



UNIVERSIDADE DA INTEGRAÇÃO INTERNACIONAL DA LUSOFONIA
AFRO-BRASILEIRA
INSTITUTO DE ENGENHARIA E DESENVOLVIMENTO SUSTENTÁVEL
CURSO DE ENGENHARIA DE ENERGIAS

FRANCISCA VALDENUZA ALMEIDA SILVA

**METODOLOGIA DE ESTUDO PARA CONCESSÃO DE OUTORGA DE
LANÇAMENTO DE EFLUENTES A PARTIR DO MODELO
MATEMÁTICO DE STREETER-PHELPS**

ACARAPE – CEARÁ
25 DE OUTUBRO DE 2018

FRANCISCA VALDENUZA ALMEIDA SILVA

**METODOLOGIA DE ESTUDO PARA CONCESSÃO DE OUTORGA DE
LANÇAMENTO DE EFLUENTES A PARTIR DO MODELO
MATEMÁTICO DE STREETER-PHELPS**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao curso de Engenharia de Energias da Universidade da Integração Internacional da Lusofonia Afro-Brasileira como requisito parcial para obtenção do título de bacharel.

Profa. Orientadora Sílvia Helena Lima dos Santos

ACARAPE-CEARÁ
25 DE OUTUBRO DE 2018

Universidade da Integração Internacional da Lusofonia Afro-Brasileira
Sistema de Bibliotecas da UNILAB
Catalogação de Publicação na Fonte.

Silva, Francisca Valdenusa Almeida.

S578m

Metodologia de estudo para concessão de outorga de lançamento de efluentes a partir do modelo matemático de Streeter-Phelps / Francisca Valdenusa Almeida Silva. - Acarape, 2018.
42f: il.

Monografia - Curso de Engenharia de Energias, Instituto de Engenharias e Desenvolvimento Sustentável, Universidade da Integração Internacional da Lusofonia Afro-Brasileira, Redenção, 2018.

Orientador: Profa. Dra. Sílvia Helena Lima dos Santos.

1. Efluentes. 2. Qualidade da água. 3. Modelos matemáticos.
I. Título

CE/UF/BSP

CDD 33.91009813

AGRADECIMENTOS

A esta universidade, seu corpo docente, direção e administração que me deram a oportunidade de adquirir conhecimentos para além do conteúdos do curso de Engenharia de Energias.

À minha orientadora Professora Sílvia Helena Lima dos Santos, pelo suporte no pouco tempo que lhe coube, pelas suas correções e incentivos. Pela amizade desenvolvida ao longo da graduação. Pela oportunidade de ter sido sua aluna e bolsista de pesquisa. Por todo auxílio e conversas que me ajudaram também na formação como ser humano.

Aos meus pais e irmãos, pelo amor, incentivo e apoio incondicional. Pela compreensão por conta do tempo fora de casa. Por todo auxílio e atenção dada a mim que ajudaram a seguir até o final desta jornada.

E a todos que direta ou indiretamente fizeram parte da minha formação, com os quais desenvolvi um laço de amizade, que me ajudaram nas atividades em sala e extrasala, o meu muito obrigado.

EPÍGRAFE

*Eu sei o preço do sucesso: dedicação, trabalho duro,
e uma incessante devoção às coisas que você quer ver
acontecer.*

(Frank Lloyd Wright)

RESUMO

O presente trabalho tratou da análise de uma metodologia para avaliar os impactos causados em rios naturais em duas situações: período seco e chuvoso, no processo de concessão de outorga de efluentes domésticos. Para isso foi desenvolvida uma metodologia com base no modelo matemático de Streeter-Phelps, que permitiu que a vazão de diluição, para cada lançamento, fosse avaliada. As simulações foram realizadas com o auxílio de um programa computacional, em linguagem FORTRAN, que foi desenvolvido para esta pesquisa. De acordo com os resultados, ao observar o comportamento das curvas da Demanda Bioquímica de Oxigênio, verifica-se que a atividade dos microorganismos que demandam oxigênio presente vai se dissipando conforme se afasta dos pontos de lançamento, e os valores de déficit voltam a ser os mesmos que aqueles antes do lançamento. Em outras palavras, ocorre a diluição da nuvem poluente ao longo do rio, de maneira que a distribuição da concentração da Demanda Bioquímica Oxigênio atinja a uniformidade. Sendo, portanto, uma forma de avaliar a qualidade do recurso hídrico de acordo com a variação sazonal, pois também se deseja a manutenção do mesmo dentro de padrões estabelecidos pelos órgãos ambientais competentes. Pretende-se usar este estudo para auxiliar na gestão das águas, fazendo o controle quantitativo e qualitativo e garantindo outros usos que podem ser feitos.

Palavras-chave: Modelagem Matemática. Qualidade de Água. Outorga.

ABSTRACT

The present work dealt with the analysis of a methodology to evaluate the impacts caused in natural rivers in two situations: dry and rainy period, in the process of granting the concession of domestic effluents. For this, a methodology was developed based on the Streeter-Phelps mathematical model, which allowed the dilution flow for each launch to be evaluated. The simulations were carried out with the help of a computer program, in FORTRAN language, which was developed for this research. According to the results, observing the behavior of the curves of the Biochemical Oxygen Demand, it is verified that the activity of the microorganisms that demand oxygen present dissipates as it moves away from the launch points, and the values of deficit return to be the same as those before launch. In other words, the dilution of the polluting cloud occurs along the river, so that the concentration distribution of the Biochemical Oxygen Demand reaches uniformity. Therefore, it is a way to evaluate the quality of the water resource according to the seasonal variation, since it is also desired to maintain it within the standards established by the competent environmental agencies. It is intended to use this study to assist in water management, making quantitative and qualitative control and ensuring other uses that can be made.

