



UNIVERSIDADE FEDERAL DO AMAZONAS
INSTITUTO DE EDUCAÇÃO, AGRICULTURA E AMBIENTE
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA AMBIENTAL



MARLISON WILLIAMES RODRIGUES DE SOUZA NETO

**MODELAGEM AMBIENTAL DE AUTODEPURAÇÃO DO RIO
MADEIRA UTILIZANDO O MODELO DE STREETER-PHELPS**

HUMAITÁ

2021

MARLISON WILLIAMES RODRIGUES DE SOUZA NETO

**MODELAGEM AMBIENTAL DE AUTODEPURAÇÃO DO RIO
MADEIRA UTILIZANDO O MODELO DE STREETER-PHELPS**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Instituto de Educação,
Agricultura e Ambiente da Universidade Federal do Amazonas como
parte dos requisitos necessários para obtenção do título de Bacharel
em Engenharia Ambiental.

Orientadora: Profa. Dra. Agnes Cristina Oliveira Mafra

HUMAITÁ

2021

Ficha Catalográfica

Ficha catalográfica elaborada automaticamente de acordo com os dados fornecidos pelo(a) autor(a).

S729m Souza Neto, Marlison Willames Rodrigues de
Modelagem ambiental de autodepuração do Rio Madeira
utilizando o modelo de Streeter-Phelps / Marlison Willames
Rodrigues de Souza Neto . 2021
48 f.: il. color; 31 cm.

Orientadora: Agnes Cristina Oliveira Mafra
TCC de Graduação (Engenharia Ambiental) - Universidade
Federal do Amazonas.

1. Modelagem ambiental. 2. Rio Madeira. 3. Autodepuração. 4.
Od. 5. Dbo. I. Mafra, Agnes Cristina Oliveira. II. Universidade
Federal do Amazonas III. Título

Modelagem ambiental de autodepuração do Rio Madeira utilizando o modelo de Streeter-Phelps

MARLISON WILLIAMES RODRIGUES DE SOUZA NETO

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Instituto de Educação, Agricultura e Ambiente da Universidade Federal do Amazonas como parte dos requisitos necessários para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Ambiental.

Aprovada por:

Prof. Dra. Agnes Cristina Oliveira Mafra
Orientadora (IEAA/UFAM)

Prof. Dr. Murilo José Pereira de Macedo
Membro (DEQ/UFRN)

Prof. Dr. William Costa e Silva
Membro (DEQ/UFAM)

Humaitá-AM, 22 de novembro de 2021.

À minha mãe,
dedico.

AGRADECIMENTOS

Gostaria de agradecer a Deus, em primeiro lugar, por nunca me abandonar.

À minha família: meu pai Marivaldo, minha mãe Meiriane e meu irmão Marlonn, por me apoiarem nos meus ideais, mesmo que inicialmente parecessem loucura. É tudo por vocês e tudo para vocês. Obrigado por acreditarem em mim muito mais do que eu acredito. Amo vocês!

À Sabrina, minha melhor amiga, que topou sair junto comigo da nossa cidade natal pra cursar a graduação que sempre sonhamos! Obrigado por fazer parte da minha vida de modo tão especial.

À minha segunda família: Luiz, Naty e Sabrina de novo. Obrigado pelos momentos maravilhosos que passamos juntos. Morar com vocês foi uma experiência incrível! Ganhei novos irmãos.

A todos os amigos incríveis que fiz ao longo dessa jornada: Sara, Janaina, Tsad, Heitor e Lara. Foi ótimo chorar e rir junto com vocês!

À minha orientadora, Prof. Dra. Agnes Mafra que sempre soube tirar o melhor de mim. Obrigado por sempre saber o momento certo de me colocar pra cima.

À Nívea Zanon por nos acolher quando chegamos na cidade sem conhecer ninguém. Obrigado por nos tratar como filhos e nos amparar quando ninguém mais o fez.

À assistente social do Instituto, Caroline Duarte Brighente, por sempre tentar fazer o melhor para nos garantir apoio, não só financeiro, ao longo do curso.

À todas as pessoas incríveis que conheci no caminho, dentro e fora do ambiente universitário. Assim como também, à todos os professores com os quais tive a oportunidade de aprender muito mais para, um dia, me tornar o melhor no que faço.

À Universidade Federal do Amazonas, por possibilitar a realização deste curso.

À Banca avaliadora que se disponibilizou em avaliar o meu trabalho.

À todos que contribuíram direta ou indiretamente para realização deste trabalho, mesmo não estando nominalmente aqui, guardo vocês no coração.

“You cannot change what you are, only what you do.”

(Philip Pullman)

RESUMO

No Amazonas, apenas 22% da população possuem coleta de esgoto em suas residências e 19% contam com o tratamento do mesmo, estando assim, abaixo da média nacional. Um dos principais problemas dos corpos hídricos brasileiros é a poluição gerada principalmente pelo lançamento de efluentes acima da sua capacidade de autodepuração. No Brasil, o Conselho Nacional do Meio Ambiente instituiu os padrões para lançamentos de efluentes nos corpos hídricos, bem como sua classificação. Portanto, neste trabalho será utilizada modelagem ambiental em ambiente computacional através do software Scilab, tomando como referência os parâmetros de Demanda Bioquímica de Oxigênio (DBO) e Oxigênio Dissolvido (OD) para estudar a capacidade de autodepuração do Rio Madeira. Todo o trabalho foi realizado através de pesquisa bibliográfica e simulações computacionais, utilizando o modelo de autodepuração de Streeter-Phelps. Os resultados foram comparados com as resoluções ambientais vigentes para se discutir se são ideais ou podem/devem ser alterados. O modelo de Streeter-Phelps se mostrou adequado para o estudo. O Rio Madeira mostrou possuir uma alta capacidade de autodepuração. Mesmo o lançamento mais alto de 1000 mg/L a uma vazão de 1 m³/s conseguiu ser depurado pelo Rio em menos de 600 km. Na vazão média, em 4 dias houve o retorno do corpo hídrico à zona de águas limpas. Na vazão crítica, esse tempo foi de aproximadamente 8 dias. Através da avaliação das simulações de acordo com os padrões de lançamento, concluiu-se que os órgãos ambientais podem flexibilizar os lançamentos de efluentes no Rio Madeira, pois os lançamentos não afetaram os valores de OD e DBO além dos limites estabelecidos.

Palavras-chave: Modelagem ambiental, Autodepuração, Rio Madeira, OD, DBO.

ABSTRACT

In the State of Amazonas, Brazil, only 22% of the population has wastewater collection in their homes and 19% have wastewater treatment, which is below the national average. One of the main problems facing Brazilian bodies of water is the pollution generated mainly by the discharge of effluents above their autodepuration capacity. In Brazil, the National Council for the Environment establishes standards for the discharge of effluents into bodies of water, as well as their classification. Therefore, in this work, environmental modeling in a computational environment through the Scilab software will be used, taking as reference the Biochemical Oxygen Demand (BOD) and Dissolved Oxygen (DO) parameters to study the autodepuration capacity of the Madeira River. All work was carried out through bibliographical research and computer simulations, using the Streeter-Phelps mathematical autodepuration model. The results were compared with current environmental laws to discuss whether they are ideal or can/should be changed. The Streeter-Phelps model proved to be adequate for the study. The Madeira River proved to have a high autodepuration capacity. Even the highest release of 1000 mg/L at a flow rate of 1 m³/s managed to be cleared by Madeira in less than 600 km. In the average flow, in 4 days there was the return of the body of water to the clean water zone. In critical flow, this time was approximately 8 days. Through the evaluation of the simulations according to the release standards, it was concluded that the environmental government agencies can make the release of effluents in the Madeira River more flexible, as the releases did not affect the OD and BOD values beyond the established limits.

Keywords: Environmental modelling, Autodepuration, Madeira river, DO, BOD.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

1	Zonas de autodepuração de um corpo hídrico	17
2	Dinâmica do Oxigênio Dissolvido	19
3	Localização do Município de Humaitá em relação ao Estado do Amazonas. . .	23
4	Localização da Estação Fluviométrica de Humaitá.	24
5	Gráfico de Vazões Mínimas.	25
6	Gráfico de Vazões Mínimas, Médias e Máximas.	29
7	Gráfico de OD na vazão média para os diferentes cenários	31
8	Gráfico de DBO na vazão média para os diferentes cenários	31
9	Gráfico de OD na vazão crítica para os diferentes cenários	32
10	Gráfico de DBO na vazão crítica para os diferentes cenários	32
11	Gráfico de OD na vazão média em comparação à legislação	34
12	Gráfico de DBO na vazão média em comparação à legislação	35
13	Gráfico de OD na vazão crítica em comparação à legislação	35
14	Gráfico de DBO na vazão crítica em comparação à legislação	36

LISTA DE TABELAS

1	Valores de DBO e OD medidos no Rio Madeira.	26
2	Coeficientes de desoxigenação para diferentes tipos de efluentes.	26
3	Coeficientes de desoxigenação e reaeração para diferentes tipos de corpos d'água.	27
4	Valores de entrada do Rio para o modelo de autodepuração.	30

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

UFAM	Universidade Federal do Amazonas
ANA	Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
OD	Oxigênio dissolvido
DBO	Demanda Bioquímica de Oxigênio
Conama	Conselho Nacional do Meio Ambiente
IPAAM	Instituto de Proteção Ambiental do Amazonas
CERH	Conselho Estadual de Recursos Hídricos

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	13
1.1	Objetivos	14
1.1.1	Objetivo geral	14
1.1.2	Objetivos específicos	14
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	16
2.1	O Rio Madeira	16
2.2	Autodepuração	17
2.2.1	Demanda bioquímica de oxigênio e oxigênio dissolvido	18
2.3	Modelo de Streeter-Phelps	19
2.4	Legislações ambientais acerca do lançamento de efluentes em corpos hídricos .	21
3	METODOLOGIA	23
3.1	Área de estudo	23
3.2	Dados para as simulações	23
3.2.1	Vazões, Velocidades e Áreas de seção transversal	24
3.2.2	DBO, OD e C_s	25
3.2.3	Coefficientes de desoxigenação e reaeração	26
3.3	Programação e Simulações dos cenários de despejos de efluentes	27
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO	29
4.1	Dados de entrada	29
4.2	Simulações de Autodepuração	30
4.3	Avaliação dos padrões de lançamento de efluentes de acordo com a legislação .	33
5	CONSIDERAÇÕES FINAIS	37

REFERÊNCIAS	39
Apêndice A	41
Apêndice B	44

1 INTRODUÇÃO

Grande parte do Brasil não conta com tratamento de esgotos. De acordo com o Atlas Esgotos publicado pela Agência Nacional de água (ANA) (BRASIL, 2017), apenas 61% da população do país possui coleta de esgotos e 43% contam com tratamento. Do total de esgotos coletados, apenas 70% possui algum tipo de tratamento antes de ser lançado nos corpos hídricos. Quando trazemos esses dados para o estado do Amazonas os resultados são mais alarmantes: apenas 22% da população possuem coleta de esgoto em suas residências e 19% contam com o tratamento do mesmo (BRASIL, 2017).

