apenas uma parte do que está no projeto municipal foi construída. O projeto contempla 4 módulos de tratamento, que propõe o atendimento a 100% da população até 2030, no entanto apenas 1 módulo foi construído e está em operação atualmente (NEPOMUCENO, 2019).

De acordo com o Serviço Autônomo de Água e Esgoto - SAAE de Nepomuceno, companhia responsável pelo esgotamento sanitário do município, e conforme relatado durante vistoria técnica da ARPA Rio Grande, a ETE de Nepomuceno tem capacidade de tratar uma vazão de 9,64 L s⁻¹ de efluentes domésticos. O sistema é composto por tratamento preliminar com gradeamento, desarenador seguido de medidor de vazão tipo calha parshall, e tratamento secundário, com um reator UASB seguido de um filtro biológico e um decantador (Figura 4). O lodo gerado pela ETE, durante o tratamento de esgoto, é encaminhado para o leito de secagem e posteriormente enviado para aterro sanitário externo.

Figura 4: Estação de tratamento de esgotos da sede do município de Nepomuceno/MG.



Fonte: ARPA Rio Grande (2022).

4.3 Pesquisa Metodológica

O estudo em questão foi elaborado com base os critérios estabelecidos pela legislação ambiental vigente, bem como documentos referentes ao sistema de esgotamento sanitário do município de Nepomuceno/MG, disponibilizados pela ARPA Rio Grande, incluindo os dados oriundos de vistorias in loco, documentos de coleta e análise laboratorial da qualidade da água do ribeirão da Congonha cedidos pela municipalidade e imagens de satélite da região.

4.4 Reconhecimento da área de estudo

Em 22 de agosto de 2022, a equipe técnica da ARPA Rio Grande realizou uma vistoria em Nepomuceno/MG com o intuito verificar o sistema de esgotamento sanitário municipal. A vistoria foi iniciada realizando-se um caminhamento próximo aos corpos hídricos que circundam a área urbana, com o objetivo de verificar se haviam pontos de lançamento de efluentes sem tratamento nos cursos d'água e atestar a regularidade e qualidade dos serviços de coleta de esgotos.

O sistema de coleta de esgotos não possui estações elevatórias de esgotos intermediárias, apenas uma elevatória final (EEF) que faz o bombeamento para a ETE, esta elevatória está localizada às margens do córrego da Estiva, pouco antes deste desaguar no ribeirão da Congonha. Até esse local, todo o esgoto coletado pela rede é recebido por gravidade.

Antes do efluente ser bombeado para tratamento na EEF, existe uma caixa construída em alvenaria para armazená-lo temporariamente (Figura 5), no local há

separação do esgoto por meio de bombeamento, cerca de 30% do esgoto é encaminhado para tratamento, e o excedente é lançado no córrego da Estiva (Figura 7).

Figura 5: Caixa receptora de esgoto e fosso da bomba de sucção da estação elevatória final de esgotos.



Fonte: ARPA Rio Grande (2022).

Cabe ressaltar que o montante de esgoto produzido pela população pode variar devido a sazonalidades, porém a ETE suporta uma vazão máxima de $9,64 \text{ L s}^{-1}$, o que implica em aproximadamente 30% do esgoto gerado em condições normais no município.

4.5 Dados para o estudo de autodepuração

4.5.1 Vazões e Velocidade

A vazão do ribeirão da Congonha foi obtida no Atlas de Esgotos da Agência Nacional das Águas (2017), obtendo-se uma vazão de referência (Q_{ref}) igual a $901,8 \text{ L s}^{-1}$ ($0,9018 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$). A vazão do efluente doméstico que chega até a ETE, no cenário atual, foi obtida por meio dos documentos cedidos pelo SAAE de Nepomuceno para a ARPA Rio Grande, com valor aferido de $0,00974 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$.

No córrego da Estiva a vazão foi obtida no Atlas de Esgotos da Agência Nacional das Águas (2017), obtendo-se uma vazão de referência (Q_{ref}) igual a $159,2 \text{ L s}^{-1}$ ($0,1592 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$).

Para encontrar a vazão média total ($Q_{d\text{ méd}}$) do esgoto no município foi considerada a população (Pop) urbana de 25.018 habitantes (IBGE, 2022) e um consumo per capita de água (qpc) de $155,40 \text{ L hab}^{-1} \text{ d}^{-1}$ (SNIS, 2020), e coeficiente de retorno (R) igual a 0,8 (VON SPERLING, 2014).

$$Q_{méd} = \frac{qpc \times Pop \times R}{1000} \quad (9)$$

A velocidade da água no ribeirão da Congonha foi medida com molinete hidrométrico, obtendo um valor de $0,09 \text{ m s}^{-1}$.

A distância considerada no estudo da autodepuração do ribeirão da Congonha foi de 40.000 m, valor aproximado da extensão do corpo hídrico até desaguar no Rio Grande.

4.5.2 Matéria orgânica e Oxigênio dissolvido (DBO, OD e Cs)

Os dados de DBO e OD do ribeirão da Congonha, para simulação de autodepuração nas condições atuais, foram obtidos pela média dos valores encontrados no monitoramento trimestral da qualidade da água realizado pelo SAAE (Tabela 1), por meio de análises do laboratório Qualin Análises Ambientais (acreditado pela Coordenação Geral de Acreditação do Inmetro – Instituto Nacional de Metrologia, Qualidade e Tecnologia, de acordo com a ABNT NBR ISO/IEC 17025) de janeiro de 2021 a junho de 2022. A coleta foi realizada a montante, a cerca de 100 m do ponto de lançamento da ETE no ribeirão da Congonha, sob as coordenadas ($21^{\circ}13'45,78''\text{S}$ $45^{\circ}15'05,10''\text{W}$) – Figura 6 (ARPA, 2022).