Keywords: Mathematical Modeling. Water Quality. Grant.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Perfil esquemático da concentração da matéria orgânica, bactérias decompositoras e oxigênio dissolvido	18
Figura 2. Relação entre as variáveis L_0/D_0 e k_2/k_d e o perfil do oxigênio.	24
Figura 3. Localização do Rio Potengi e sua Bacia Hidrográfica.....	25
Figura 4. Comportamento da DBO lançada na seção de origem do rio.	31
Figura 5. Comportamento do déficit de OD após o lançamento da carga de DBO.....	32
Figura 6. Comportamento da concentração de OD após o lançamento da carga de DBO.	33
Figura 7. Comportamento da DBO lançada na seção de origem do rio.	34
Figura 8. Comportamento do déficit de OD após o lançamento da carga de DBO.....	34
Figura 9. Comportamento da concentração de OD após o lançamento da carga de DBO.....	35
Figura 10. Quadro comparativo entre os períodos chuvoso e seco. Parâmetro: Concentração de DBO.	36
Figura 11. Quadro comparativo entre os períodos chuvoso e seco. Parâmetro: Concentração de Déficit de OD.....	37
Figura 12. Quadro comparativo entre os períodos chuvoso e seco. Parâmetro: Concentração de Concentração de OD.....	37

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Comportamento da concentração de OD após o lançamento da carga de DBO.	16
Tabela 2. Dados dos parâmetros utilizados nas simulações.	30

LISTA DE SIGLAS

ANA – Agência Nacional das Águas

CNRH – Conselho Nacional de Recursos Hídricos

COGERH – Companhia de Gestão de Recursos Hídricos do Estado do Ceará

CONAMA – Conselho Nacional de Meio Ambiente

DBO – Demanda Bioquímica de Oxigenio

FUNASA – Fundação Nacional de Saúde

MMA – Ministério do Meio Ambiente

OD – Oxigenio Dissolvido

SEMARH – Secretaria Estadual do Meio Ambiente e dos Recursos Hídricos do Estado do Rio Grande do Norte

UFMG – Universidade Federal de Minas Gerais

USEPA – *United States Environmental Protection Agency*

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	11
1.1. Objetivo da Pesquisa	12
1.2. Organização do Trabalho.....	12
2 REFERENCIAL TEÓRICO	14
2.1. Legislação Importante para a Gestão de Recursos Hídricos.....	14
2.2. Plano Nacional de Recursos Hídricos (Lei Federal nº 9433/1997).....	14
2.2.1. Outorga.....	14
2.3. Resolução Conama 357/2005.....	16
2.4. Poluição por matéria orgânica e a autodepuração de rios	17
2.5. Metodologias de Estudo de Qualidade de Água.....	19
2.5.1. Modelo Matemático QUAL2E	19
2.5.2. Modelo Matemático CE-QUAL-W2	20
2.5.3. Modelo matemático QUAL-UFMG	21
2.6. Modelo Matemático de Streeter-Phelps.....	21
2.6.1. Coeficiente de desoxigenação (k_1)	22
2.6.2. Demanda Bioquímica por Oxigênio (DBO).....	22
2.6.3. Coeficiente de reaeração (k_2).....	22
2.6.4. Oxigênio Dissolvido (OD).....	23
2.6.5. Curva de depleção	23
3 METODOLOGIA	25
3.1. Rio em Estudo	25
3.2. Modelo de Streeter-Phelps.....	26
3.3. Programa Computacional	28
4 RESULTADOS	30
5 CONCLUSÕES	39
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	40

1 INTRODUÇÃO

Os rios são a principal destinação dos esgotos brutos ou mesmo tratados. Tanto no estudo de impacto dos efluentes, quanto em processos de licenciamento ou planejamento para o uso de recursos hídricos têm-se que levar em consideração o comportamento do esgoto e do rio.

Uma das formas que se encontrou para avaliar o impacto dos efluentes, e intervir com soluções que o controlem ambientalmente, é a utilização de modelos matemáticos de qualidade de água. Os rios são complexos para detalhar com precisão todas as variáveis que interferem nos estudos, e para isso, são feitas simplificações para se obter um resultado válido e satisfatório.

O presente trabalho se propôs a estudar um rio no Nordeste Brasileiro, o rio Potengi/RN, avaliando os cenários de seca e de chuvas através do modelo matemático de Streeter-Phelps com auxílio de ferramenta computacional e baseado na principal característica das cargas poluidoras, a matéria orgânica. Dependendo do resultado obtido, este poderá servir de base para a concessão de outorga para uso da água.

Ao estudar as relações entre os processos de concessão de outorga para lançamentos de efluentes em uma região escassa em recursos hídricos como o Nordeste, é de fundamental importância, não somente, para que se tenha um mapa da capacidade de assimilação dos corpos hídricos, aos lançamentos de efluentes, como o desenvolvimento de uma metodologia capaz de responder a estes questionamentos.

A outorga para assimilação de efluentes, conforme consta na Lei Federal nº. 9.433/97, de modo geral, visa assegurar o controle qualitativo e quantitativo do uso da água. A outorga prevista em lei só trata a outorga como instrumento da Política Nacional de Recursos Hídricos em que seu inciso III no artigo 12 trata que o lançamento de efluentes nos corpos hídricos estão sujeitos à outorga pelo poder público. Conforme artigo 14, a outorga será concedida pela autoridade competente que tem jurisdição sobre o corpo hídrico, e pode ser a União, os Estados ou Distrito Federal.

Ao se emitir uma outorga, o volume outorgado fica indisponível, total ou parcialmente, para outros usos no corpo hídrico em que é feita a captação ou diluição e nos corpos hídricos situados a jusante, considerada a capacidade de autodepuração.

1.1. Objetivo da Pesquisa

Objetivo Geral

Desenvolver metodologia de estudo, com base no Modelo Matemático de Streeter-Phelps, combinado com a Legislação Brasileira, para estudar a capacidade de autodepuração dos rios de Nordeste Brasileiro na Concessão de Outorga de Lançamentos de Efluentes.

Objetivos Específicos

- ✓ Desenvolver uma metodologia que permita a combinação da teoria de transporte de poluentes que possa ser aplicado em rios naturais;
- ✓ Estudar todos os parâmetros pertinentes ao modelo matemático proposto;
- ✓ Desenvolver um programa computacional que permita a realização de simulações para vários cenários propostos;

1.2. Organização do Trabalho

O trabalho segue a seguinte estrutura:

- Capítulo 1 - Descreve a introdução do trabalho, seus objetivos e mostra como o mesmo foi organizado.
- Capítulo 2 - Apresenta a fundamentação teórica do trabalho, onde é apresentada a legislação que permeia o uso da outorga como instrumento para gerenciamento dos corpos hídricos e que limita os parâmetros que devem ser respeitados mantendo a quantidade e a qualidade. Apresenta as metodologias focando no modelo de Streeter-Phelps que foi a metodologia adotada. Além de estudar as características naturais dos rios.