A qualidade da água nos corpos hídricos está relacionada com o uso e ocupação do solo na bacia hidrográfica, além de fatores naturais e interferências antrópicas. A Lei nº 6.938, que institui a Política Nacional do Meio Ambiente, define poluição como sendo “a degradação da qualidade ambiental resultante de atividades que direta ou indiretamente: [...] afetem as condições estéticas ou sanitárias do meio ambiente; lancem matérias ou energia em desacordo com os padrões ambientais estabelecidos” (BRASIL, 1981).

Partindo desse princípio, nota-se que um dos principais problemas dos corpos hídricos brasileiros é a poluição gerada principalmente pelo lançamento de efluentes. No Brasil, O Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA), através de sua resolução nº 357 de 2005, posteriormente complementada e alterada pela resolução nº 430 de 2011, institui os padrões para lançamentos de efluentes nos corpos hídricos, bem como sua classificação.

De acordo com Braga (2005), a autodepuração é um processo natural de recuperação que ocorre em um corpo de água quando este é poluído por lançamentos de matéria orgânica biodegradável. Através desse processo, os compostos orgânicos são transformados em compostos inertes e não prejudiciais para o meio. A autodepuração serve como indicativo dos limites de despejos suportados por corpo hídrico para, assim, impedir que sejam lançados efluentes em rios com níveis acima da sua capacidade de restauração.

É necessário que sejam realizados estudos de modelagem da qualidade da água e avaliem-se se os dados obtidos estão de acordo com os padrões da legislação ambiental vigente. Uma forma eficiente de avaliar e medir os impactos causados por esses lançamentos é através da utilização de modelagem ambiental, que usa modelos matemáticos através de representação computaci-

onal para, por exemplo, medir a qualidade das águas e com isso analisar e criar medidas de controle ambiental.

O lançamento de matéria orgânica em um corpo hídrico afeta principalmente os valores de oxigênio dissolvido (OD) no corpo, pois as bactérias decompositoras são em grande parte aeróbias, ou seja, utilizam o oxigênio na respiração. Além de aumentar os valores de Demanda Bioquímica de Oxigênio (DBO) do Rio, que se forem maiores do que o permitido pelo CONAMA podem acarretar sérios problemas para os ecossistemas que vivem no corpo hídrico e, conseqüentemente, para a população que necessita dele para a sua sobrevivência.

Levando também em consideração a pandemia que se estabeleceu no mundo em 2020, todo o trabalho foi realizado em *home office* através de pesquisa bibliográfica e simulações computacionais, utilizando o modelo de Streeter-Phelps para análise de autodepuração do rio.

O Rio Madeira, objeto do estudo, possui ainda poucas pesquisas acerca de seus parâmetros físico-químicos, assim como a maioria dos rios da região norte. O modelo matemático de Streeter-Phelps foi escolhido, pois Von Sperling (2014) afirma que esse modelo serviu de base para vários modelos avançados utilizados atualmente e, no Brasil, é amplamente utilizado principalmente nas simulações de OD, devido à sua simplicidade conceitual e menor necessidade de parâmetros e dados de entrada.

Portanto, neste trabalho será utilizado o modelo matemático de Streeter-Phelps, tomando como referência os parâmetros de DBO e OD para estudar a capacidade de autodepuração do Rio Madeira. Os resultados serão comparados com as resoluções ambientais vigentes para que se discuta se são ideais ou podem/devem ser alterados.

1.1 Objetivos

1.1.1 Objetivo geral

Estudar a capacidade máxima de autodepuração do Rio Madeira através de modelagem e simulação dinâmica usando o modelo de Streeter-Phelps.

1.1.2 Objetivos específicos

- Coletar dados de qualidade da água do Rio Madeira através de pesquisa bibliográfica;
- Estudar regulações sobre despejo no Rio Madeira;

- Desenvolver um programa com rotina interativa no software Scilab para modelagem e simulação da dinâmica da autodepuração em leito do Rio Madeira usando o modelo de Streeter-Phelps;
- Simular diferentes cenários de despejos de efluentes e comparar os valores;
- Analisar os parâmetros ambientais das simulações;
- Avaliar os padrões de lançamento de efluentes definidos pelas legislações ideais para o Rio Madeira;

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 O Rio Madeira

O Rio Madeira é um Rio de águas brancas que faz parte da bacia do Rio Amazonas, sendo um de seus principais afluentes. Tem uma extensão aproximada de 1.450 Km, nascendo com o nome de Rio Beni, na Bolívia, até chegar no Rio Amazonas (SIOLI, 1968). Banha os estados do Amazonas e Rondônia fazendo com que seja de grande importância econômica para esses estados.

Horbe et al. (2013) diz que “o clima da região é quente e úmido, com temperatura média anual entre 24-26 °C [...]. A precipitação média anual é de 1733 mm, com máximo de 245 mm em março e mínima de 26 mm em julho”. Características comuns a Rios Amazônicos.

Humaitá é a primeira cidade do Amazonas a ser banhada pelo Rio. O Madeira é de grande importância econômica para a cidade, seja servindo de rota fluvial ou pelo extrativismo proporcionado por suas águas. Duas usinas de grande porte usam suas águas para o aproveitamento hidrelétrico, a Usina Hidrelétrica de Jirau e a de Santo Antônio.

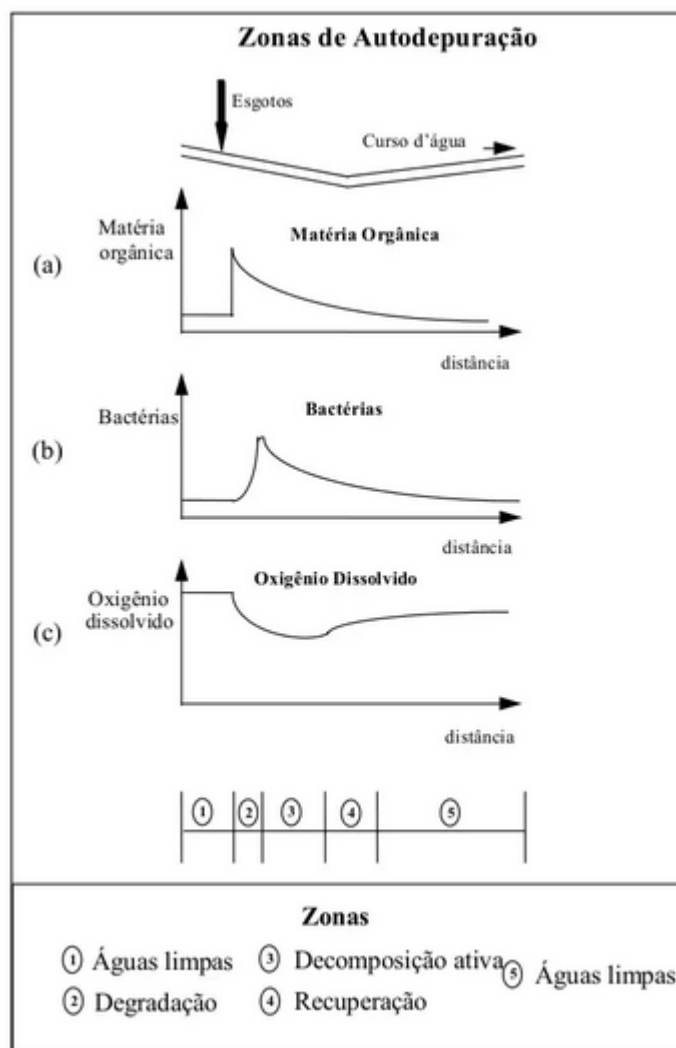
Por ser um Rio jovem, suas águas carregam grande quantidade de troncos e sedimentos ao longo de sua extensão. Seu período de cheia ocorre entre outubro e abril e a seca de maio a setembro (SILVA, 2012). O Rio Madeira, além de contribuir com aproximadamente 15 % da vazão total do Rio Amazonas, também é o Rio com a maior carga de transporte de sedimentos do mundo e está constantemente em processo de erosão e degradação fluvial (ASSIS; BUFFON, 2014).

A velocidade e a força da água causam muita turbulência no rio que, além de movimentar toda a coluna d'água, adicionada às várias cachoeiras e corredeiras da região, mantêm a concentração de OD elevada, com médias de 6,32 mg/l. A importância desse parâmetro está ligada à diferenciação de micro-ambientes, ciclagem de nutrientes orgânicos, oxidação e decomposição (COBRAPE, 2006).

2.2 Autodepuração

A autodepuração restabelece o equilíbrio no meio aquático, restaurando as características físico-químicas e biológicas de um corpo hídrico a seu estado antes de alterações devido o despejo de efluentes. Sperling (2014) diz que "deve ser entendido que o conceito de autodepuração apresenta a mesma relatividade que o conceito de poluição. Uma água pode ser considerada depurada, sob um ponto de vista, mesmo que não esteja totalmente purificada em termos higiênicos".

Figura 1: Zonas de autodepuração de um corpo hídrico



Fonte: (SPERLING, 2014).

De acordo com Von Sperling (2014), as zonas de autodepuração são divididas em: zona de degradação, zona de decomposição ativa, zona de recuperação e zona de águas limpas.

A Zona de águas limpas fica a montante do lançamento do efluente, por isso tem elevada concentração do OD. A Zona de degradação fica a jusante do lançamento e é caracterizada por uma queda na disponibilidade de OD e aumento da sua depleção por conta do elevado teor de matéria orgânica lançada. Possui os organismos mais resistentes.

Na zona de decomposição ativa o OD atinge seu valor mínimo e a vida aquática é predominante de seres anaeróbicos. A zona de recuperação é onde o Rio começa a voltar a seu estado físico-químico inicial até voltar às zonas de águas limpas.

O OD e a DBO são conceitos inteiramente ligados à autodepuração. O despejo de matéria orgânica em um rio causa um consumo de oxigênio dissolvido devido a digestão dessa matéria pelas bactéria decompositoras e aeróbias (SPERLING, 2014).

2.2.1 Demanda bioquímica de oxigênio e oxigênio dissolvido

A demanda bioquímica de oxigênio é a quantidade de oxigênio consumida por organismos presentes em efluentes. Quanto maior o valor de DBO, mais matéria orgânica tem o efluente, pois são valores diretamente proporcionais. Os valores de DBO são de extrema importância e amplamente utilizados nos estudos de autodepuração (SPERLING, 2014).

O oxigênio, em relação a outros compostos, possui baixa solubilidade. É menos solúvel em altas temperaturas. O oxigênio no ar é abundante, em torno de 270 mg/L, diferente do que ocorre na água. A concentração de saturação de oxigênio (o valor máximo que ela consegue dissolver) na água a 20° C é de 8 mg/L (MAFRA, 2013).