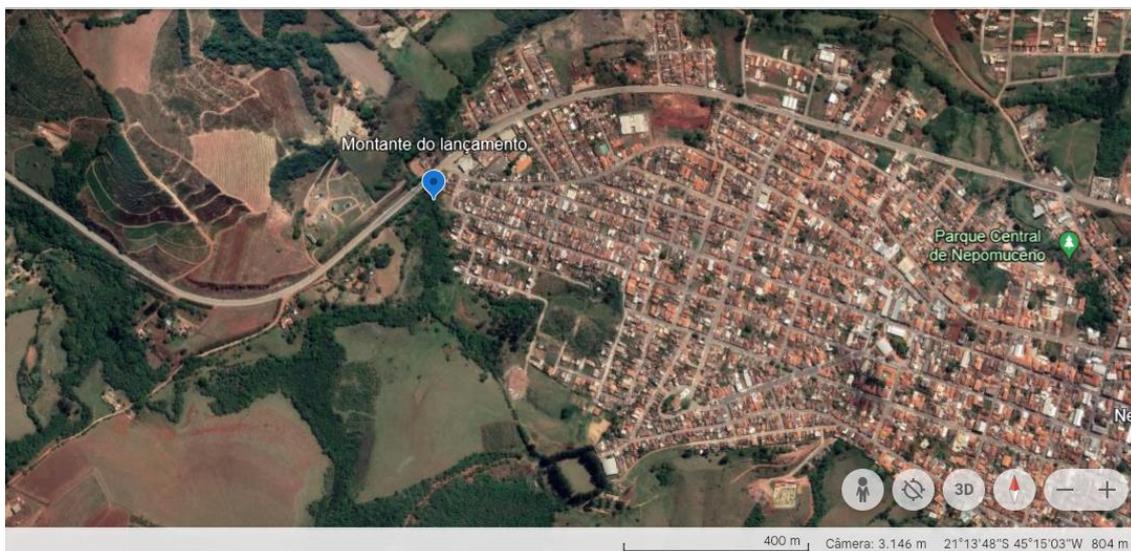
Tabela 1: Valores dos parâmetros de DBO e OD a montante do lançamento de efluentes no Ribeirão da Congonha.

Variáveis	Coleta 1	Coleta 2	Coleta 3	Coleta 4	Coleta 5	Média
DBO (mg L^{-1})	2,8	2,0	4,2	2,0	2,0	2,6
OD (mg L^{-1})	6,8	6,8	6,6	6,9	6,2	6,7

Data de realização das coletas – Coleta 1 - 13/01/2021; Coleta 2 – 28/04/2021; Coleta 3 – 25/10/2021; Coleta 4 – 14/04/2022 e Coleta 5 – 23/06/2022.

Fonte: Adaptado de Relatório Técnico SAAE (NEPOMUCENO, 2022).

Figura 6: Ponto de coleta de amostra de água no ribeirão da Congonha à montante da ETE de Nepomuceno/MG.



Fonte: Adaptado Google Earth (2023).

A DBO de saída da ETE segue os mesmos padrões de análises do corpo hídrico e a média desses valores está definida na Tabela 2.

Tabela 2: Valores de DBO no esgoto efluente da ETE de Nepomuceno/MG.

Variável	Coleta 1	Coleta 2	Coleta 3	Coleta 4	Coleta 5	Média
DBO (mg L ⁻¹)	175,6	45,7	241,9	220,0	100,0	156,6

Data de realização das coletas – Coleta 1 - 13/01/2021; Coleta 2 – 28/04/2021; Coleta 3 – 25/10/2021; Coleta 4 – 14/04/2022 e Coleta 5 – 23/06/2022.

Fonte: Adaptado de Relatório Técnico SAAE (NEPOMUCENO, 2022).

Para o cálculo da concentração de Saturação de OD (Cs), foi utilizado o valor médio de temperatura obtida durante o primeiro trimestre de monitoramento no município (Tabela 3).

Tabela 3: Valores de temperatura da água do ribeirão da Congonha em Nepomuceno/MG.

Variável	Coleta 1	Coleta 2	Coleta 3	Média
Temperatura (°C)	26,8	26,3	25,2	26,1

Data de realização das coletas – Coleta 1 - 13/01/2021; Coleta 2 – 28/04/2021; Coleta 3 – 25/10/2021.

Fonte: Adaptado de Relatório Técnico SAAE (NEPOMUCENO, 2022).

De acordo com Scariot (2008), o cálculo da concentração de saturação de oxigênio dissolvido no meio líquido por ser realizado pela Equação 10.

$$C_s = 14,652 - 0,41022T + 0,00799T^2 - 0,000077774T^3 \quad (10)$$

em que:

C_s : Concentração de saturação (mg L^{-1});

T : Temperatura ($^{\circ}\text{C}$).

Para o cenário onde é inexistente o tratamento do efluente, foi considerado a concentração típica de DBO (C_{DBO}) para esgoto doméstico igual a 300 mg L^{-1} , conforme Von Sperling (2014).

Para o cenário onde 100% do esgoto é tratado, foi considerada uma eficiência mínima da ETE de 60%, conforme estabelece a Resolução CONAMA n° 430/2011 e a DN COPAM/CERH n°8/2022, para o lançamento direto de efluentes oriundos de sistemas de tratamento de esgotos sanitários. Com isso, para calcular a DBO de saída da ETE, foi utilizada a Equação 11.

$$C_{\text{DBO final}} = C_{\text{DBO inicial}} \times \left(1 - \frac{\text{Eficiência}}{100}\right) \quad (11)$$

em que:

$C_{\text{DBO final}}$ = concentração final de DBO após tratamento (mg L^{-1});

$C_{\text{DBO inicial}}$ = concentração de DBO antes do tratamento (mg L^{-1}).

4.5.3 Coeficientes de desoxigenação e reaeração

De acordo Von Sperling (2014), os coeficientes utilizados nas simulações podem ser obtidos por meio da Tabela 4.

Tabela 4: Coeficiente de desoxigenação para diferentes tipos de efluentes.