- Capítulo 3 – Apresenta a metodologia adotada, como foi deduzida as fórmulas para DBO e OD para ser aplicado na simulação computacional em linguagem FORTRAN que se seguiu.
- Capítulo 4 – Apresenta os resultados obtidos das simulações e as análises feitas dos gráficos feitos com os dados de saída.
- Capítulo 5 – Apresenta as conclusões feitas a partir do estudo de legislação, dos resultados e a comparação com o comportamento natural dos rios diante dos cenários e condições utilizadas.
- Capítulo 6 – Apresenta a bibliografia adotada que norteou a pesquisa.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

2.1. Legislação Importante para a Gestão de Recursos Hídricos

Nos estudos de modelagem de qualidade da água, busca-se mediante a algumas considerações, avaliar os sistemas hídricos e prever o comportamento variando os valores de parâmetros e os cenários. As análises levam em consideração a capacidade de autodepuração, neste caso, dos rios.

A partir disso, pode-se tomar decisões sobre projetos de tratamento de água, pois infelizmente não são todos os locais que dispõem de saneamento básico, que muitas vezes tem um custo muito caro, e não raro são as vezes em que o lançamento de esgotos em corpos d'água é realizado, mas vale ressaltar que dependendo do impacto sobre o meio deve-se preservar a qualidade já que também deve se levar em conta os usos múltiplos garantidos por lei.

2.2. Plano Nacional de Recursos Hídricos (Lei Federal nº 9433/1997)

A lei 9344/97 em seu artigo 5º lista os instrumentos utilizados para a gestão de recursos hídricos:

- “I – Planos de Recursos Hídricos;
- II – Enquadramento dos corpos de água em classes, segundo os usos preponderantes da água,
- III – Outorga dos direitos de uso de recursos hídricos;
- IV – Cobrança pelo uso de recursos hídricos;
- V – Compensação a municípios;
- VI – Sistema de Informações sobre Recursos Hídricos;”

Destes instrumentos vale destacar o item III que ainda não possui uma metodologia única para ser concedida. A outorga é uma concessão emitida que garante o uso múltiplo e a qualidade da água em rios da União.

2.2.1. Outorga

A outorga de direito de uso de recursos hídricos compete à Agência Nacional de Águas (ANA) de acordo com a Lei Federal nº 9.984/2000 no Art. 4º, inciso IV que autoriza o uso de corpos hídricos da União e emissão de preventiva, e a mesma também compete sobre a reserva de

disponibilidade hídrica para fins de aproveitamento hidrelétricos com o objetivo de garantir os usos diversos ao longo de rios. (MMA, 2018).

Geralmente, é concedida para o uso de um determinado volume ou vazão feito pela ANA (Agência Nacional de Águas) quando a nível nacional, do contrário, quem concede são os órgãos estaduais e do Distrito Federal. No caso do Ceará a entidade responsável é a COGERH (Companhia de Gestão dos Recursos Hídricos) e no Rio Grande do Norte, onde se localiza o rio estudado, é a SEMARH (Secretaria do Meio Ambiente e dos Recursos Hídricos).

Cabe salientar que quaisquer que sejam os usos de água, toda e qualquer atividade humana que provoque alterações nas características físicas e químicas tais como, volume, cor, cheiro entre outras que alteram o estado natural estão sujeitas a cobranças e autorização pelo uso.

Conforme Resolução N°140/2012 do CNRH (Conselho Nacional de Recursos Hídricos) em seu Artigo 3, item III define: “parâmetros adotados: aqueles definidos pela autoridade outorgante ou pelos respectivos Conselhos de Recursos Hídricos, para ser objeto de análise e de manifestação nos pedidos de outorga, nas suas esferas de atuação;”.

“Art. 4o Na análise dos pedidos de outorga de lançamento de efluentes com fins de diluição em corpos de água superficiais serão observadas: I - as características quantitativas e qualitativas dos usos dos recursos hídricos e do corpo receptor para avaliação da disponibilidade hídrica, levando em consideração os usos outorgados e cadastrados a montante e a jusante da seção em análise; II - as condições e padrões de qualidade, relativos aos parâmetros outorgáveis, referentes à classe em que o corpo de água estiver enquadrado ou às metas intermediárias formalmente instituídas; III - as vazões de referência; IV - a capacidade de suporte do corpo de água receptor quanto aos parâmetros adotados; e V - outras referências tecnicamente justificadas. § 1o As vazões outorgadas para fins de diluição de determinado parâmetro do efluente poderão ser novamente disponibilizadas, em função da capacidade de autodepuração do corpo de água e o respectivo enquadramento, bem como serem utilizadas para a diluição de outros parâmetros adotados.” (BRASIL, 2012)

Mesmo a resolução não define quais os critérios a serem adotados para outorgar o direito de lançamento, cabendo as autoridades que tem o domínio sobre o corpo d’água definir os parâmetros adotados para conceder a outorga para o lançamento de efluentes.

2.3. Resolução Conama 357/2005¹

Em seu artigo 2 a resolução 357/2005 divide as águas do território nacional em função da salinidade²: *doces* ($\leq 0,05\text{‰}$), *salobras* ($0,05\text{‰} \leq x < 3\text{‰}$) e *salinas* ($\leq 3\text{‰}$). Dentro dessas classificações há as classes que corresponde a padrões de qualidade a ser preservada.

Esta resolução, no capítulo 2, prevê os padrões para o lançamento de efluentes nos corpos d'água e isso está intrinsecamente relacionado com os padrões dos corpos receptores. Se o efluente satisfaz as condições de lançamento, mas não do recurso hídrico deve-se ter um tratamento mais rigoroso para ser lançado. Se ocorrer o contrário, poderá ser pelo órgão público responsável autorizado a lançar o efluente com valores acima, sempre respeitando o padrão de qualidade da água.

Ainda na mesma resolução, são definidos numericamente os parâmetros que devem ser observados, tais como: DBO e OD (Oxigênio Dissolvido), que mais adiante serão importantes dentro do modelo matemático utilizado.

Tabela 1. Comportamento da concentração de OD após o lançamento da carga de DBO.