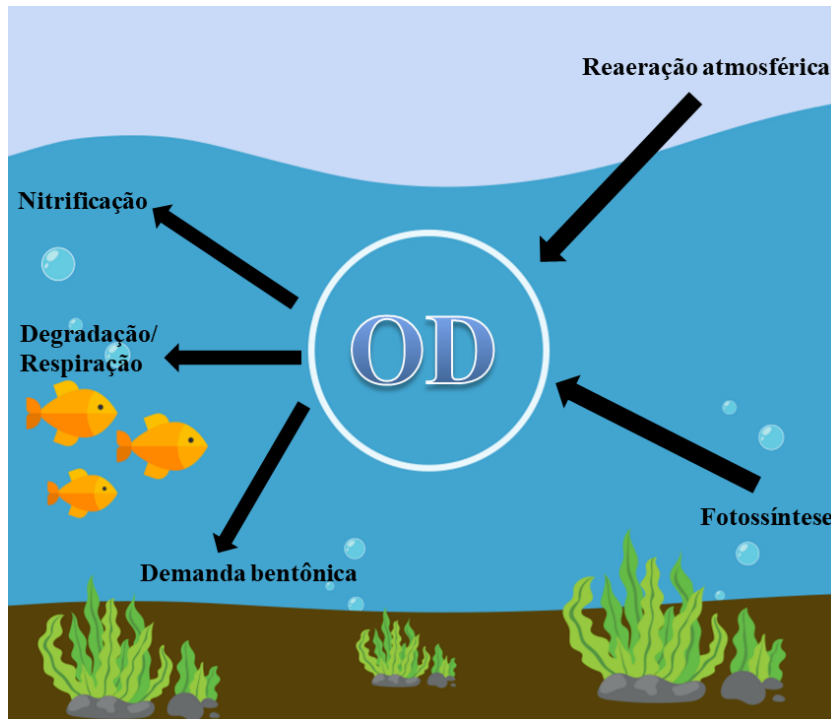
Quando lançamos um efluente em um corpo hídrico, os organismos aeróbios, que são mais eficientes, degradam rapidamente a matéria orgânica. Por outro lado, os anaeróbios não possuem a mesma eficiência. Assim, a degradação da matéria orgânica pode ser totalmente aeróbia, se o oxigênio não acabar, ou aeróbia e anaeróbia depois que o oxigênio acabar.

A queda dos níveis de OD é um dos fatores mais nocivos relacionados a poluição de um corpo d'água por matéria orgânica. É extremamente necessário para manter as condições aeróbicas em águas superficiais. A queda repentina do OD pode causar hipóxia, que tem sido uma das principais causas da redução da biodiversidade aquática (LIMA, 2011).

A reaeração atmosférica e a fotossíntese são os principais fatores na produção de oxigênio em um corpo hídrico. Enquanto a oxidação da matéria orgânica, a nitrificação e a demanda bentônica são os principais responsáveis pelo consumo desse oxigênio (SPERLING, 2014). Podemos ver essa dinâmica na Figura 2. A Depleção de Oxigênio ou Curva de oxigênio dissolvido

é consequência direta da poluição, consumo e produção de oxigênio.

Figura 2: Dinâmica do Oxigênio Dissolvido



Fonte: Elaborado pelo autor (2021).

2.3 Modelo de Streeter-Phelps

O modelo matemático de Streeter-Phelps foi criado em 1925 para realizar estudos de auto-depuração no rio Ohio, nos Estados Unidos. Desde então tem sido amplamente utilizado, principalmente no Brasil, para análises de oxigênio dissolvido, entre outros fatores. É um modelo matemático de modelagem ambiental que serve de base até hoje para diversos outros modelos mais avançados (SPERLING, 2014).

A dedução do modelo pode ser vista a seguir. Primeiro, parte-se da equação da continuidade molar:

$$\frac{\partial(Cu)}{\partial x} + \frac{\partial(Cv)}{\partial y} + \frac{\partial(Cw)}{\partial z} - r = -\frac{dC}{dt}$$

Como o interesse é o cálculo do Oxigênio dissolvido e da Demanda bioquímica de oxigênio, reescrevemos a equação anterior em relação ao oxigênio dissolvido e outra em relação à DBO.

$$\frac{\partial(C_{O_2}u)}{\partial x} + \frac{\partial(C_{O_2}v)}{\partial y} + \frac{\partial(C_{O_2}w)}{\partial z} - r_{O_2} = -\frac{dC_{O_2}}{dt}$$

$$\frac{\partial(Lu)}{\partial x} + \frac{\partial(Lv)}{\partial y} + \frac{\partial(Lw)}{\partial z} - r_L = -\frac{dL}{dt}$$

O modelo supõe que a concentração de oxigênio e a DBO variam apenas em relação ao eixo x do Rio (sua extensão). Supões também que o rio está em regime permanente e a velocidade é constante ao longo de sua extensão. Podemos então simplificar as equações:

$$u \frac{\partial(C_{O_2})}{\partial x} - r_{O_2} = 0$$

$$u \frac{\partial(L)}{\partial x} - r_L = 0$$

A velocidade de geração de oxigênio (r_{O_2}) e a velocidade de geração de DBO (r_L), são dadas por:

$$r_{O_2} = k_2(C_S - C_{O_2})$$

$$r_L = -k_1L$$

Substituindo na equação simplificada, temos:

$$u \frac{\partial L}{\partial x} + k_1L = 0$$

$$u \frac{\partial C_{O_2}}{\partial x} - k_2(C_S - C_{O_2}) + k_1L = 0$$

Resolvendo as EDOs, encontramos as seguintes equações:

$$L = L_0 e^{-\frac{k_1}{u}x} \quad (2.1)$$

Onde:

L_0 = DBO no ponto de lançamento do efluente (m^3/s);

k_1 = Constante de desoxigenação (dia^{-1});

u = Velocidade da mistura (m/s);

x = Ponto do lançamento (m).

$$C_{O_2} = (C_S - D) \quad (2.2)$$

Onde:

C_S = Concentração de saturação de oxigênio (mg/L);

D = Déficit de oxigênio (mg/L);

$$D = D_0 e^{-\frac{k_2}{u}x} + \frac{k_1 L_0}{k_2 - k_1} [e^{-\frac{k_1}{u}x} - e^{-\frac{k_2}{u}x}] \quad (2.3)$$

Onde:

D_0 = Déficit de oxigênio no ponto de lançamento (mg/L);

k_2 = Constante de reaeração (dia^{-1});

k_1 = Constante de desoxigenação (dia^{-1});

L_0 = DBO no ponto de lançamento do efluente (m^3/s);

u = Velocidade da mistura (m/s);

x = Ponto do lançamento (m).

2.4 Legislações ambientais acerca do lançamento de efluentes em corpos hídricos

No Amazonas, o Instituto de Proteção Ambiental do Amazonas (IPAAM) é o órgão responsável pelo controle ambiental no estado. O conselho Estadual de Recursos Hídricos (CERH), através de sua resolução nº 1 de 2016 define que o IPAAM deve seguir as resoluções do CONAMA quando se tratar de lançamentos de efluentes e classificação de corpos d'água (CERH, 2016).

Sendo assim, de acordo com os padrões estabelecidos pela resolução nº 357 do CONAMA, o Rio Madeira é um Rio de classe 2. Assim, o limite de DBO encontrado em um Rio de classe

2 é de no máximo 5 mg/L. O limite de OD não deve ser inferior a 5 mg/L.

Esses limites não podem ser ultrapassados, exceto quando, através de estudos de autodepuração do Rio, seja comprovado que este possui capacidade de se recuperar, como estabelecido em seu artigo 10, parágrafo 1, que diz:

§ 1º Os limites de Demanda Bioquímica de Oxigênio (DBO), estabelecidos para as águas doces de classes 2 e 3, poderão ser elevados, caso o estudo da capacidade de autodepuração do corpo receptor demonstre que as concentrações mínimas de oxigênio dissolvido (OD) previstas não serão desobedecidas, nas condições de vazão de referência, com exceção da zona de mistura (CONAMA, 2005).

Além disso, seu artigo 25 diz que:

Art. 25º. É vedado o lançamento e a autorização de lançamento de efluentes em desacordo com as condições e padrões estabelecidos nesta Resolução. Parágrafo único. O órgão ambiental competente poderá, excepcionalmente, autorizar o lançamento de efluente acima das condições e padrões estabelecidos no art. 34, desta Resolução, desde que observados os seguintes requisitos: I - comprovação de relevante interesse público, devidamente motivado; II - atendimento ao enquadramento e às metas intermediárias e finais, progressivas e obrigatórias; III - realização de Estudo de Impacto Ambiental-EIA, às expensas do empreendedor responsável pelo lançamento; IV - estabelecimento de tratamento e exigências para este lançamento; e V - fixação de prazo máximo para o lançamento excepcional (CONAMA, 2005).

Em 2011, o CONAMA estabeleceu a resolução nº 430, que altera e complementa a anterior. Em seu artigo 14, a resolução diz que os efluentes de qualquer fonte devem fazer uma redução mínima de 60 % da DBO. Seu artigo 21 diz que a DBO lançada diretamente de efluentes oriundos de sistemas de tratamento de esgotos sanitários devem lançar, no máximo, 120 mg/L.

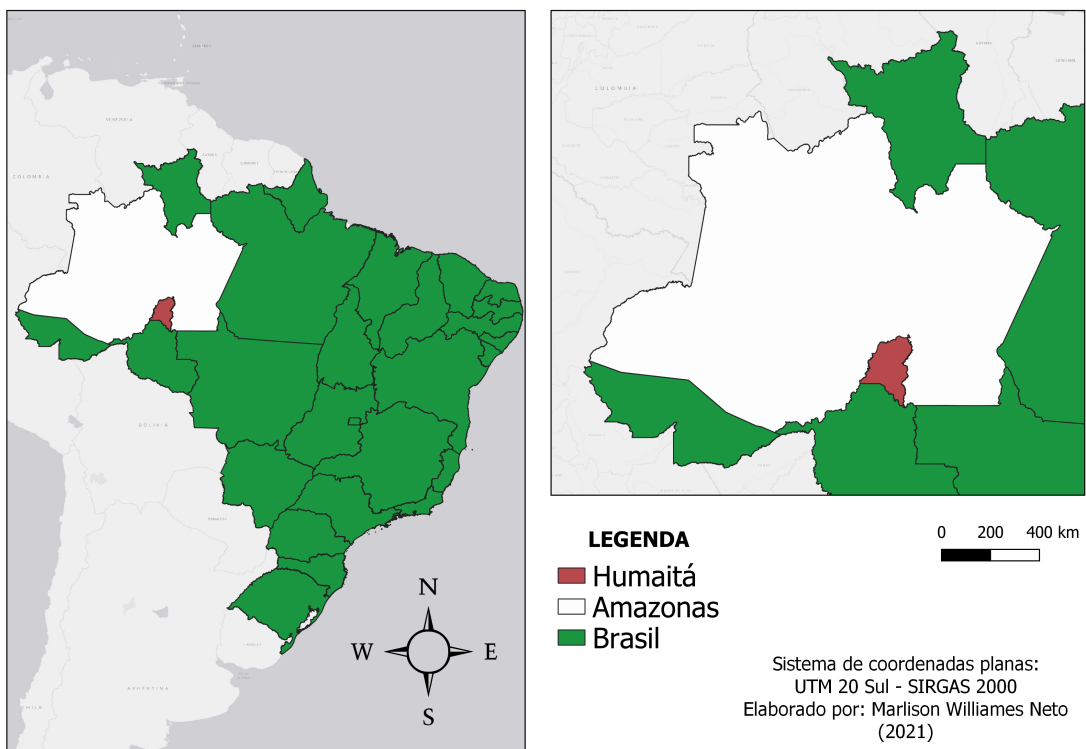
Esses dois pontos podem ser desconsiderados, segundo a lei, "no caso de existência de estudo de autodepuração do corpo hídrico que comprove atendimento às metas do enquadramento do corpo receptor; [...]"(CONAMA, 2011). Ou seja, se os valores lançados não alterarem as características do corpo hídrico de acordo com a sua classe, há a liberação do lançamento.