Tipos de águas residuárias	K_1 (d^{-1})
Esgoto bruto concentrado	0,35 - 0,45
Esgoto bruto de baixa concentração	0,30 - 0,40
Efluente primário	0,30 - 0,40
Efluente secundário	0,12 - 0,24
Curso d'água com águas limpas	0,08 - 0,20

Fonte: Von Sperling (2014).

O coeficiente de reaeração (K_2), de acordo com Von Sperling (2014), pode ser obtido por meio da Tabela 5.

Tabela 5: Coeficiente de reaeração para diferentes tipos de corpos d'água.

Corpo d'água	K_2 (d^{-1})	
	Profundo	Raso
Pequenos lagos	0,12	0,23
Rios Vagarosos, Grandes Lagos	0,23	0,37
Grandes rios com baixa velocidade	0,37	0,46
Grandes rios com velocidade normal	0,46	0,69
Rios rápidos	0,69	1,15
Corredeiras e quedas d'águas	1,15	1,61

Fonte: Von Sperling (2014).

Para K_1 (Tabela 4) foi considerado o valor referente ao efluente proveniente de tratamento secundário, abrangendo assim o cenário atual e o cenário de 100% do efluente tratado. O K_1 para o efluente sem nenhum tratamento, foi considerado o valor tabelado (Tabela 4) para esgoto bruto concentrado.

O K_2 (Tabela 5) foi considerado o valor para rios vagarosos ($0,37 \text{ dia}^{-1}$) para todos os cenários.

A Tabela 6 indica os parâmetros de entrada utilizados na planilha do Excel para estudo do processo de autodepuração do ribeirão da Congonha nos diferentes cenários de tratamento de efluentes da ETE do município de Nepomuceno/MG.

Tabela 6: Parâmetros de entrada para simulação do processo de autodepuração no ribeirão da Congonha em diferentes cenários de tratamento de esgoto no município de Nepomuceno/MG.

Parâmetros	Ribeirão da Congonha	Córrego da Estiva	Cenário Atual	Tratamento total	Sem tratamento
DBO (mg L ⁻¹)	2,6	3	177	120	300
Vazão (m ³ s ⁻¹)	0,9018	0,1592	0,0096	0,036	0,036
OD (mg L ⁻¹)	6,6	6	0	0	0
Velocidade (m s ⁻¹)	0,09	-	-	-	-
Temperatura (°C)	26,1	26,1	26,1	26,1	26,1
Cs (mg L ⁻¹)	8,0	-	8,0	8,0	8,0
K ₁ (s ⁻¹)	-	-	2,78E-06	2,78E-06	5,20E-06
K ₂ (s ⁻¹)	-	-	4,28E-06	4,28E-06	4,28E-06

Fonte: Da Autora (2023).

4.5.4 Simulações dos cenários de despejos de efluentes

O software escolhido para realizar as simulações dos cenários foi o Microsoft Excel.

Criou-se planilhas para os diferentes cenários de lançamento de efluentes (Cenário atual; Cenário com 100% do efluente tratado; Cenário com zero tratamento de efluentes com todo o lançamento sendo realizado no ribeirão da Congonha), onde foram informados os dados necessários para a realização dos cálculos (utilizando as equações descritas de 1 a 8, e equação 10) e geração dos gráficos. Sendo as informações:

- Q_r e Q_e = Vazões do rio e do efluente;
- L_r e L_e = DBO última do rio e do efluente;
- CO_{2r} e CO_{2e} = Concentrações de oxigênio dissolvido do rio e do efluente;
- A_r = Área de seção transversal do rio;
- K₁ e K₂ = Coeficientes de desoxigenação e reaeração;
- CS = Concentração de saturação de oxigênio dissolvido no rio.

Nas planilhas, inicialmente foi necessário realizar o cálculo de mistura do efluente com o corpo hídrico para obter a concentração de DBO e de OD, para isso foi utilizada a equação (12):

$$C_{\text{mistura}} = \frac{Q_{\text{rio}} \times C_{\text{rio}} + Q_{\text{esgoto}} \times C_{\text{esgoto}}}{Q_{\text{rio}} + Q_{\text{esgoto}}} \quad (12)$$

Onde:

C_{mistura} = Concentração da mistura (OD ou DBO);

Q_{rio} = Vazão do rio;

C_{rio} = concentração de DBO ou OD no rio;

Q_{esgoto} = Vazão do esgoto;

C_{esgoto} = Concentração de DBO ou OD.

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1 Caracterização dos impactos no ribeirão da Congonha

Após o lançamento da parte do efluente não tratado no córrego da Estiva, há um grande impacto que pode ser visualizado no córrego, em que se nota a aparência séptica, sinalizando elevado aporte de matéria orgânica (Figura 7).

Figura 7: Córrego da estiva antes e depois de receber o lançamento de efluentes sem tratamento.



Fonte: ARPA Rio Grande (2022).

Ainda, na Tabela 2, nota-se que a ETE não atende ao padrão primário de lançamento de DBO em cursos d'água no estado de Minas Gerais, que é de 60 mg L⁻¹ (MINAS GERAIS, 2022). Apenas em uma das amostragens o valor foi inferior ao limite estabelecido.

As duas situações anteriormente descritas, lançamento sem tratamento e esgoto

parcialmente tratado resulta degradação ambiental do córrego da Estiva e do ribeirão da Congonha que apresenta características aplicáveis as águas doces superficiais enquadradas na classe 1 (Tabela 1), DBO inferior a 3 mg L^{-1} e OD superior a 6 mg L^{-1} (MINAS GERAIS, 2022).

Os impactos causados pelo lançamento de esgotos em cursos d'água de menor porte, como os objetos de estudo do presente trabalho são observados frequentemente. Fia et al. (2015) e Menezes et al. (2016) verificaram situação semelhante para o Ribeirão Vermelho em Lavras-MG. Em que, logo após a nascente, e percorrida pequena distância no centro urbano, já havia degradação da qualidade da água pelo descarte pontual de esgoto sem tratamento. Conforme verificado no presente trabalho, cursos d'água de pequena vazão não apresentam condições adequadas para degradação dos efluentes orgânicos lançados pelas cidades, de forma a manter a qualidade da água à montante do despejo.