Classes/Limites	Água Doce				Água Salobra				Água Salina				
	Sp ³ .	1	2	3	4	Sp.	1	2	3	Sp.	1	2	3
DBO _{5,20} (mg/L)	-	<3	<5	<10	-	-	-	-	-	-	-	-	-
OD (mg/L)	-	>6	>5	>4	>2	-	>6	>5	>4	-	>5	>4	>3

Fonte: Resolução CONAMA 357/2005.

Conforme a resolução, as águas têm um padrão de qualidade, devendo esta permanecer ao longo do curso e do ano. Portanto, qualquer uso a ser realizado deverá garantir que o impacto seja o menor possível.

¹ Atualizada pela resolução 410/2009 e 430/2011.

² A unidade atualmente mais usada é g/kg, que equivale a partes por mil, cujo símbolo é ‰.

³ Classe especial, que tem seus usos naturais controlados, e que não podem sofrer com poluição.

2.4. Poluição por matéria orgânica e a autodepuração de rios

Em parte dos rios do Nordeste, a principal fonte de poluição dos recursos hídricos, em especial rios, advém do lançamento de efluentes de origem doméstica cuja característica principal é possuir grande carga de matéria orgânica.

Uma vez introduzida no ambiente aquático, os efluentes resultam no consumo de oxigênio dissolvido que dependendo das condições de fluidez e do fenômeno de transporte de massa ao longo do curso, este poderá ter forte impacto, pois espera-se que não fique concentrado no local de lançamento.

A autodepuração é um fenômeno presente em maior ou menor grau nos corpos d'água e está ligada a capacidade dos rios de restabelecer o seu estado original ou a um estado de equilíbrio mesmo após sucessivos despejos de efluentes.

Isso serve de indicador para o grau de impacto das atividades humanas sobre o meio e limitar o lançamento de despejos acima da capacidade daquele recurso específico. É um processo que se desenvolve ao longo do tempo e considerando o rio como predominantemente longitudinal, tem-se 4 zonas desde o lançamento de efluentes até o ponto em que o rio voltou ao seu estado “normal”.

Zona de recuperação: a concentração de matéria orgânica intensamente consumida anteriormente se encontra com carga pequena e estabilizada no meio. Recupera-se o oxigênio a ser dissolvido na água por meio de reaeração atmosférica, superando o que ainda esteja sendo consumido no processo de decomposição.

Zona de águas limpas: nesta zona a água já tem voltado ao seu estado original, principalmente no aspecto de oxigênio dissolvido.

2.5. Metodologias de Estudo de Qualidade de Água

Os modelos matemáticos de qualidade de água tiveram início no século XX por questões de saúde pública relacionado ao saneamento básico. O primeiro e mais conhecido é o de Streeter-Phelps que surgiu no ano de 1925.

O uso de modelos evoluiu conforme as tecnologias, principalmente computacionais, surgiram o que possibilitou uma maior rapidez para obtenção dos resultados. Permitiu a análise de estruturas analíticas de expressões numéricas, geometrias complexas, cinéticas e as variações temporais (FLECK *et al*, 2013).

Os modelos foram incorporando variáveis de acordo com as observações da carga poluente. Se antes, era matéria orgânica de origem animal, hoje se caracteriza em muitos locais com a presença de metais pesados e outros elementos que causam danos ao ambiente aquático.

Cada modelo pode adequar-se melhor a uma situação que outra. Tem as variáveis que analisam e as simplificações para que seja válido. A seguir estão alguns modelos existentes e o porquê da escolha de um em detrimento a outro.

2.5.1. Modelo Matemático QUAL2E

Segundo Reis (2009) “O *QUAL2E* é um modelo matemático desenvolvido pela USEPA que simula o comportamento de vários parâmetros de qualidade de água: oxigênio dissolvido, demanda bioquímica de oxigênio, temperatura, nitrogênio orgânico, amônia, nitrato, nitrito, fósforo orgânico, fósforo dissolvido, coliformes e outros constituintes.” Sendo, portanto, um modelo matemático complexo, adequado para regiões em que há presença de indústrias para estudo das descargas de poluição.

O modelo resolve a equação de balanço de massa por diferenças finitas, substituindo as derivadas parciais de uma equação diferencial por aproximações de diferenças finitas, baseadas em expansões de Taylor. Divide-se a extensão total em trechos que devem possuir características hidráulicas semelhantes.

A simplificação deste modelo advém da consideração de que o rio esteja em estado estacionário, quer dizer, as condições do rio sejam as mesmas ao longo da extensão. Observando-se o comportamento do efluente até atingir um equilíbrio.

O modelo por tratar o rio como sistema unidimensional, desconsidera misturas ao longo do corpo d'água e a previsão de concentrações médias acaba não sendo menor que no ponto de descarga.

Outra variante do modelo *QUAL-2E*, adaptado em planilhas de Excel e mais simplificada. Realiza a modelagem das seguintes variáveis de estado: Demanda Bioquímica de Oxigênio, Oxigênio Dissolvido, Nitrogênio Total e suas frações, Fósforo Total e suas frações e coliformes termotolerantes (fecais) (VON SPERLING, 2007).

2.5.2. Modelo Matemático CE-QUAL-W2

Na parte do modelo que trata de qualidade de água, o modelo simula 18 variáveis de estado entre as quais vale destacar: OD, DBO, sólidos suspensos, fósforo dissolvido, nitrogênio amoniacal, nitratos, alcalinidade, carbono inorgânico total, ferro total e interações cinéticas. E parâmetros indicadores: níveis tróficos bacterianos, coliformes fecais e totais, produtores primários, algas e perifiton e protozoários. Também são levados em consideração a salinidade. (SOUZA, 2006)

Aplicado em geometrias bidimensionais mais complexas, por exemplo, estuários. Permitindo o estudo para sistemas com densidades diferentes como a estratificação natural e para qualquer corpo d'água ligado em série.

O modelo tem limitação para simulações de corpos hídricos rasos e com largas dimensões no plano horizontal. Assume uma hipótese simplificada no cálculo da demanda de oxigênio pelo sedimento.

Os dados necessários para este modelo matemático na parte de qualidade de água envolvem a morfologia do rio (declividade, orientação e largura da seção), Condições de contorno

não-permanente (Vazão, concentração de substâncias dissolvidas e temperatura pontuais e distribuídas), Dados Meteorológicos e parâmetros cinéticos e hidráulicos (SOUZA, 2006).