3 METODOLOGIA

3.1 Área de estudo

O presente estudo foi realizado na região do município de Humaitá, localizado no sul do Estado do Amazonas, conforme a Figura 3. Possui uma população aproximada de 57.195 habitantes, e fica localizado nas coordenadas 07°30'22" S e 63°01'15" W (IBGE, 2021).

Figura 3: Localização do Município de Humaitá em relação ao Estado do Amazonas.



Fonte: Elaborado pelo autor (2021).

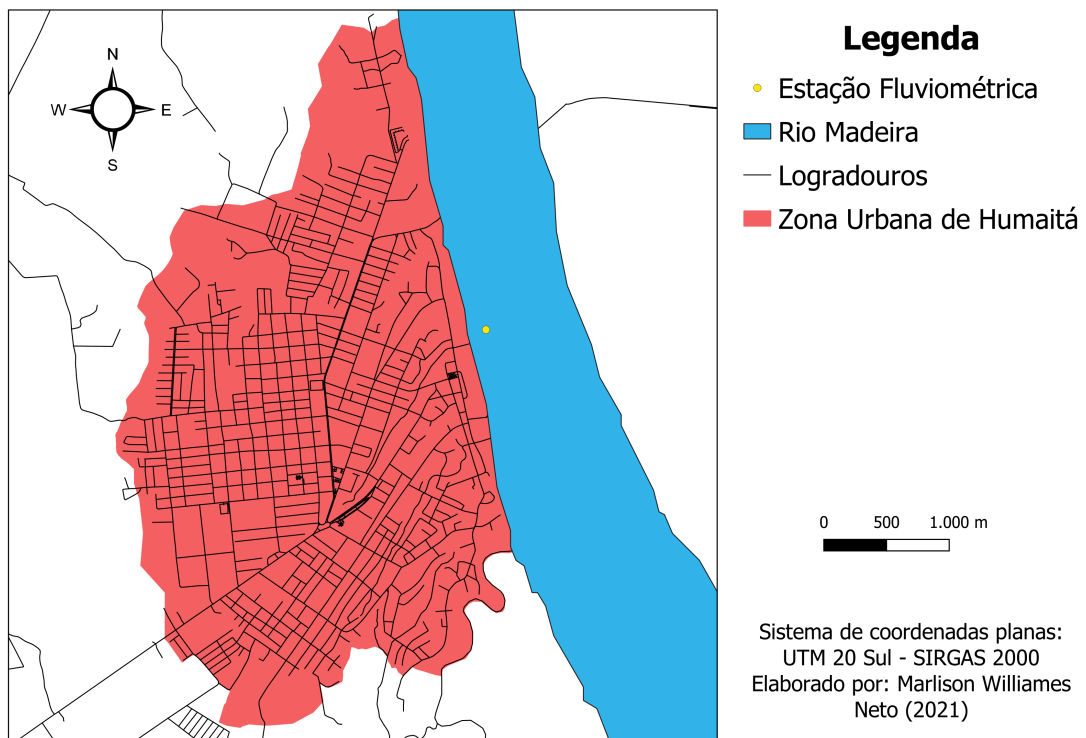
3.2 Dados para as simulações

Os dados foram coletados de acordo com os períodos de seca e cheia do Rio Madeira. Buscou-se trabalhos que usaram medições nesses períodos e, de preferência, próximo ao trecho do Rio que corta Humaitá. Os tratamentos dos dados também se basearam nesse fator.

3.2.1 Vazões, Velocidades e Áreas de seção transversal

Os valores de vazão foram obtidos pelo Sistema Nacional de Informações sobre Recursos Hídricos através da plataforma HIDROWEB (2005) da ANA. A série histórica de vazões foi obtida pela estação fluviométrica de Humaitá, código: 15630000. O equipamento foi instalado em 28/02/1931 apenas com Régua Linimétrica para medir as alturas de nível da água e a vazão, ganhando melhorias logo depois. Está localizada em -7,5 de latitude e -63,02 de longitude (Figura 4), sua área de drenagem corresponde a 1.090.000,00 km².

Figura 4: Localização da Estação Fluviométrica de Humaitá.



Fonte: Elaborado pelo autor (2021).

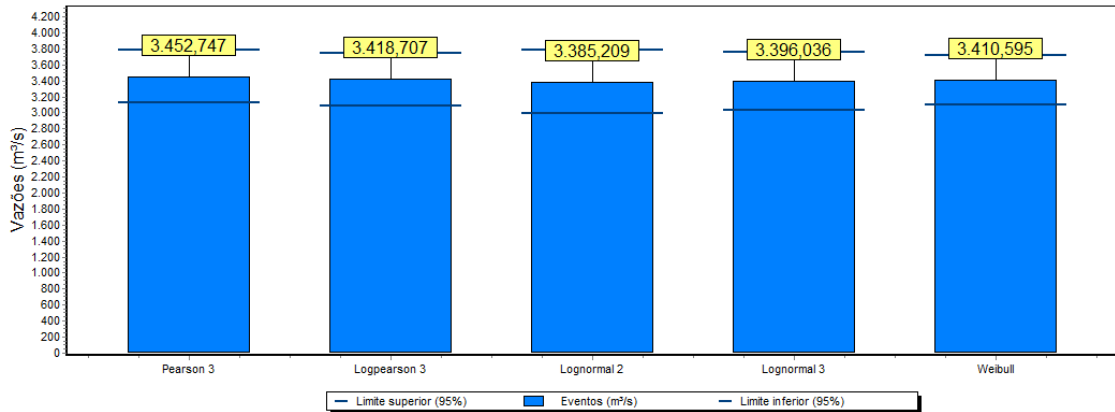
Para o tratamento dos dados de vazão, utilizou-se o software SisCAH (2009) na sua versão 1.0, programa gratuito desenvolvido pelo Grupo de Pesquisa em Recursos Hídricos da Universidade Federal de Viçosa.

Os valores de vazões foram obtidos dos anos de 1967 a 2014. A vazão média adotada foi a Q_{95} , de acordo com a recomendação de Sperling (2014). Foi realizado um pré-processamento, que consiste em descartar dados anuais com mais de 5% de falhas. Assim, os anos de 1967, 1990 e 2014 foram descartados por conterem dados incompletos ou inconsistentes, sobrando os anos de 1968 a 2013. O programa gera um relatório das vazões médias anuais (disponível no

Apêndice A).

A vazão mínima, ou vazão crítica, também foi tratada com o uso do software SisCAH. Esta vazão é calculada com uma duração de 7 dias e período de retorno de 10 anos ($Q_{7,10}$). O software usou como melhor resultado a distribuição de Weibull, pois foi a que obteve o menor erro padrão (158,35). A Figura 5 mostra as distribuições geradas.

Figura 5: Gráfico de Vazões Mínimas.



Fonte: Elaborado pelo autor (2021).

Os valores de velocidade foram extraídos da estação e tratados no software Excel (MICROSOFT, 2010). Usou-se apenas os valores já consistidos e disponibilizados pelo Hidroweb. As velocidades foram separadas de acordo com os períodos do ciclo hidrológico do rio Madeira.

Para os valores de área de seção transversal, usou-se a equação 3.1 de área. Para obter os valores desejados utilizou-se as vazões e velocidades na seca e na cheia do Rio.

$$A_r = \frac{Q_r}{v_r} \quad (3.1)$$

Onde:

A_r = Área de seção transversal do Rio (m^2);

Q_r = Vazão do Rio (m^3/s);

v_r = Velocidade do Rio (m/s).

3.2.2 DBO, OD e C_s

Os dados utilizados para as simulações do modelo foram obtidos a partir de trabalhos anteriores realizados no Rio Madeira por Silva (2012). Os valores medidos se encontram na Tabela

1. Para utilização na simulação utilizou-se a média desses valores em ambos os períodos.

Tabela 1: Valores de DBO e OD medidos no Rio Madeira.

Pontos	DBO (mg/L)		OD (mg/L)	
	Seca	Cheia	Seca	Cheia
P1	1,30	0,32	6,77	5,26
P2	1,11	0,20	6,67	4,99

Fonte: Silva (2012). Adaptado pelo Autor.

Para o cálculo da concentração de Saturação de OD (C_s), são necessários os valores médios de temperatura do Rio. Esse valor também foi obtido através da Hidroweb e tratado em Excel. Como os valores obtidos na seca e na cheia não variaram de modo considerável foi usado o mesmo valor de temperatura em ambos os casos.

De acordo com Scariot (2008), a C_s é definida pela seguinte equação:

$$C_s = 14,652 - 0,41022T + 0,00799T^2 - 0,000077774T^3 \quad (3.2)$$

Onde:

T = Temperatura (°C).

3.2.3 Coeficientes de desoxigenação e reaeração

O coeficiente de desoxigenação (k_1) depende do tipo de efluente, das características da matéria orgânica, da temperatura e da presença de substâncias inibidoras. De acordo com Marcos Von Sperling no livro “Estudos e modelagem da qualidade da água de rios”, de 2007, os coeficientes podem ser obtidos de acordo com a Tabela 2 abaixo (para uma temperatura de 20°C). Esses valores serão utilizados nas simulações como coeficientes dos efluentes.

Tabela 2: Coeficientes de desoxigenação para diferentes tipos de efluentes.

Origem	K1 (dia ⁻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: Sperling (2014)

O coeficiente de reaeração (k_2) pode ser obtido por valores tabelados ou fórmulas empíricas que levam em conta a profundidade e a velocidade do corpo hídrico. Corpos mais rasos e velozes possuem maior valor de k_2 , pois quanto maior a turbulência maior a capacidade de mistura. Abaixo segue a Equação 3.3 usada para obter o k_2 .

$$K_2 = 5,0v_r^{0,97}H_r^{-1,63} \quad (3.3)$$

Onde:

v_r = Velocidade do rio (m/s);

H_r = Profundidade do Rio (m).

Também de acordo com Sperling (2014), temos os valores médios aproximados para os coeficientes a uma temperatura ambiente de 20°C, conforme Tabela 3.

Tabela 3: Coeficientes de desoxigenação e reaeração para diferentes tipos de corpos d'água.

Corpo d'água	K2 (dia-1)	K2 (dia-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: Sperling (2014)

3.3 Programação e Simulações dos cenários de despejos de efluentes

O software escolhido para escrever os códigos do programa e realizar as simulações dos cenários foi o Scientific Laboratory - SCILAB (2019) em sua versão 6.1.0, que é uma linguagem de programação compilada pelo software de mesmo nome. É um programa gratuito e de código aberto para análise numérica semelhante ao conhecido MATLAB.

Criou-se uma rotina interativa, onde é pedido na tela que o usuário informe os dados necessários para a realização dos cálculos 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;

$C_{O_{2r}}$ e $C_{O_{2e}}$ = Concentrações de O_2 do rio e do efluente;

A_r = Área de seção transversal do Rio;

K_1 e K_2 = Coeficientes de desoxigenação e reaeração;

C_s = Concentração de saturação de O_2 .