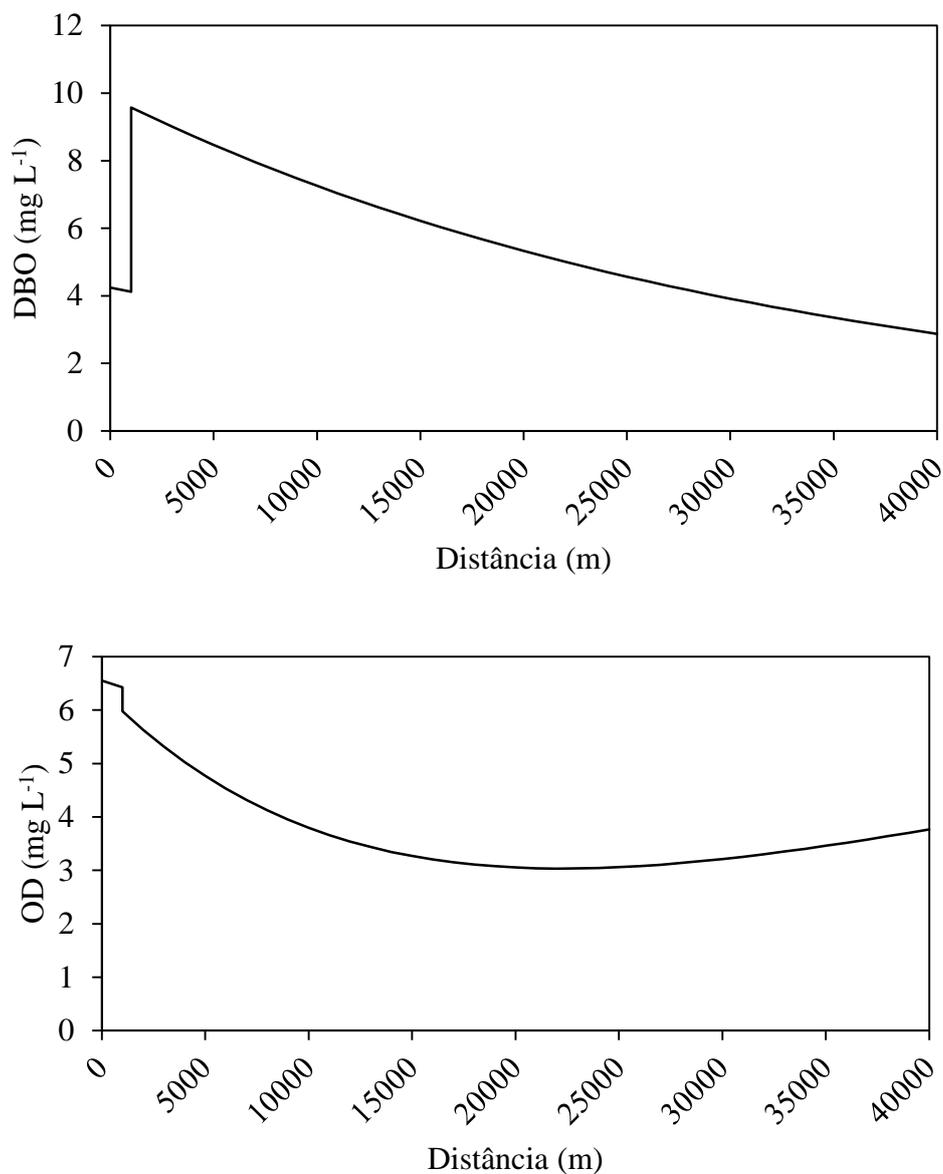
5.2 Avaliação da autodepuração para os diferentes cenários

Inicialmente, foi realizada a simulação para o atual cenário de tratamento no município de Nepomuceno/MG, conforme dados da Tabela 6. Na Figura 8 é possível observar que após o lançamento da ETE (0 m), a concentração de DBO no ribeirão da Congonha está acima de 4 mg L^{-1} . No início do trecho observa-se uma leve queda na concentração da DBO, porém, em aproximadamente 1 km há um aumento abrupto, chegando a uma concentração de aproximadamente 10 mg L^{-1} . Esse ponto coincide com o deságue do córrego da Estiva no ribeirão da Congonha. Após a mistura dos dois corpos hídricos até o quilômetro 39, o ribeirão da Congonha apresenta concentrações de DBO acima do padrão estabelecido pela Deliberação Normativa Conjunta COPAM/CERH n°8/2022 para águas de classe 1, que é de $3,0 \text{ mg L}^{-1}$.

A concentração de OD (Figura 8), após o lançamento do efluente tratado, vai decaindo e há uma redução brusca no ponto igual a 1 km, devido ao deságue do córrego da Estiva no ribeirão da Congonha. Após este ponto (1 km), toda a extensão do curso d'água permanece com concentrações baixas de OD, infringindo os parâmetros determinados pela legislação de Minas Gerais (COPAM/CERH n°1/2022) para rios classe 1, onde o valor ideal de OD seria superior a $6,0 \text{ mg L}^{-1}$.

Ao fim do trecho de estudo a concentração de DBO é de $2,9 \text{ mg L}^{-1}$ e a concentração de OD igual a $3,77 \text{ mg L}^{-1}$.

Figura 8: Variação da concentração de DBO e de OD no ribeirão da Congonha, no atual cenário, após receber o efluente no ribeirão.



Fonte: Da Autora (2023).