2.5.3. Modelo matemático QUAL-UFMG

Não inclui as algas e todas as suas interações com os demais componentes. Outras simplificações inseridas são: Não consideração da dispersão longitudinal, integração pelo método de Euler.

2.6. Modelo Matemático de Streeter-Phelps

O modelo proposto em 1925 com o objetivo de calcular a autodepuração e o perfil de oxigênio dissolvido após a lançamento de matéria orgânica por efluentes. Aborda duas variáveis importantes: o consumo de oxigênio por oxidação da matéria orgânica (DBO) e produção de oxigênio pela reaeração atmosférica (OD) (VARGAS, MARQUES, 2015)

O efluente lançado causa inicialmente uma forte depleção (queda dos níveis de oxigênio), o modelo calcula em qual distância o oxigênio dissolvido se recupera por mecanismos naturais. O modelo em questão utiliza o coeficiente de desoxigenação que será descrito mais adiante.

O modelo de Streeter-Phelps é o modelo escolhido devido a sua simplicidade, devido ao uso de dois parâmetros, DBO e OD. Informa sobre a qualidade da água, já que o mais significativo para a existência de vida em ambientes aquáticos. Considerando a aplicação do modelo para o estudo de lançamento de efluentes, o modelo revela-se suficiente, pois a principal característica dos efluentes é a presença de matéria orgânica. Considerar outros parâmetros seria mais importante para o licenciamento.

A partir da equação advectiva, pág.15, desenvolve-se as equações parciais que descrevem o comportamento da DBO e OD que possuem coeficientes que indicam a taxa de oxidação da matéria orgânica e da concentração de OD, respectivamente. Essas equações diferenciais podem ser resolvidas, resultando no modelo matemático de Streeter-Phelps.

2.6.1. Coeficiente de desoxigenação (k_1)

O coeficiente de desoxigenação depende das características da matéria orgânica. Conforme o grau de tratamento do efluente, os valores são mais baixos devido a uma parte da matéria já ter sido degradada. Por isso mesmo, conhecer o comportamento da autodepuração dos rios pode indicar o uso de uma forma de tratamento mais ou menos rigoroso para que uma vez lançado não altere a qualidade.

Indica qual a taxa com a qual a matéria orgânica é oxidada, proporcional a concentração ainda remanescente em um tempo t qualquer. Quanto a maior a concentração de DBO, mais rapidamente será o processo de desoxigenação no corpo hídrico ao longo de sua extensão. Após a estabilização, a reação será reduzida.

2.6.2. Demanda Bioquímica por Oxigênio (DBO)

Demanda Bioquímica de Oxigênio é a quantidade de oxigênio requerida pelos microrganismos decompositores para oxidar a matéria orgânica por decomposição aeróbia para uma forma inorgânica estável. Dependendo da concentração da matéria orgânica, pode ser levado a um completo esgotamento na disponibilidade de oxigênio na água, mesmo com o processo de reaeração (FUNASA, 2014).

Os valores de DBO tem como origem o lançamento de carga orgânica, principalmente esgoto doméstico. Em muitos municípios brasileiros têm essa característica de seus efluentes, e tem os rios como destino final. Valores elevados desta variável significa uma alteração da qualidade e do uso do recurso hídrico.

Indica a taxa em que o oxigênio é dissolvido a partir da interação com a atmosfera, ou seja, proporcionalidade em que se dá a recuperação do corpo hídrico. Sendo este um dos principais indicadores da qualidade, pois mostra se o rio consegue recuperar-se naturalmente.

2.6.3. Coeficiente de reaeração (k_2)

A reaeração é o que fornece ao corpo d'água o oxigênio necessário para a vida no ambiente. Através de trocas gasosas com a atmosfera, onde a água é exposta aos gases e ocorre uma contínua troca de moléculas até que aconteça um equilíbrio (VON SPERLING, 2007).

O coeficiente pode ser definido por vários métodos, mas não é o foco do trabalho. Depende da profundidade e velocidade do curso do rio. Sendo muito importante, pois para o modelo em questão o OD é indicativo da qualidade de água e que por sua vez mostra se há a presença de vida no ambiente.

2.6.4. Oxigênio Dissolvido (OD)

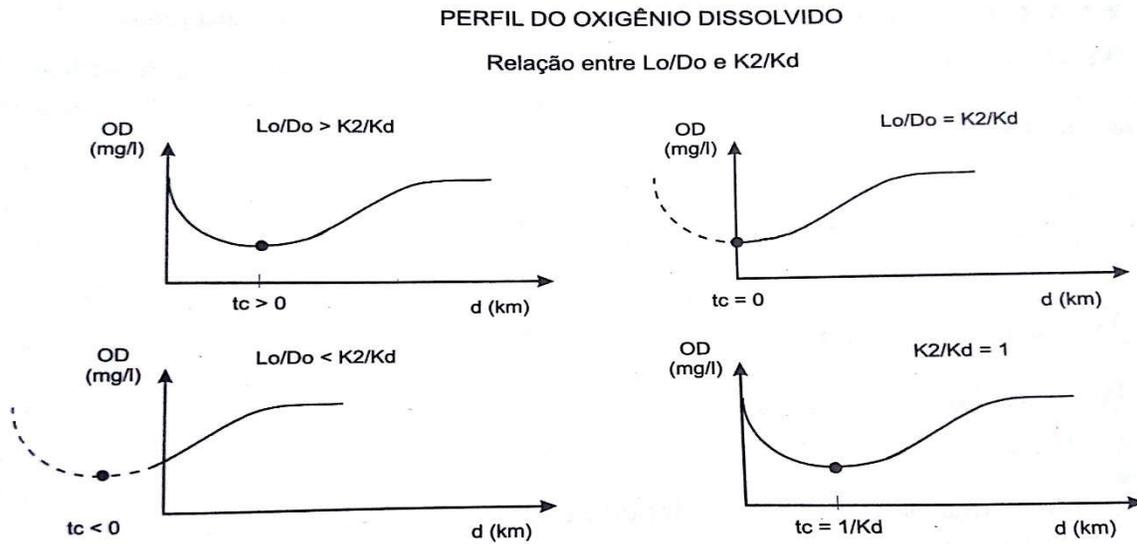
O oxigênio dissolvido é um indicador importante para estabelecer a qualidade de um ambiente aquático que por sua vez, demonstra a capacidade daquele corpo em se recuperar. Indica a quantidade necessária de oxigênio na água que beneficia a sobrevivência dos seres vivos aquáticos (FUNASA, 2014)

A resolução do CONAMA 357/2005 traz os teores mínimos de oxigênio para cada classe de rio. Valores abaixo destes limites mínimos significa que o sistema está seriamente comprometido.