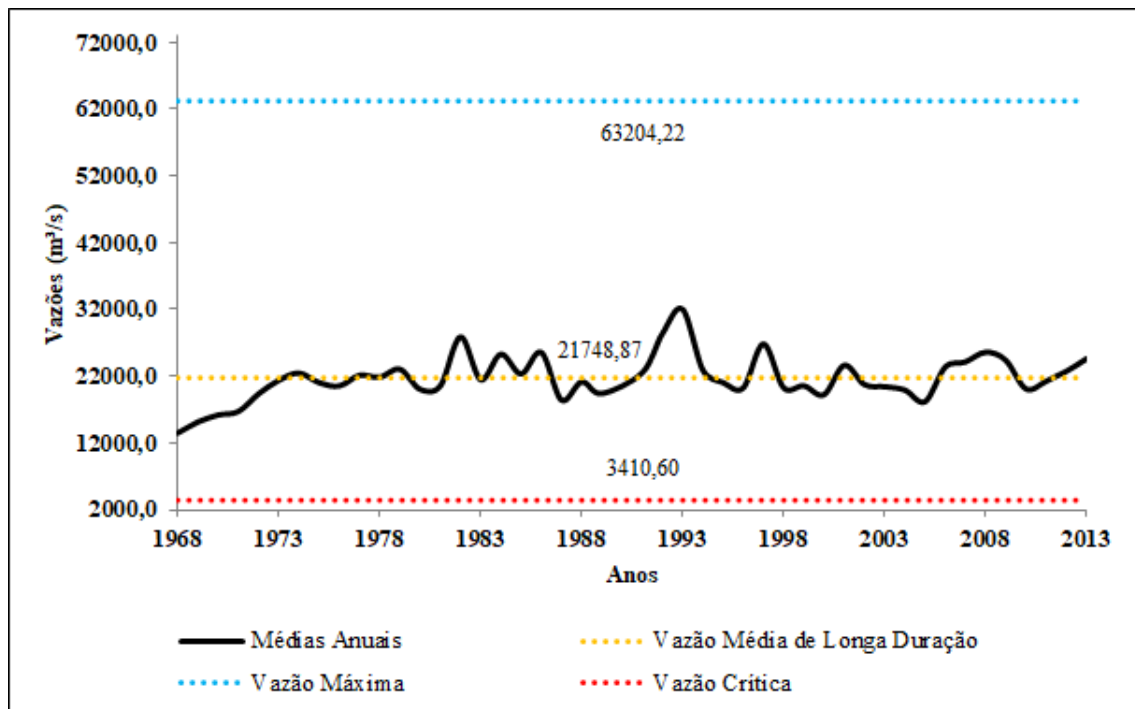
Foram utilizadas na programação as equações de Streeter-Phelps já mencionadas: Equação da concentração de DBO (2.1), equação da concentração de oxigênio (2.2) e equação do déficit de oxigênio (2.3).

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Dados de entrada

No gráfico da Figura 6 é mostrado as médias de vazões geradas e utilizadas para um tempo de recorrência de 46 anos, bem como também os valores mínimos e máximos das vazões geradas pelo software SisCAH.

Figura 6: Gráfico de Vazões Mínimas, Médias e Máximas.



Fonte: Elaborado pelo autor (2021).

O programa ajustou os dados utilizando o ajuste da função Weibull nos valores de vazões mínimas e log normal tipo 3 para os valores de vazões máximas.

Os demais valores foram devidamente coletados, calculados, processados conforme metodologia descrita na Seção 3. Os dados se encontram na Tabela 4 abaixo.

Para todos os cenários o valor usado para K1 foi de $0,35 \text{ dia}^{-1}$, pois corresponde ao coeficiente de desoxigenação aproximado de um esgoto bruto concentrado.

Tabela 4: Valores de entrada do Rio para o modelo de autodepuração.

Parâmetros	Valores médios	
	Seca	Cheia
DBO (mg/L)	1,21	0,26
OD (mg/L)	6,72	5,13
Qr (m³/s)	3410,60	21748,87
Ar (m²)	4081,13	12513,73
vr (m/s)	0,84	1,74
T (°C)	27,89	27,89
Cs (mg/L)	7,74	7,74
K2 (dia⁻¹)	0,69	0,46

Fonte: Elaborado pelo Autor (2021).

4.2 Simulações de Autodepuração

Foram realizadas simulações para três cenários no Rio, com lançamentos de esgotos de 100, 500 e 1000 mg/L de DBO, todos com vazão de 1 m³/s. O valores são altos por se tratar de um Rio com grande vazão que, hipoteticamente, suporta mais cargas orgânicas.

Os cenários de despejos de efluentes foram simulados respeitando a sazonalidade do Rio Madeira, um para a vazão média de longa duração e outro para a vazão crítica (por se tratar de um Rio que possui um alto índice de vazante).

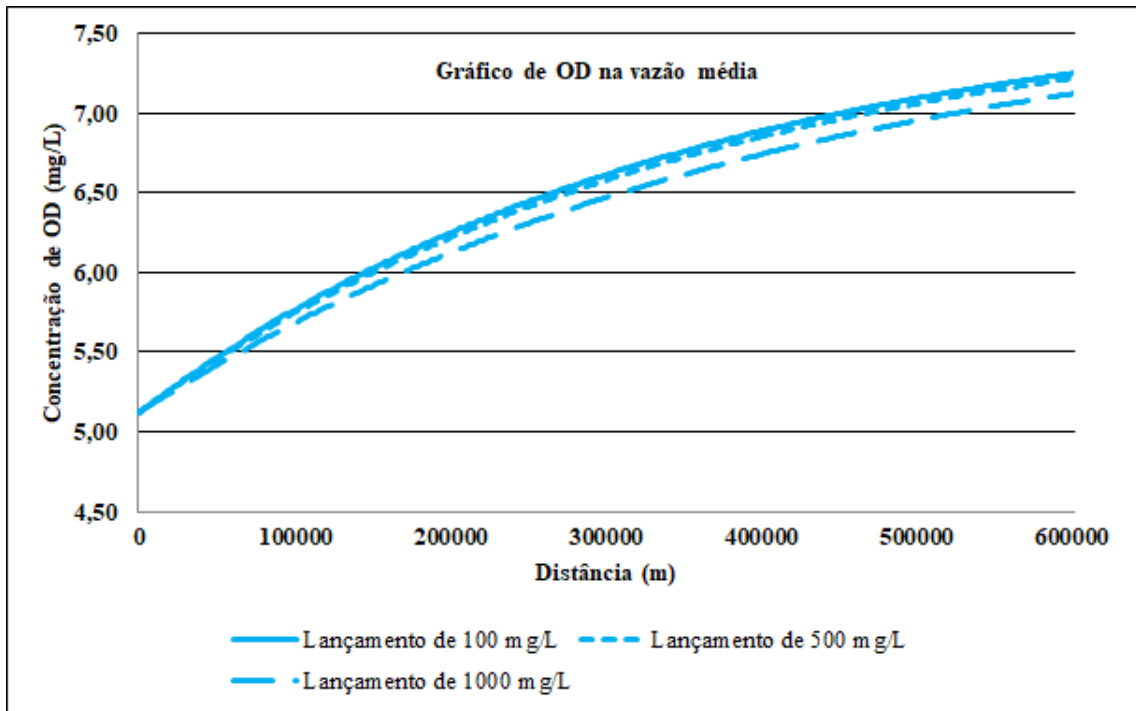
O código completo da programação está disponível no Apêndice B para uso e consulta.

As simulações foram feitas usando a programação criada em Scilab (Apêndice B) na sequência, os resultados obtidos foram levados ao Excel para a confecção de gráficos. Na Figura 7 podemos ver os resultados das simulações de Oxigênio dissolvido para a vazão média do trecho estudado do Rio Madeira.

A baixa concentração de oxigênio dissolvido no período de cheia se dá, principalmente, pela alta presença de sedimentos no Rio nesse período. Isso faz com que a luz solar penetre com maior dificuldade, diminuindo a capacidade de realização de fotossíntese pelos produtores primários, conforme analisa Silva (2012).

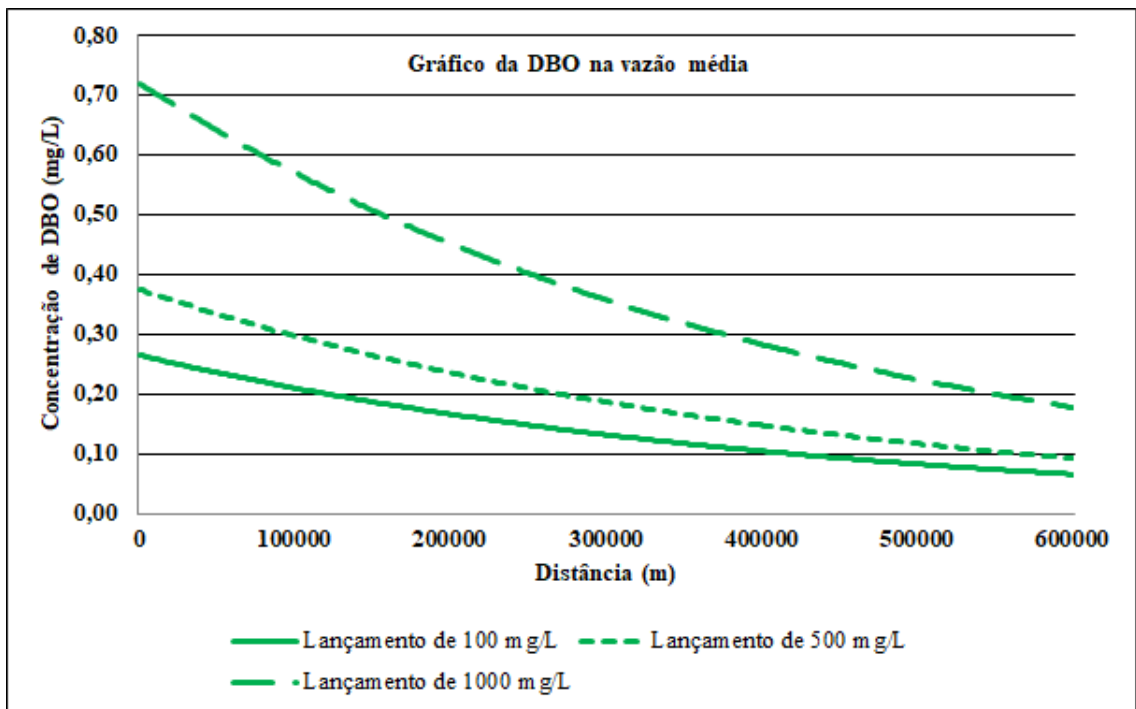
Na Figura 8, é mostrada a DBO na vazão média. Pode-se notar que as diferentes cargas não resultaram em efeito significativo nas concentrações estudadas, principalmente nos valores de OD. Na DBO, o lançamento de 1000 mg/L do efluente fez com que a DBO do Rio a jusante do lançamento aumentasse de 0,26 para 0,72 mg/L.