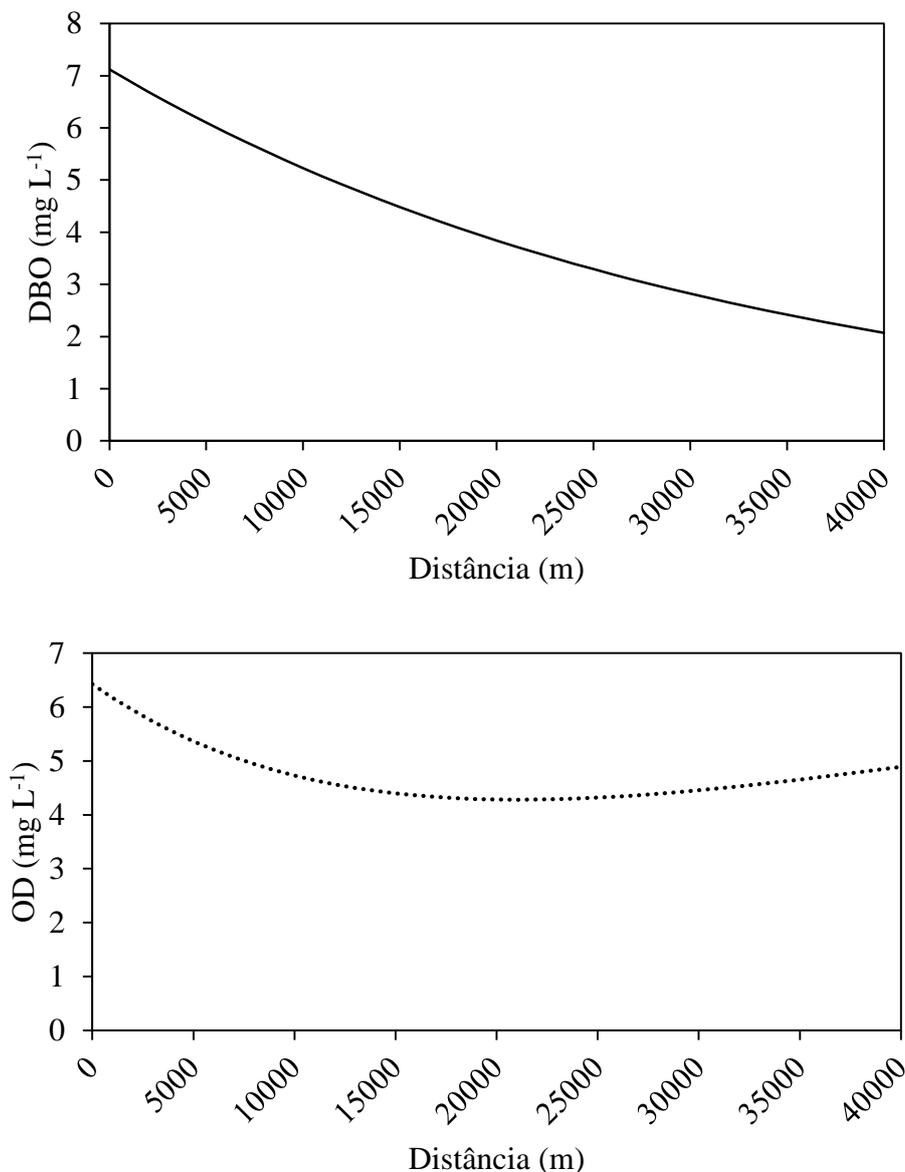
Considerando um cenário hipotético, no qual a vazão total média do efluente ($0,036 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$) é tratado e posteriormente lançado no Ribeirão da Congonha, observa-se que a DBO (Figura 9) no ponto de lançamento apresenta uma concentração próxima de $7,0 \text{ mg L}^{-1}$, estando acima do valor estabelecido pela Deliberação Normativa Conjunta COPAM/CERH n°1/2022 que é de no máximo 3 mg L^{-1} . Contudo, por volta de 28 km

após o lançamento, a concentração de DBO já se encontra abaixo 3 mg L^{-1} , o que indica que os microrganismos aeróbicos degradaram a matéria orgânica.

Neste cenário, a concentração de OD começa a cair desde o ponto de lançamento (Figura 9), devido à maior contribuição orgânica, e próximo a 2 km após o lançamento alcança valor inferior a $6,0 \text{ mg L}^{-1}$, limite estabelecido pela COPAM/CERH nº1/2022 para águas de classe 1. Nota-se ainda, que na medida em que a concentração de DBO diminui a de OD também diminui, indicando que a atividade dos microrganismos conduziu a decomposição da matéria orgânica, porém com o consumo do oxigênio disponível no corpo hídrico. A DBO consegue atingir um valor aceitável após 28 km de trecho e o OD mesmo apresentando alta após 28 km não conseguiu atingir o valor mínimo de $6,0 \text{ mg L}^{-1}$.

Ao fim do trecho de estudo a concentração de DBO é de $2,07 \text{ mg L}^{-1}$ e a concentração de OD igual a $4,89 \text{ mg L}^{-1}$.

Figura 9: Variação da concentração de DBO e de OD no ribeirão da Congonha, em um cenário hipotético com 100% do efluente tratado no ribeirão.



Fonte: Da Autora (2023).