2.6.5. Curva de depleção

A curva de depleção é a base dos gráficos obtidos e informa como as variáveis se comportam ao longo da extensão do rio. A taxa de variação do oxigênio dissolvido é inverso ao deficit de oxigênio, a principio pode ser uma afirmação óbvia, mas o deficit pode continuar a crescer, enquanto o oxigenio pode chegar a um nível tão crítico que impossibilite a autodepuração do meio aquático e decreta com isso a inviabilidade de recuperação.

Figura 2. Relação entre as variáveis Lo/Do e k_2/k_d e o perfil do oxigênio.



Fonte: Von Sperling, 2007

Onde:

Lo é demanda última de oxigênio, logo após a mistura (mg/L)

Do é o déficit inicial de oxigênio, logo após a mistura (mg/L)

K_2 é o coeficiente de reaeração

K_d é o coeficiente de decomposição

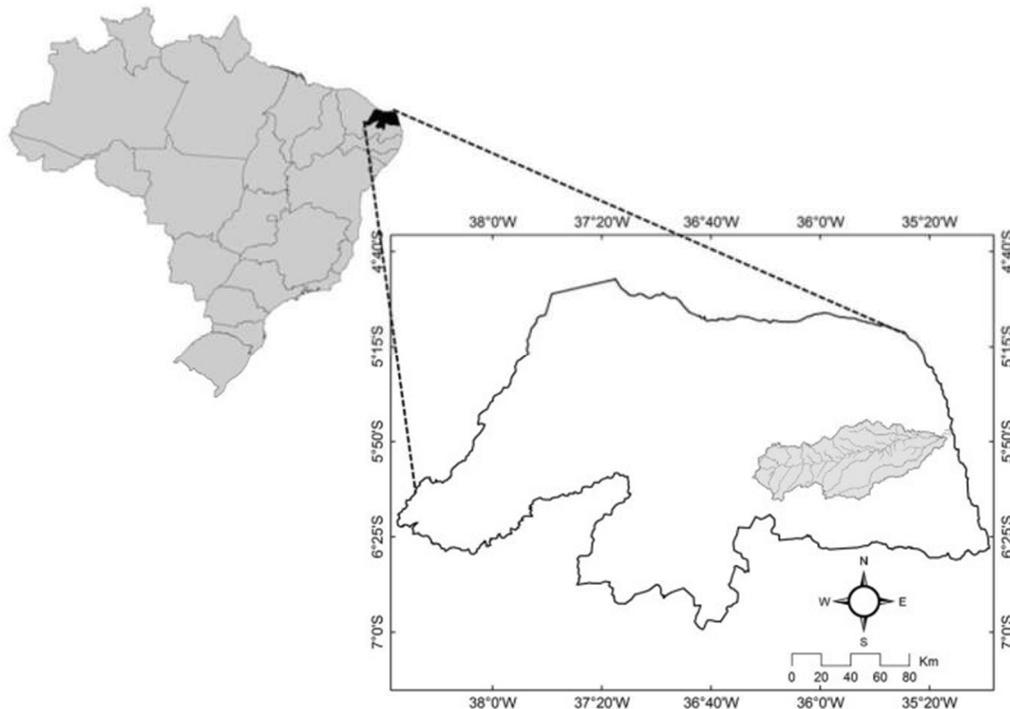
De acordo com a figura 2, os valores de tempo crítico indica a capacidade de autodepuração. Quando positivo, no ponto de lançamento haverá uma queda maior de oxigênio dissolvido que o inicial. Quando zero, deficit inicial igual ao crítico, o rio tem capacidade boa de regeneração não sofrendo quedas significativas de OD. Quando negativo, o curso d'água apresenta a capacidade de autodepuração superior à capacidade de degeneração dos efluentes.

3 METODOLOGIA

3.1. Rio em Estudo

O rio Potengi tem a nascente localizada no município de Cerro Corá e a foz no município de Natal, capital pontiugar. Localiza-se em área de semi-árido sujeito a variações sazonais. Graças a ação antrópica, o rio está sujeito a poluição causada pelo lançamento de esgoto e lixo ao longo de toda a sua extensão. Foi classificado como classe 2 de águas doces, e conforme Resolução 357/2005 tem usos preponderantes e limitações dos parâmetros de DBO e OD para serem respeitados.

Figura 3. Localização do Rio Potengi e sua Bacia Hidrográfica



Fonte: https://www.researchgate.net/figure/Figura-1-Localizacao-da-bacia-hidrografica-do-Rio-Potengi-BHRP_fig1_305306572

É um rio que ao longo da sua extensão que sofre com o lançamento de efluentes, destinação de resíduos sólidos e o desmatamento da mata ciliar. É um dos principais rios do Rio Grande do Norte, seus dados foram utilizados para o presente trabalho.

3.2. Modelo de Streeter-Phelps

A metodologia proposta para esta pesquisa considera a aplicação do Modelo Clássico de Streeter-Phelps para determinar a capacidade de autodepuração de corpos d'água na concessão de outorga de lançamento em rios naturais, considerando diferentes cenários. Assim, considerando que este estudo limita seu campo de aplicação a um rio natural, alguns parâmetros hidráulicos, que atuam diretamente na capacidade de transporte e de diluição do referido corpo hídrico, serão discutidos.