Figura 7: Gráfico de OD na vazão média para os diferentes cenários



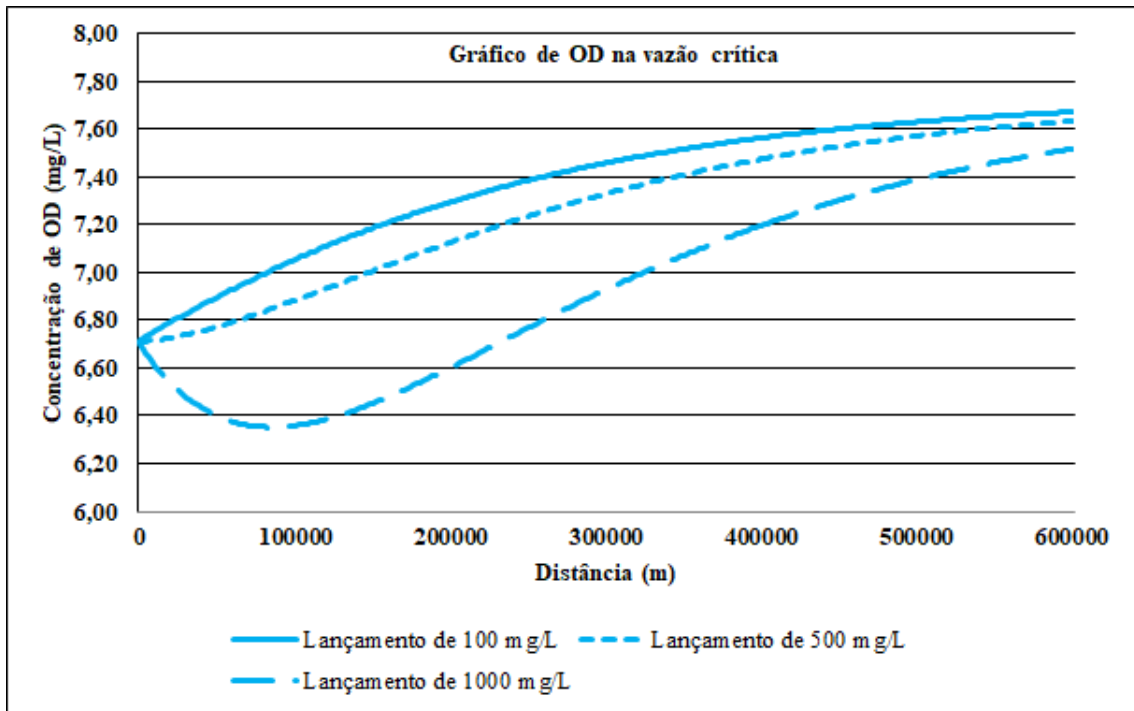
Fonte: Elaborado pelo autor (2021).

Figura 8: Gráfico de DBO na vazão média para os diferentes cenários



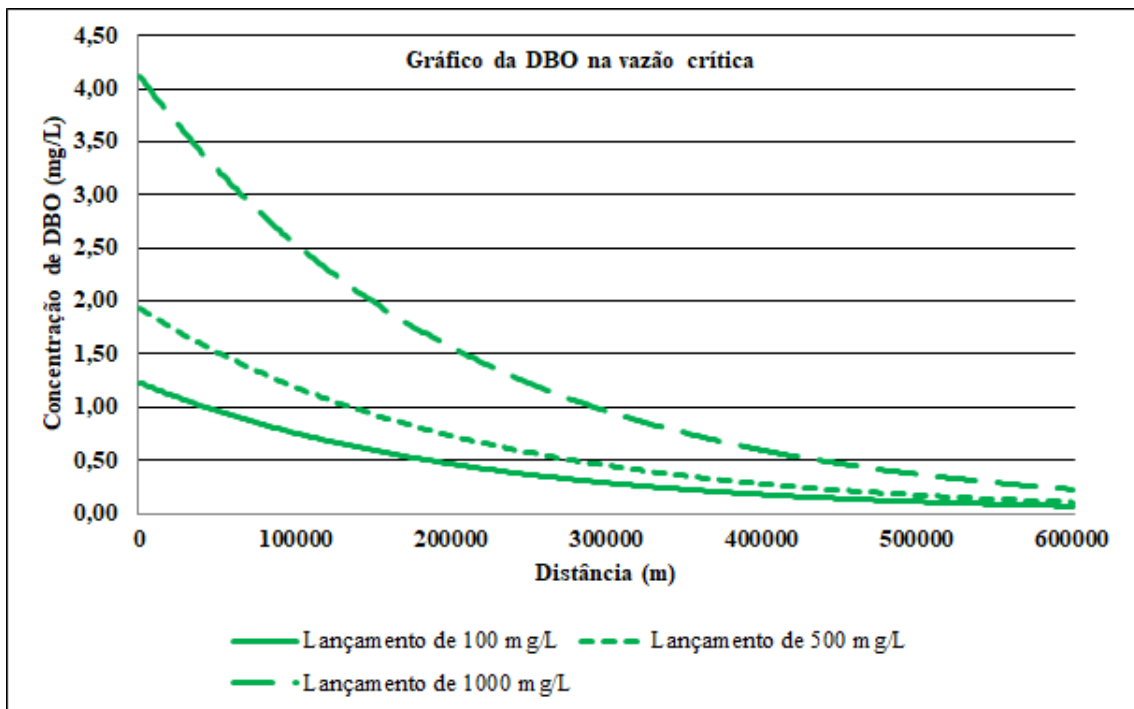
Fonte: Elaborado pelo autor (2021).

Figura 9: Gráfico de OD na vazão crítica para os diferentes cenários



Fonte: Elaborado pelo autor (2021).

Figura 10: Gráfico de DBO na vazão crítica para os diferentes cenários



Fonte: Elaborado pelo autor (2021).

O pequeno valor na DBO está relacionado com a alta vazão do Rio nos períodos de cheia pois, mesmo com as inundações que o Rio causa nessa época, trazendo consigo a matéria orgânica da vegetação, como folhas e troncos, essa matéria orgânica está misturada na grande quantidade de água devido a vazão do Rio, que é de 21748,87 m³/s, fazendo com que o valor encontrado seja baixo.

Na Figura 9 nota-se que o lançamento de 1000 mg/L diminuiu o valor de OD de 6,72 para 6,35 mg/L. A vazão mínima $Q_{7,10}$ do Rio é de 3410,60 m³/s, valor muito abaixo dos 21748,87 m³/s encontrado na vazão média. Essa grande diferença entre as vazões fator foi fundamental nos diferentes consumos de oxigênio entre a vazão e média e a vazão crítica.

Embora o maior lançamento tenha consumido o maior valor de OD, causando a maior depleção desse oxigênio, não houve diferença significativa. Diferente do que acontece nas maiores vazões, no período de estiagem existem poucos sedimentos no Rio, facilitando a entrada de luz solar e conseqüentemente a criação do oxigênio pelos produtores primários, diferente do que ocorre na vazão média.

Conforme mostrado no gráfico da Figura 10, o lançamento de 1000 mg/L foi o que mais afetou o valor de DBO do Rio, que aumentou de 1,20 para 4,12 mg/L.

A DBO na época de vazante está mais alta que nas vazões médias do Rio, fenômeno que ocorre em decorrência da grande quantidade de matéria orgânica que é carregada pelo Rio na época de cheia através de suas inundações. Essa matéria orgânica, composta principalmente de galhos, folhas e troncos, se acumula na época de vazante. Como a vazão nessa época é bem menor, o valor de DBO encontrado no Rio aumenta.

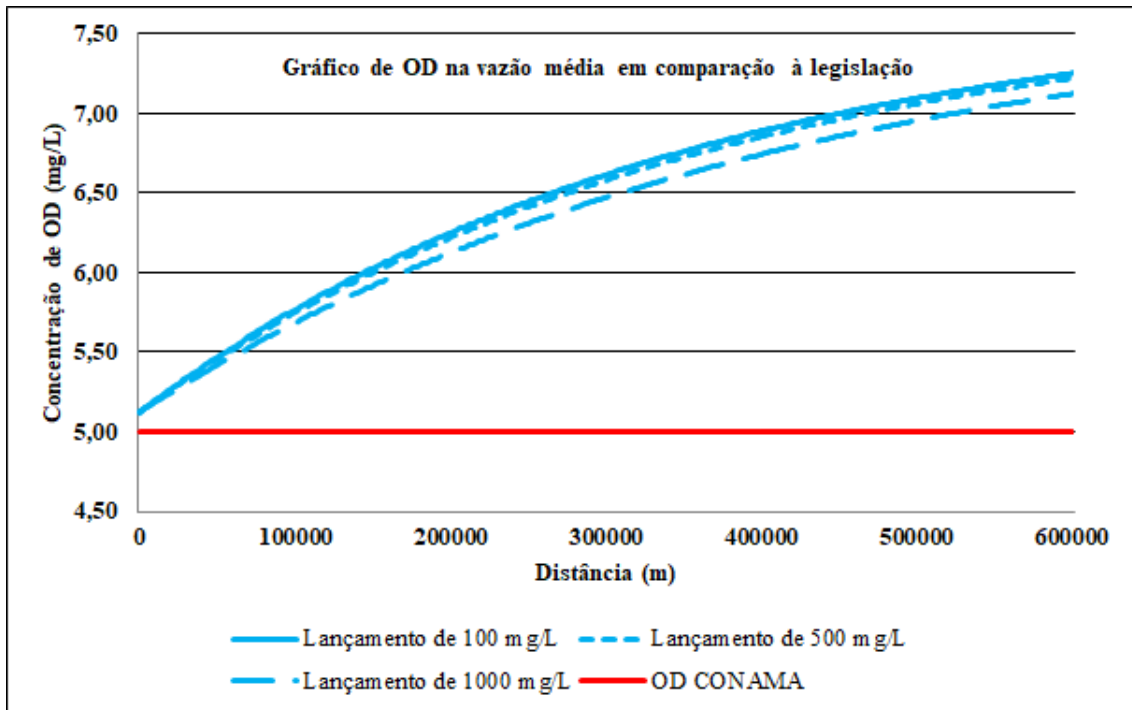
4.3 Avaliação dos padrões de lançamento de efluentes de acordo com a legislação

De acordo com a Resolução nº 357 de 2005 do Conama, o Rio Madeira se enquadra como um Rio de classe II. Sendo assim, a concentração de oxigênio dissolvido no Rio não pode ser menor que 5 mg/L. Concentrações abaixo do permitido podem trazer complicações para os ecossistemas que vivem no Madeira, pois haverá dificuldade na respiração dos seres vivos.

O Conama também limita que a DBO não deve ser maior que 5 mg/L, pois a decomposição de matéria orgânica está diretamente relacionada com o consumo de oxigênio nos corpos hídricos. Normalmente, quanto maior a concentração de DBO, maior a necessidade das bactérias

consumirem o oxigênio disponível na água para realizar sua digestão.