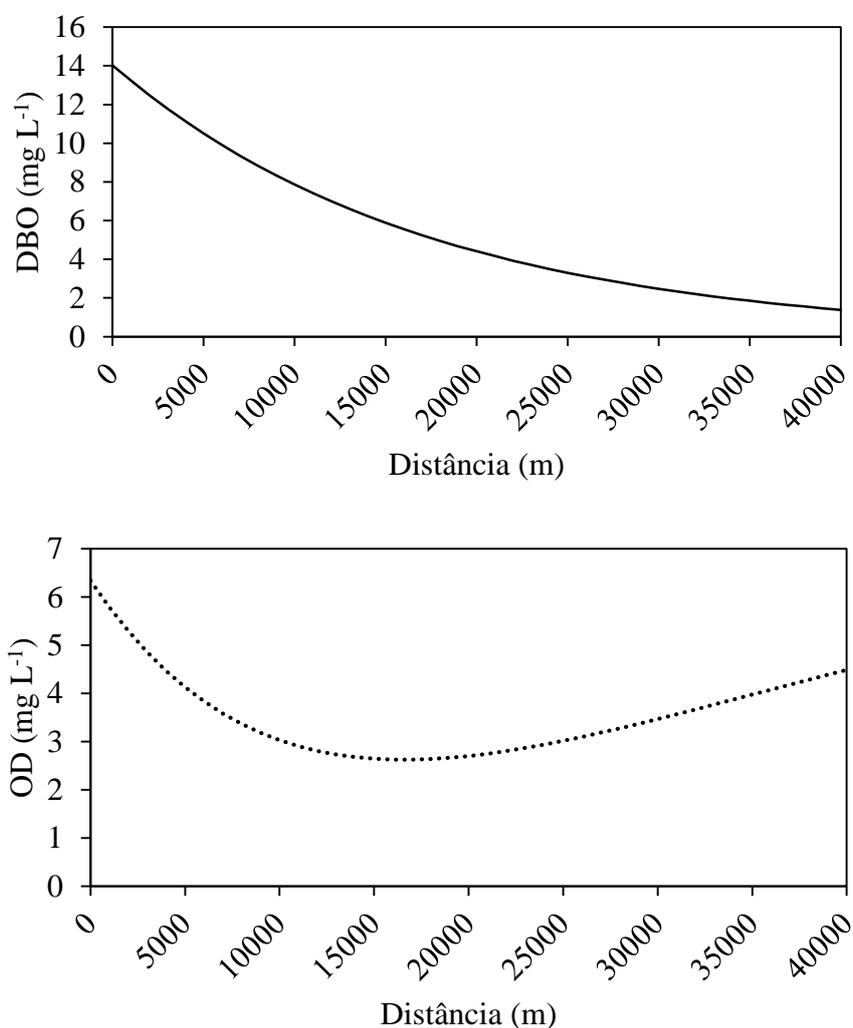
O último cenário hipotético, leva em consideração que todo o efluente gerado no município de Nepomuceno/MG estivesse sendo despejado, por completo e sem tratamento no Ribeirão da Congonha. Em relação a concentração de DBO, observa-se na Figura 10, que sua concentração do ponto de lançamento até 26 km está acima de 3 mg L⁻¹, ou seja, acima do estipulado pela legislação de Minas Gerais para águas classe 1.

Para o oxigênio dissolvido, nota-se para este cenário, que logo após a 1 km do ponto inicial a concentração de OD chega em 6 mg L⁻¹ e continua decaindo até

aproximadamente 18 km, após esse ponto há um aumento na concentração, porém não é suficiente para alcançar o valor mínimo estabelecido na legislação. Ou seja, apesar da degradação da matéria orgânica, a extensão do curso d'água não é suficiente para ele se autodepurar e obter concentrações de OD superiores a $6,0 \text{ mg L}^{-1}$.

Ao fim do trecho de estudo a concentração de DBO é de $1,39 \text{ mg L}^{-1}$ e a concentração de OD igual a $4,49 \text{ mg L}^{-1}$.

Figura 10: Variação da concentração de DBO e de OD no ribeirão da Congonha, em um cenário hipotético sem tratamento e com disposição final total no ribeirão da Congonha.



Fonte: Da Autora (2023).

As simulações obtiveram cenários de autodepuração com resultados próximos, mesmo em diferentes condições de lançamento de efluentes. Em todos os casos, em algum

ponto do ribeirão da Congonha, ocorreu a degradação da matéria orgânica de forma suficiente para que a concentração de DBO atingisse valor inferior a $3,0 \text{ mg L}^{-1}$, conforme estabelece a Deliberação Normativa Conjunta COPAM/CERH n°8/2022.

O sistema de tratamento de esgotos presente no município de Nepomuceno precisa ser ampliado, já que atende apenas cerca de 30% do montante de efluente gerado na municipalidade (ARPA Rio Grande, 2022). Para o atual cenário, o sistema de tratamento mostrou-se ineficiente, já que o percentual de efluentes tratados não é suficiente para manter a qualidade do corpo hídrico.

O tratamento total do efluente seria o cenário ideal, contudo a ETE com eficiência mínima de 60%, valor estabelecido pela Resolução CONAMA 430 de 2011 e pela Deliberação Normativa Conjunta COPAM/CERH n°8/2022, não se mostrou adequada para o parâmetro de OD no corpo hídrico. Estes resultados vão ao encontro dos estudos de autodepuração com cenários para diferentes eficiências de tratamento realizados por Dutra, Fia e Ribeiro (2022). Os autores verificaram para o Rio Paraibuna em Juiz de Fora/MG que a eficiência do tratamento deveria alcançar 90%, e todo o esgoto deveria ser coletado e tratado, para que as condições do curso d'água fossem mantidas como classe 2.

Para averiguar qual a concentração máxima de DBO que pode ser lançada no ribeirão da Congonha para que o OD se mantenha acima de 6 mg L^{-1} , foi utilizado um teste de hipótese no Excel, no qual obteve-se um resultado de $14,9 \text{ mg L}^{-1}$. Utilizando a Equação 11, a eficiência necessária encontrada para atingir esse valor de DBO de lançamento foi de 95%.

A questão abordada em Nepomuceno é realidade na maioria das cidades da Bacia do Alto Rio Grande, o que evidencia a fragilidade dos nossos recursos hídricos e poucas perspectivas de melhoria em muitas cidades. Gomides et al. (2023), ao avaliarem diferentes cenários para o tratamento de esgotos em diferentes cidades da Bacia do Alto Rio Grande concluíram que as ações propostas no marco legal do saneamento (BRASIL 2020), que, apesar de preverem a obrigatoriedade de 90% da coleta e tratamento de esgoto para todos os municípios, não são suficientes para garantir o cumprimento do marco, mesmo com elevadas eficiências de remoção nas ETEs, algumas acima de 99%.

6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O estudo dos corpos hídricos, principalmente no que se diz respeito a capacidade autodepurativa, possibilita visualizar e planejar os sistemas de esgotamento sanitário nos municípios. Além disso, possibilita verificar se os sistemas já atuantes são compatíveis com os padrões determinados pelas legislações vigentes.