Para desenvolver o modelo de Streeter-Phelps, deve-se partir da equação da difusão advectiva apresentada em seguida:

$$\frac{\partial C}{\partial t} + U \frac{\partial C}{\partial x} = \frac{1}{A} \frac{\partial}{\partial x} \left(A \cdot E \frac{\partial C}{\partial x} \right) - KC \pm L \quad (1)$$

Através da equação 1, são abordados no modelo os processos de difusão turbulenta, de difusão advectiva, além da propriedade de transiência hidráulica, representada pela variação temporal da concentração. A transformação da equação 1 no modelo de Streeter-Phelps restringe o corpo hídrico e o processo de transporte a algumas simplificações pertinentes ao escoamento em rios. Nesse caso, devem-se considerar as seguintes simplificações:

- Sistema estacionário – nesse caso, considera-se que não há variação das variáveis de controle com relação ao tempo;

$$\frac{\partial C}{\partial t} = 0 \quad (2)$$

- Sistema bem misturado em cada seção do rio – isso quer dizer que as variáveis de controle calculadas representam as médias em cada seção do rio. Nesse caso, a difusão, que é representada na equação pelo termo que contém E, ocorre a instantaneamente, o que faz com que esse termo seja zero;

$$\frac{1}{A} \cdot \frac{\partial}{\partial x} \left(A \cdot E \frac{\partial C}{\partial x} \right) = 0 \quad (3)$$

- A equação 1 deve ser aplicada simultaneamente para as substâncias DBO e OD respectivamente.

Assim, usando essas simplificações, tem-se, a partir da equação 1:

$$U \frac{\partial C}{\partial x} = -KC \pm L \quad (4)$$

A equação 4 representa um modelo de fluxo tubular ideal ou fluxo em pistão. Seu comportamento é muito próximo ao comportamento do fluxo em rios naturais, o que justifica a escolha para esta pesquisa. Aplicando a equação 4 para a Demanda Bioquímica de Oxigênio – DBO, em um rio natural, tem-se:

$$U \frac{\partial L}{\partial x} = -K_1 L \quad (5)$$

Onde:

U é a velocidade média na seção [L/T];

L é a concentração de DBO no rio [M/L³];

K_1 é o coeficiente de desoxigenação [T⁻¹].

A condição de contorno que será usada nesta pesquisa considera que em $x = 0$ a concentração de DBO seja L_0 , onde L_0 é dado por:

$$L_0 = \frac{(Q_r L_r + Q_w L_w)}{(Q_r + Q_w)} \quad (6)$$

Onde:

Q_r é a vazão do rio em questão [L³/T];

L_r é a concentração de DBO no rio [M/L³];

Q_w é a vazão do efluente [M/L³];

L_w é a concentração de DBO no efluente [M/L³]

Aplicando novamente a equação 4 para a substância de Oxigênio Dissolvido no rio, tem-se:

$$U \frac{dC}{dt} = +K_2(C_s - C) - K_r L \quad (7)$$

Onde:

C é a concentração de OD no rio em estudo [M/L³];

C_s é a concentração de OD saturado no rio [M/L³];

K_2 é o coeficiente de reaeração [T⁻¹].

Como anteriormente, a condição de contorno para o OD é dada por: em $x = 0$,

$C = C_0$, onde C_0 é dado por:

$$C_0 = \frac{(Q_r C_r + Q_w C_w)}{(Q_r + Q_w)} \quad (8)$$

Onde:

C_w é a concentração de OD no efluente [M/L³];

C_0 é a concentração de OD no rio antes do lançamento [M/L³].

Para a solução das equações 5 e 7, define-se o Déficit de OD no rio como sendo a seguinte relação:

$$D = Cs - C \quad (9)$$

Onde:

D é o déficit de OD no rio [M/L³].

Desta forma, as equações diferenciais 5 e 7 podem ser resolvidas, dando como resultado o famoso Modelo de Streeter-Phelps, definido pelo seguinte par de equações:

· Demanda Bioquímica de Oxigênio

$$L = L_0 e^{(-\frac{K_r}{U}x)} \quad (9)$$

· Déficit de Oxigênio Dissolvido

$$D = D_0 e^{(-\frac{k_2}{U}x)} + \frac{K_1 L_0}{K_2 - K_r} (e^{(-\frac{K_r}{U}x)} - e^{(-\frac{K_2}{U}x)}) \quad (10)$$

Onde:

$K_r = K_1 + K_s$, sendo K_s o coeficiente de sedimentação;

D_0 é o déficit inicial no ponto de lançamento.

Estas equações podem ser aplicadas nos mais diversos rios da região para estudar a capacidade de autodepuração dos mesmos quando sujeitos a lançamentos de efluentes na concessão de outorga.

3.3. Programa Computacional

Um programa computacional foi desenvolvido no intuito de encontrar as respostas do modelo matemático desenvolvido em linguagem FORTRAN. O programa permite a valiação das variáveis de controle concentrações de DBO, déficit de OD e concentrações de OD. Foram estabelecidas subrotinas com funções bem definidas:

1. Leitura dos dados de entrada: desenvolvida para se fazer a leitura de todos os dados referentes aos parâmetros do modelo, bem como os dados inseridos no cálculo das condições iniciais e de contorno.
2. Cálculo das concentrações: referentes aos parâmetros estabelecidos no modelo.

3. E Impressão dos resultados: responsável por imprimir os resultados do modelo tais como as concentrações de DBO e de OD ao longo do curso do rio.

4 RESULTADOS

Os resultados tratam da análise das concentrações de DBO, déficit de OD e concentrações de OD para diferentes tipos de lançamento na seção de origem de um rio considerando cenários de estação seca e chuvosa. Foram utilizados os dados do rio Potengi, Rio Grande do Norte, e os dados utilizados nas simulações para os dois cenários podem ser observados na Tabela 2.

Tabela 2. Dados dos parâmetros utilizados nas simulações.