Figura 11: Gráfico de OD na vazão média em comparação à legislação



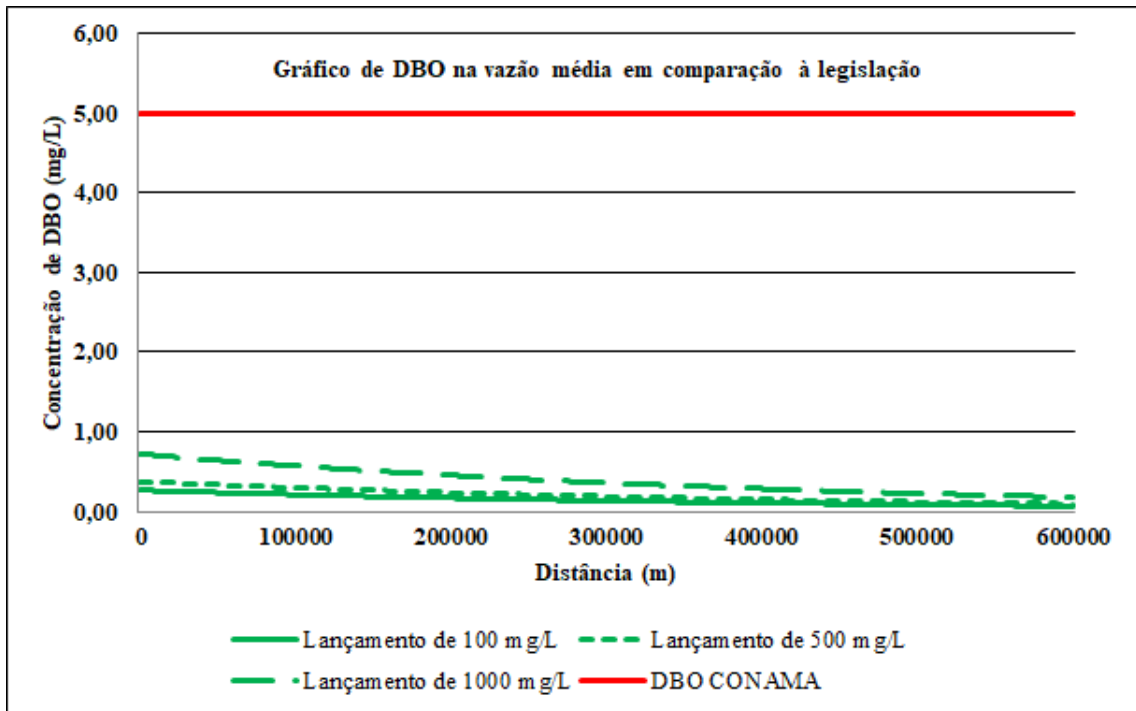
Fonte: Elaborado pelo autor (2021).

No gráfico da Figura 11 observam-se as concentrações de OD em relação ao máximo permitido. Para a vazão média do Rio, o valor mais crítico foi o de OD. Embora ainda tenha ficado acima do permitido pela legislação com valor mínimo de 5,12 mg/L. A DBO, por outro lado, está bem abaixo do máximo permitido. A concentração máxima de DBO encontrada na simulação para esse período foi de 0,72 mg/L.

De acordo com Von Sperling (2014), "A vazão mínima é utilizada para [...] a avaliação do atendimento aos padrões ambientais do corpo receptor, para a alocação de cargas poluidoras e para a concessão de outorgas de captação e de lançamento". É nas condições críticas de um Rio que se obtêm a determinação da eficiência no tratamentos de esgotos que deve ser realizada antes do seu lançamento, pois refletem períodos de estiagem e vazão mínima, fazendo a capacidade de diluição do Rio diminuir.

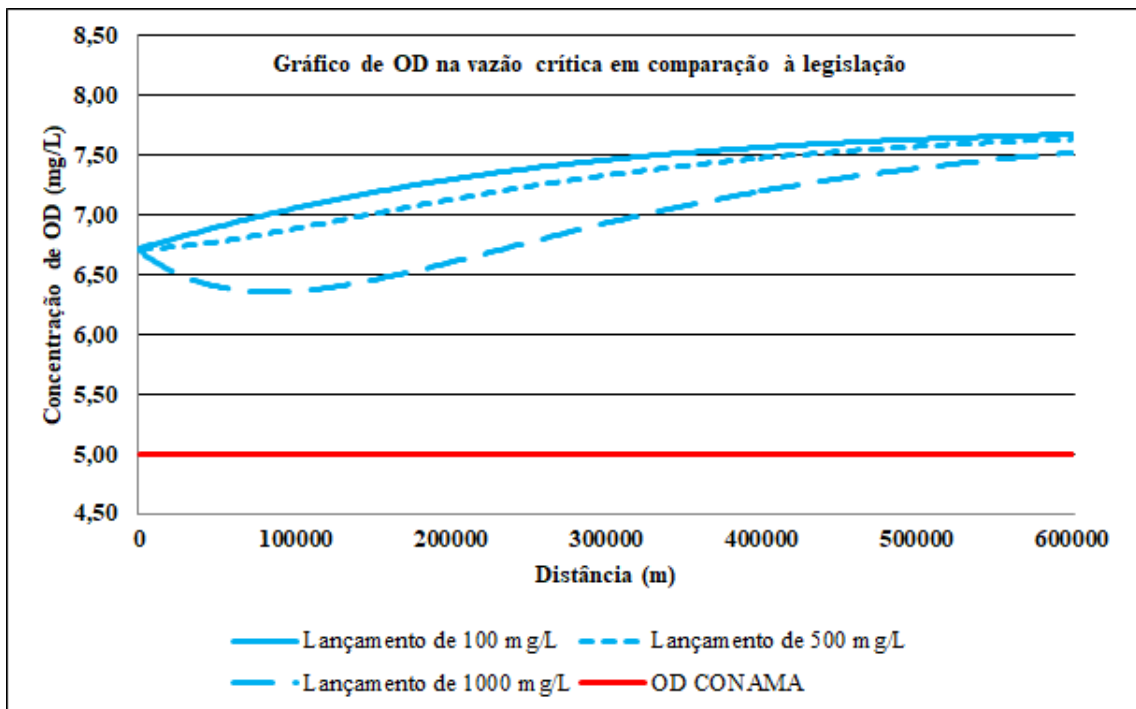
Portanto, no gráfico da Figura 13, consegue-se observar que o menor valor de OD (6,35 mg/L) ainda continua distante do valor mínimo permitido. O mesmo ocorre com a DBO, como mostrado no gráfico da Figura 14, mesmo em um ambiente de vazão crítica, o Rio mostrou ter vazão suficiente para diluir a DBO lançada, assim o valor máximo de 4,12 mg/L após a diluição, ainda está abaixo do máximo permitido pela resolução.

Figura 12: Gráfico de DBO na vazão média em comparação à legislação



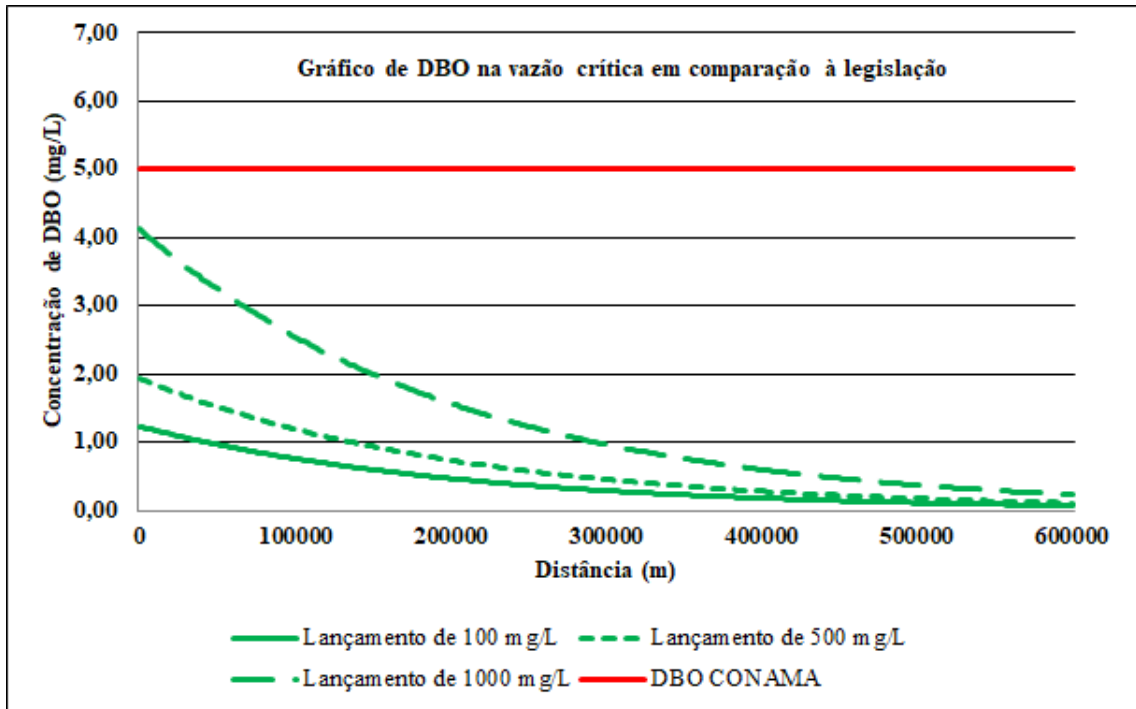
Fonte: Elaborado pelo autor (2021).

Figura 13: Gráfico de OD na vazão crítica em comparação à legislação



Fonte: Elaborado pelo autor (2021).

Figura 14: Gráfico de DBO na vazão crítica em comparação à legislação



Fonte: Elaborado pelo autor (2021).

Em todas as simulações, o Rio retorna, ou começa a retornar, à sua zona de águas limpas com aproximadamente 600 km, ou seja, menos da metade de sua extensão. Se usarmos a velocidade encontrada nos diferentes períodos podemos calcular a quantidade de dias que o Rio consegue se recuperar totalmente do despejo. Na vazão média, esse valor é de aproximadamente 4 dias, já na vazão crítica é de pouco mais de 8 dias.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Apesar das poucas pesquisas realizadas no Rio Madeira, principalmente do trecho próximo a cidade de Humaitá, foram obtidos ótimos resultados com os valores encontrados nas bibliografias.

Alguns valores de entrada tiveram que ser obtidos através do processamento de dados da estação fluviométrica presente no município. Esses valores já processados ajudarão futuros pesquisadores que estiverem estudando o Rio Madeira, principalmente por se tratarem de valores provenientes de dados de séries históricas, que não se alteram facilmente.

O Rio Madeira mostrou possuir uma alta capacidade de autodepuração. Mesmo o lançamento mais alto de 1000 mg/L a uma vazão de 1 m³/s conseguiu ser depurado pelo Rio em menos de 600 km.

Na vazão média, em 4 dias houve o retorno do corpo hídrico à zona de águas limpas. Na vazão crítica, esse tempo foi de aproximadamente 8 dias. Esse poder autodepurativo vem principalmente pela alta vazão e velocidade desse Rio, que facilita a diluição da DBO e a reaeração do Oxigênio dissolvido.

O programa gerado no Scilab, mostrou-se eficiente para realizar os cálculos necessários. Por ser interativo, houve facilidade na hora de simular os diferentes cenários para todas as simulações. Espera-se que seja usado em outros estudos de autodepuração.

O modelo de Streeter-Phelps se mostrou adequado para o estudo no Rio Madeira. Mesmo conseguindo trabalhar com muitos dados de entrada e com diferentes variáveis, ele consegue também ser ideal para quando se tem poucos dados para análise ou quando se possui poucos dados de entrada. O que acontece com grande parte dos Rios da região sul do Amazonas.

Através da avaliação das simulações de acordo com os padrões de lançamento, concluiu-se que os órgãos ambientais podem flexibilizar os lançamentos de efluentes no Rio Madeira, pois os lançamentos não afetaram os valores de OD e DBO além dos limites estabelecidos.

Contudo, existem outros pontos importantes a se levar em consideração para determinar a poluição e/ou contaminação de um corpo d'água. Embora a pesquisa tenha tomado como referência apenas a OD e a DBO, o programa criado pode ajudar futuros pesquisadores em

simulações de autodepuração, não somente do Rio Madeira. Podendo ser adaptado a outros parâmetros de qualidade de rios como pH, temperatura, metais pesados, coliformes termotolerantes e nitrogênio.