Conforme observado nos resultados deste estudo, atualmente o despejo de efluentes no município tem causado um desequilíbrio nas concentrações de OD do ribeirão da Congonha, ficando este com valores abaixo do permitido pela legislação estadual e possibilitando um quadro de degradação do corpo hídrico. Os demais cenários também apresentaram resultados de concentração de OD abaixo do estabelecido pela legislação, o que já era esperado para o cenário onde se considerou um percentual de zero tratamento, abaixo do cenário atual. Contudo, a previsão para 100% de tratamento, com eficiência do sistema de 60% (mínimo estabelecido pela DN COPAM/CERH n°8/2022) também demonstrou ineficiente para manter o OD acima de 6 mg L^{-1} .

Para o tratamento de efluentes em Nepomuceno/MG, deve-se atentar para os diferentes cenários de despejo de efluentes sanitários e a capacidade autodepurativa do corpo hídrico, sendo essencial para um bom planejamento e execução dos sistemas de tratamento sanitários. De acordo com o presente estudo, a eficiência mínima da ETE para manter os padrões de qualidade do córrego da Estiva deverá ser de 95%.

Ademais, o Ribeirão da Congonha não apresenta porte e características hidráulicas para receber os efluentes *in natura* da cidade de Nepomuceno, tão pouco para receber efluentes tratados em sistemas com baixas eficiências. Os resultados obtidos também mostram que há a necessidade de políticas públicas mais eficientes para que os municípios se adequem aos padrões de lançamento estabelecidos pelas legislações e normas, mantendo a qualidade dos recursos hídricos para a população.

7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AGÊNCIA REGIONAL DE PROTEÇÃO A BACIA DO RIO GRANDE – ARPA Rio Grande. **Banco de dados:** Nepomuceno/MG. Lavras-MG. 2022.

ANA, Agência Nacional de Água. Atlas Esgotos: **Despoluição de Bacias Hidrográficas**. Brasília, DF: ANA, 2017. Disponível em http://arquivos.ana.gov.br/imprensa/publicacoes/ATLASESGOTOSDespoluicaoodeBaciasHidrograficas-ResumoExecutivo_livro.pdf. Acesso em 27 out. 2023.

ANDRADE, Leonardo Capeleto de et al. Lago Guaíba: uma análise histórico-cultural da poluição hídrica em Porto Alegre, RS, Brasil. **Engenharia Sanitária e Ambiental**, v. 24, p. 229-237, 2019.

ANDRADE, Larice Nogueira de. Autodepuração dos corpos d'água. **Revista da Biologia**, v. 5, p. 16-19, 2010.

BENEDETTI, Edmundo. Água - Fonte da vida - Considerações. **Veterinária Notícias**, Uberlândia, v. 18, n. 1, p. 1-5, 2013.

BEZERRA, Iury Steiner de Oliveira; MENDONÇA, Luiz Alberto Ribeiro; FRISCHKORN, Horst. Autodepuração de cursos d'água: um programa de modelagem Streeter Phelps com calibração automática e correção de anaerobiose. **Rem: Revista Escola de Minas**, v. 61, p. 249-255, 2008.

BRAGA, Benedito et al. **Introdução à engenharia ambiental: O desafio do desenvolvimento sustentável**. 2. ed. São Paulo, SP: Pearson Prentice Hall, 2010.

BRASIL. Agência Nacional de Água (ANA). **Sistema Nacional de Informação sobre Recursos Hídricos (SNIRH)**. 2020. Disponível em: <http://www.snirh.gov.br/>. Acesso em: 10 nov. 2023.

BRASIL. Ministério do Desenvolvimento Regional. Secretaria Nacional de Saneamento Ambiental. **Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento - SNIS: diagnóstico dos serviços de água e esgotos - 2019**. Brasília, DF, 2020.

BRASIL. Ministério do Meio Ambiente, Secretaria de Recursos Hídricos e Ambiente Urbano, 2009. Plano Nacional de Recursos Hídricos (PNRH). **Institui a Política Nacional de Recursos Hídricos, cria o Sistema Nacional de Gerenciamento de Recursos Hídricos, regulamenta o inciso XIX do art. 21 da Constituição Federal, e altera o art. 1º da Lei nº 8.001, de 13 de março de 1990, que modificou a Lei nº 7.990, de 28 de dezembro de 1989**. Brasil, 1997.

BRASIL. Deliberação Normativa Conjunta nº 96, de 12 de abril de 2006. **Convoca municípios para o licenciamento ambiental de sistema de tratamento de esgotos e dá outras providências**. Minas gerais, 2006.

BRASIL. Deliberação Normativa Conjunta COPAM/CERH-MG nº 08, de novembro de 2022. **Dispõe sobre a classificação dos corpos de água e diretrizes ambientais para o**

seu enquadramento, bem como estabelece as condições e padrões de lançamento de efluentes, e dá outras providências. Minas Gerais, 2022.

BRASIL. Lei nº 14.026, de 15 de julho de 2020. Atualiza o marco legal do saneamento básico e dá outras providências. **Diário Oficial da União 2020**; 16 jul.

BRASIL. Conselho Nacional do Meio Ambiente. Resolução CONAMA nº 430, de 13 de maio de 2011. **Dispõe sobre as condições e padrões de lançamento de efluentes, complementa e altera a Resolução nº 357, de 17 de março de 2005, do Conselho Nacional do Meio Ambiente.** Brasília, 2011.

BRASIL. **Política Nacional de Meio Ambiente**, lei Federal 6.938/81, 1981.

BRASIL. Lei nº 14.026, de 15 de julho de 2020. **Atualiza o marco legal do saneamento básico e dá outras providências.** Diário Oficial da União, Brasília, DF, 16 jul. 2020.

CALMON, Ana Paula Santos et al. **Uso combinado de curvas de permanência de qualidade e modelagem da autodepuração como ferramenta para suporte ao processo de enquadramento de cursos d'água superficiais.** RBRH, v. 21, p. 118-133, 2016.