REFERÊNCIAS

- ASSIS, F. D.; BUFFON, F. T. **Levantamento Batimétrico Do Rio Madeira Na Área Urbana De Porto Velho Após a Cheia Histórica De 2014**. Brasília: XXI Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, 2014. 1–8 p.
- BRAGA, B. **Introdução à Engenharia Ambiental**. 2. ed. São Paulo: Pearson Prentice Hall, 2005.
- BRASIL. **Lei nº 6.902, de 27 de Abril de 1981**: Dispõe sobre a criação de estações ecológicas, Áreas de proteção ambiental e dá outras providências. 1981.
- BRASIL, A. N. d. **Atlas Esgotos: Despoluição de bacias hidrográficas**. Brasília: ANA, 2017.
- CERH, C. E. d. R. H. **Resolução nº 01, de 19 de julho de 2016**: Estabelece critérios técnicos a serem utilizados pelo ipaam para o processo de análise de pedido de outorga do direito de uso de recursos hídricos de domínio do estado do Amazonas. Manaus: Conselho Estadual de Recursos Hídricos, 2016.
- COBRAPE, C. B. d. P. e. E. **Relatório de Análise do Conteúdo dos Estudos de Impacto Ambiental (EIA) e do Relatório de Impacto Ambiental (RIMA) dos Aproveitamentos Hidrelétricos de Santo Antônio e Jirau, no Rio Madeira, Estado de Rondônia**. Porto Velho, 2006. 816 p. Disponível em: <https://cidades.ibge.gov.br/brasil/ro/porto-velho/panorama>. Acesso em: 02 out. 2021.
- CONAMA, C. N. d. M. A. **Resolução nº 357, de 15 de junho de 2005**: 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. Brasília: Conama, 2005.
- _____. **Resolução 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. Brasília: Conama, 2011.
- HIDROWEB. **Sistemas de informações hidrológicas**. [S.l.]: Versão 3.2.6. [S.l.]: Agência Nacional de Águas, 2005. Disponível em: <https://www.snirh.gov.br/hidroweb>. Acesso em: 03 set. 2021.
- HORBE, A. M. C. et al. Geoquímica das águas do médio e baixo rio Madeira e seus principais tributários - Amazonas - Brasil. **Acta Amazonica**, v. 43, n. 4, p. 489–504, 2013.
- IBGE. **População estimada para 2021**. 2021. Disponível em: <https://cidades.ibge.gov.br/brasil/am/humaita/panorama>. Acesso em: 28 set. de 2021.
- LIMA, E. V. d. A. **Aplicação do modelo de Streeter-Phelps na análise de concessão de outorgas de lançamento de efluentes em Rios naturais**. Fortaleza: Dissertação de Mestrado. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal do Ceará, 2011. 96 p.

MAFRA, A. C. O. **Produção de ácido glucônico e xarope de frutose a partir de sacarose catalisada por enzimas em reator airlift**. São Carlos: Dissertação de Mestrado. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química da Universidade Federal de São Carlos, 2013. 122 p.

MICROSOFT. [S.l.]: Versão 14.0.4760.1000. [S.l.]: Microsoft, 2010.

SCARIOT, M. R. **Modelagem e Simulação Sistêmica de Rios**: Avaliação dos impactos ambientais no rio mogi-guaçu/sp. Campinas: Tese de Doutorado. DEA - Universidade Estadual de Campinas, 2008. 200 p.

SCILAB. **Open source software for numerical computation**. [S.l.]: Versão 6.1.0. [S.l.]: Scilab Enterprises, 2019. Disponível em: <https://www.scilab.org/>. Acesso em: 15 ago. 2021.

SILVA, L. M. da. **Estudo da correlação entre o oxigênio dissolvido e a matéria orgânica em diferentes ambientes aquáticos da Região Amazônica**. Manaus: Dissertação de Mestrado. PPGQ - Universidade Federal do Amazonas, 2012. 100 p. Disponível em: <http://tede.ufam.edu.br/handle/tede/3341>. Acesso em: 13 set. 2021.

SIOLI, H. **Hydrochemistry and geology in the Brazilian Amazon region**. [S.l.]: Amazoniana, 1968. 3–277 p.

SISCAH. **Sistema Computacional para Análise Hidrológica**. [S.l.]: Versão 1.0. [S.l.]: Grupo de Pesquisa em Recursos Hídricos da Universidade Federal de Viçosa, 2009. Disponível em: <http://www.gprh.ufv.br/?area=softwares>. Acesso em: 20 set. 2021.

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

APÊNDICE A

Na página a seguir está disponibilizado o relatório parcial de vazões gerado pelo SisCAH.

RELATÓRIO

Vazões médias anuais

Técnico responsável: Marlison Willames Neto

Código da estação: 15630000

Período: 1968 - 2013

Início do ano hidrológico: Janeiro

Vazão média de longa duração: 21748,8681 m³/s

Ano	Vazão Média(m ³ /s)	Dias válidos
1968	13485,00	366
1969	15147,48	365
1970	16189,20	365
1971	16710,80	365
1972	19355,20	366
1973	21384,12	365
1974	22466,86	365
1975	21031,30	365
1976	20554,68	366
1977	22139,38	365
1978	21835,76	365
1979	23047,22	365
1980	20031,29	366
1981	20548,84	365
1982	27893,37	365
1983	21480,74	365
1984	25311,41	366
1985	22339,11	365
1986	25572,65	365
1987	18431,45	365
1988	21155,71	366
1989	19415,03	365
1990	0	0
1991	22520,76	365
1992	28399,40	366
1993	32025,05	365
1994	22906,27	365
1995	21061,41	365
1996	20250,21	366
1997	26832,59	365
1998	20261,52	365
1999	20565,58	365
2000	19227,06	366
2001	23650,32	365
2002	20750,26	365
2003	20417,46	365
2004	19933,92	366
2005	18189,40	365
2006	23368,25	365

Ano	Vazão Média(m³/s)	Dias válidos
2007	24142,11	365
2008	25597,43	366
2009	24383,77	365
2010	20090,05	365
2011	21253,48	365
2012	22729,42	366
2013	24630,32	365

APÊNDICE B

Na página a seguir está disponibilizado a programação completa criada no software Scilab.

```

0001 // Programa interativo para executar o modelo de Streeter Phelps
0002 // Criado por Marlison Williames Neto
0003 //
0004 clear;
0005 clc;
0006 mode(0); // Vírgula ou ponto
0007 xdel(winsid()); // Fechar janelas de gráficos aberta
0008 //
0009 mprintf("Digite os valores das Vazões do rio e do efluente \n");
0010 Qr=input("Q do rio em m³/s: ");
0011 Qe=input("Q do efluente em m³/s: ");
0012 //
0013 mprintf("Digite os valores das DBO últimas do rio e do efluente \n");
0014 Lr=input("L do rio em mg/L: ");
0015 Le=input("L do efluente em mg/L: ");
0016 //
0017 mprintf("Digite os valores das concentrações de O2 do rio e do efluente
\n");
0018 CO2r=input("CO2 do rio em mg/L: ");
0019 CO2e=input("CO2 do efluente em mg/L: ");
0020 //
0021 mprintf("Digite o valor da Área da seção transversal do rio \n");
0022 Ar=input("A do rio em m²: ");
0023 //
0024 mprintf("Digite os valores das constantes de desoxigenação e reaeração do
efluente e do rio \n");
0025 K1=input("k1 do efluente em dia⁻¹: ");
0026 K2=input("k2 do rio em dia⁻¹: ");
0027 //
0028 mprintf("Digite o valor da Concentração de saturação de O2 \n");
0029 Cs=input("CS do rio em mg/L: ");
0030 //
0031 mprintf("Digite o valor limite de OD e DBO conforme resolução \n");
0032 lod=input("Limite de OD em mg/L: ");
0033 ldbo=input("Limite de DBO em mg/L: ");
0034 //
0035 //
0036 u=(Qr/Ar); // Velocidade de escoamento do rio
0037 Dr=(Cs-CO2r); //Déficit de Oxigênio no rio
0038 De=(Cs-CO2e); // Déficit de Oxigênio no efluente
0039 Qm=(Qr+Qe); // vazão após a mistura
0040 Lm=(Lr*Qr+Le*Qe)/Qm; // DBO última após a mistura
0041 CO2m=(CO2r*Qr+CO2e*Qe)/Qm; // Concentração de O2 após a mistura
0042 Dm=(Cs-CO2m); // Déficit de Oxigênio após a mistura
0043 Am=Ar; // Área de seção transversal da mistura
0044 um=(Qm/Am); // Velocidade da mistura
0045 K1s=(K1/86400); // Convertendo para segundos
0046 K2s=(K2/86400); // Convertendo para segundos
0047 //
0048 //
0049 mprintf("////////////////////RESULTADOS PARCIAIS////////////////////\n\n");
0050 mprintf("Velocidade de escoamento do Rio (u): %.2f",u);
0051 mprintf(" m/s\n");
0052 mprintf("Déficit de Oxigênio no rio (D): %.2f",Dr);
0053 mprintf(" mg/L\n");

```

```

0054 fprintf("Déficit de Oxigênio no efluente (D): %.2f",De);
0055 fprintf(" mg/L\n");
0056 fprintf("Vazão após a mistura (Q): %.2f",Qm);
0057 fprintf(" m³/s\n");
0058 fprintf("DBO última após a mistura (L): %.2f",Lm);
0059 fprintf(" mg/L\n");
0060 fprintf("Concentração de O2 após a mistura (Co2): %.2f",CO2m);
0061 fprintf(" mg/L\n");
0062 fprintf("Déficit de Oxigênio após a mistura (D): %.2f",Dm);
0063 fprintf(" m³/s\n");
0064 fprintf("Área da seção transversal após a mistura (A): %.2f",Am);
0065 fprintf(" m\n");
0066 fprintf("Velocidade de escoamento após a mistura (u): %.2f",um);
0067 fprintf(" m/s\n");
0068 fprintf("\n////////////////////////////////////////\n\n");
0069 //
0070 // Gráfico
0071 //
0072 x=[0:2000:600000];
0073 L=(Lm*(exp(-K1s/um*x)));
0074 D=Dm*exp(-K2s/um*x)+K1s*Lm/(K2s-K1s)*(exp(-K1s/um*x)-exp(-K2s/um*x));
0075 C=Cs-D;
0076 yod=(0*x+lod);
0077 ydbo=(0*x+ldbo);
0078 //
0079 // scf(1) e scf(2) se quiser abrir duas janelas de gráfico
0080 plot(x,L,'b',x,D,'r',x,C,'g');
0081 xtitle("MODELO DE AUTODEPURAÇÃO DE STREETER-PHELPS")
0082 legend("DBO (m/L)", "DO2 (m/L)", "OD (m/L)");
0083
0084 scf(1)
0085 plot(x,C,'b',x,yod,'r--');
0086 xtitle("OXIGÊNIO DISSOLVIDO")
0087 legend("OD (m/L)", "OD CONAMA (m/L)");
0088
0089 scf(2)
0090 plot(x,L,'b',x,ydbo,'r--');
0091 xtitle("DBO")
0092 legend("DBO (m/L)", "DBO CONAMA (m/L)");
0093 //

```