CARVALHO, Ronan Naves et al. Balanço hídrico climatológico para o município de Nepomuceno-mg. **Revista Augustus**, v. 24, n. 49, p. 74-87, 2019.

CORRÊA, T. S; de ARAÚJO, R. R. Estudo de autodepuração: o caso do córrego do Limoeiro, Presidente Prudente-SP. **Colloquium Exactarum**, v.7, n.5, p. 48-55, 2015.

DUTRA, Wander Clay Pereira; FIA, Ronaldo; DE MELO RIBEIRO, Celso Bandeira. Water quality modeling in the Paraibuna River in Juiz de Fora/MG: diagnosis and prognosis. **Brazilian Journal of Environmental Sciences (RBCIAMB)**, v. 57, n. 2, p. 256-267, 2022.

FIA, Ronaldo et al. Qualidade da água de um ecossistema lótico urbano. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 20, n. 1, p. 267-275, 2015.

FREIRE, Letícia Lacerda; DA COSTA SANTOS, Yannice Tatiane. ESTIMATIVA DAS CONTRIBUIÇÕES DE CARGA ORGÂNICA DOMÉSTICA E IMPACTOS AMBIENTAIS DAS LIGAÇÕES INADIMPLENTES DE ESGOTO EM JUAZEIRO DO NORTE-CEARÁ. **Ciência e Sustentabilidade**, v. 4, n. 2, p. 5-24, 2018.

GOMIDES, Clécio Eustáquio et al. Modelagem determinística e probabilística da qualidade microbiológica utilizando o QUAL-UFGM: uma ferramenta de gestão de recursos hídricos aplicada nas águas das encostas do Rio Grande, Brasil. **Ciência e Tecnologia da Água**, v. 87, n. 8, p. 2020-2042, 2023.

JORDÃO, E., P.; PESSÔA, C., A. **Tratamento de esgotos domésticos.** 7. ed. Rio de Janeiro: ABES, 2014.

MAFRA, A. C. O. **Produção de ácido glucônico e xarope de frutose a partir de sacarose catalisada por enzimas em reator airlift.** 2013. Dissertação de Mestrado.

Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química da Universidade Federal de São Carlos. São Carlos, 2013.

MARGULIS, Sérgio et al. **Meio ambiente: aspectos técnicos e econômicos**. 1990.

MATOS, A. T.; ALMEIDA, T. V.; DA SILVA, D. D.; PINTO FARAGE, J. A. (2011). Coeficiente de reaeração em três trechos do Rio Pomba (MG), obtidos nos períodos chuvosos e seco. **Revista Engenharia na Agricultura**, Viçosa - MG, v. 19, n. 4, p. 01-09, 2011.

MELLO, F. de A.; OLIVO, A. de M. Recursos hídricos: poluição, escassez, qualidade microbiológica e química da água. In: **Colloquium Vitae**. p. 36-42.

MORAES GUEDES, Duwylho; CUBA TERAN, Francisco Javier; DOS SANTOS AGUIAR GUEDES, Priscila Gracielle. Avaliação da Influência do Coeficiente de Desoxigenação no Modelo de Autodepuração Utilizando Efluentes de Laticínio. **Revista Internacional de Ciências**, v. 9, n. 3, 2019.

MENEZES, João Paulo Cunha et al. Relação entre padrões de uso e ocupação do solo e qualidade da água em uma bacia hidrográfica urbana. **Engenharia Sanitária e Ambiental**, v. 21, p. 519-534, 2016.

MINAS GERAIS. Instituto Mineiro de Gestão das Águas. **Comitês e Unidades de Planejamento**. 2020. Disponível em < <http://www.igam.mg.gov.br/component/content>>. Acesso em 24 out. 2023.

NEIVA, Thiago Botelho; NUMATA, Fernando. A importância do tratamento biológico de esgoto no Brasil e as tecnologias existentes. **Revista Científica Multidisciplinar Núcleo do Conhecimento**. 9. ed., p. 110-134. 2021.

NEPOMUCENO. Prefeitura Municipal de Nepomuceno – MG. **Plano Municipal de Saneamento Básico**. 2019.

OLIVEIRA, S; CORRÊA, M. A.; VON SPERLING, M. Avaliação de 166 ETEs em operação no país, compreendendo diversas tecnologias. Parte 2: Influência de fatores de projeto e operação. **Engenharia Sanitária e Ambiental**, v. 10, p. 358-368, 2005.

PAIXÃO, Bruna Martins da. **O uso de geotecnologias em estudos integrados de variáveis físicas e socioambientais em bacias hidrográficas**, 2021.

PASQUALINI, Liana Notari. **Estudo da oxidação de matéria orgânica de lixiviados de aterro sanitário por meio de tratamento com ozônio, peróxido de hidrogênio e radiação ultravioleta**. 2010. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo. São Paulo, 2010.

SALLA, Marcio Ricardo et al. Estudo da autodepuração do Rio Jordão, localizado na bacia hidrográfica do Rio Dourados. **Engenharia Sanitária e Ambiental**, v. 18, p. 105-114, 2013.

SILVA, A. G.; SOUZA, L. D. Efeitos antrópicos e sazonais na qualidade da água do rio do Carmo. **HOLOS**, v. 5, p. 122-136, 2013.

SOUTO, Cleyanne Kelly Barbosa et al. Fatores antrópicos de poluição hídrica na bacia do Tucunduba em Belém-PA. **Brazilian Journal of Development**, v. 5, n. 9, 2019.

SOUZA NETO, M. W. R. **Modelagem ambiental de autodepuração do Rio Madeira utilizando o modelo Streeter-Phelps**. 2021.

SPERLING, M. V. **Introdução à Qualidade das Águas e ao Tratamento de Esgotos: Princípios do Tratamento Biológico de Águas Residuárias**. 3ª ed., Belo Horizonte: Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental – UFMG, 2005.

SPERLING, M. V. **Estudos e Modelagem da Qualidade da água de Rios**. 2. ed. Belo Horizonte: Editora UFMG, v. 7. 2014.