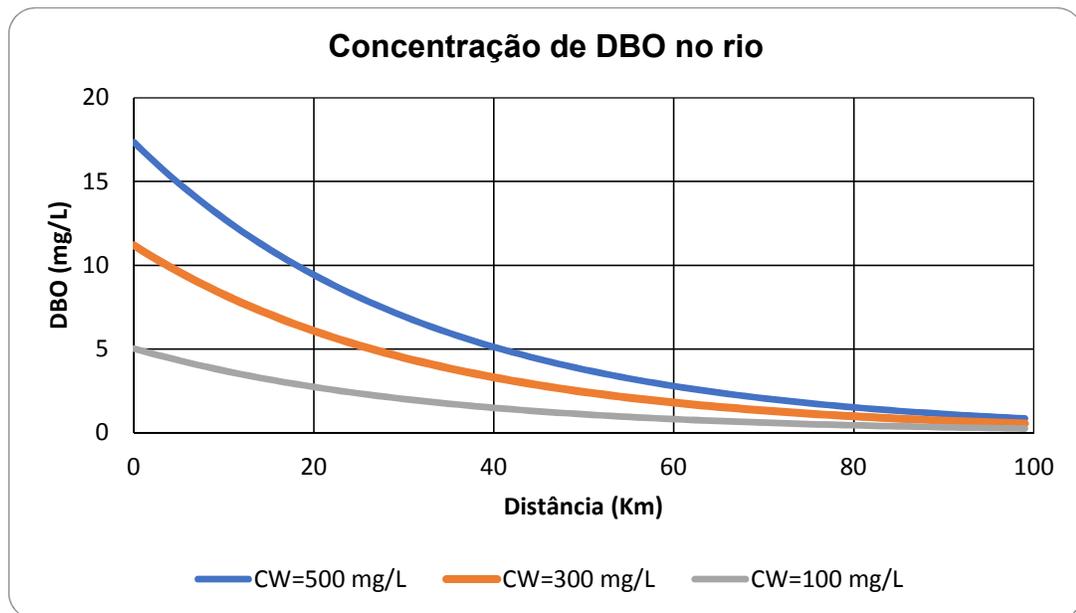
Parâmetros	Unidade
Vazão média do efluente	40.000 m ³ .d ⁻¹
Concentração de OD do efluente	1 mg/L
Largura média do rio	8,00 m
Profundidade média do rio	6,00 m
Comprimento do rio	100.000 m
Concentração de DBO no rio	2 mg/L
Concentração de OD no rio	8 mg/L
Temperatura média do rio	27 °C
Coeficiente de reaeração	2 d ⁻¹
Coeficiente de decaimento da DBO	0,6 d ⁻¹

Cenário 1: Estação chuvosa

Para este cenário foi considerada a vazão média do rio de $14,5 \text{ m}^3/\text{s}$ ($1.252.800,00 \text{ m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$). Sendo assim, para este caso, a carga de DBO do efluente de uma fonte pontual variou entre $C_w = 100 \text{ mg/L}$; $C_w = 300 \text{ mg/L}$ e $C_w = 500 \text{ mg/L}$. O cenário 1 apresenta a análise da concentração de DBO, déficit de OD e concentrações de OD, para diferentes tipos de lançamento na seção de origem do rio. Por conseguinte, na primeira simulação, Figura 4, verifica-se o comportamento da concentração de DBO para diferentes lançamentos na seção de origem do rio.

Com base na figura 4, é possível perceber que quanto maior for a concentração da carga poluente lançada no rio (C_w), maior será a distância para que este lançamento se dissipe. Pode-se verificar, portanto, a coerência dos resultados gerados pelo programa, uma vez que quanto maior for a massa distribuída, maior o tempo de diluição desta massa no fluido.

Figura 4. Comportamento da DBO lançada na seção de origem do rio.



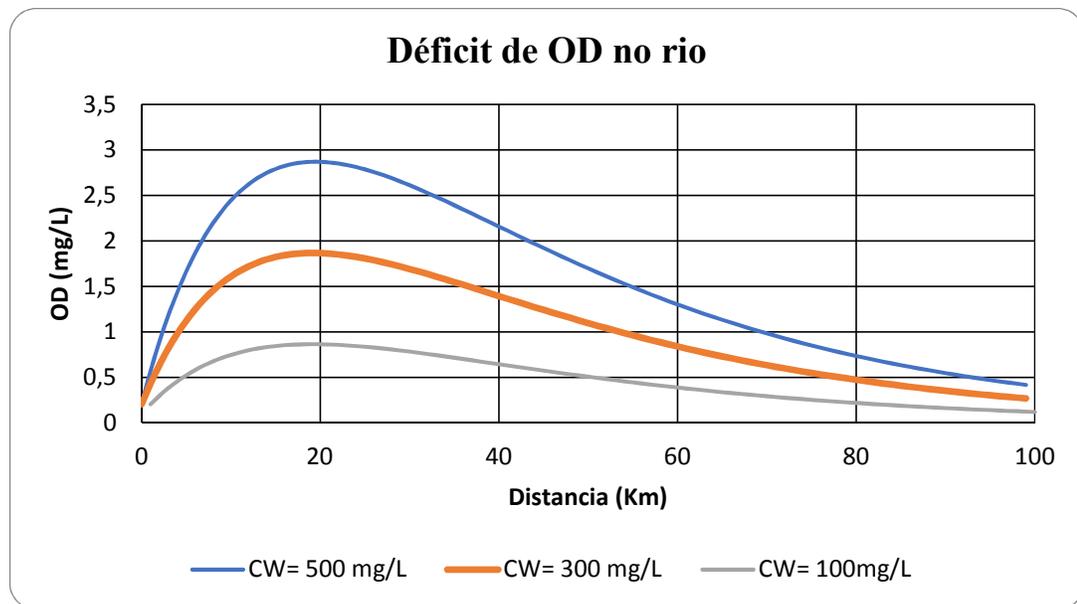
Fonte: Própria Autora

Percebe-se que para o período chuvoso, a carga poluente poderá ser maior, mas a distância e conseqüente volume necessário torna-se maior. Para 100 mg/L tem-se um comportamento quase linear e é degradada mais rapidamente, onde não ultrapassa o limite para a classe que é de 5 mg/L . Para 300 mg/L a estabilidade é conseguida em torno de 27 km e para 500

mg/L acontece a 40km do ponto de lançamento. Se houver mais de um ponto de lançamento de efluentes ao longo da distância estudada, a qualidade se torna mais difícil de ser garantida, mas não é o foco do estudo, mas fornece uma visão do que pode ser feito, por exemplo, para o saneamento, para os tratamentos que diminuam a carga poluente.

O mesmo ocorre ao analisar o déficit de OD, Figura 5. Nesta figura, pode-se notar o aumento do déficit de oxigênio dissolvido no início do lançamento, chegando a valores máximos próximo da seção a 20 km da seção de origem do rio. Conforme a carga de DBO vai se dissipando, os valores de déficit voltam a ser os mesmos que aqueles antes do lançamento. Quer dizer, ocorre a diluição da nuvem poluente ao longo do rio, de maneira que a distribuição da concentração de DBO atinja a uniformidade.

Figura 5. Comportamento do déficit de OD após o lançamento da carga de DBO

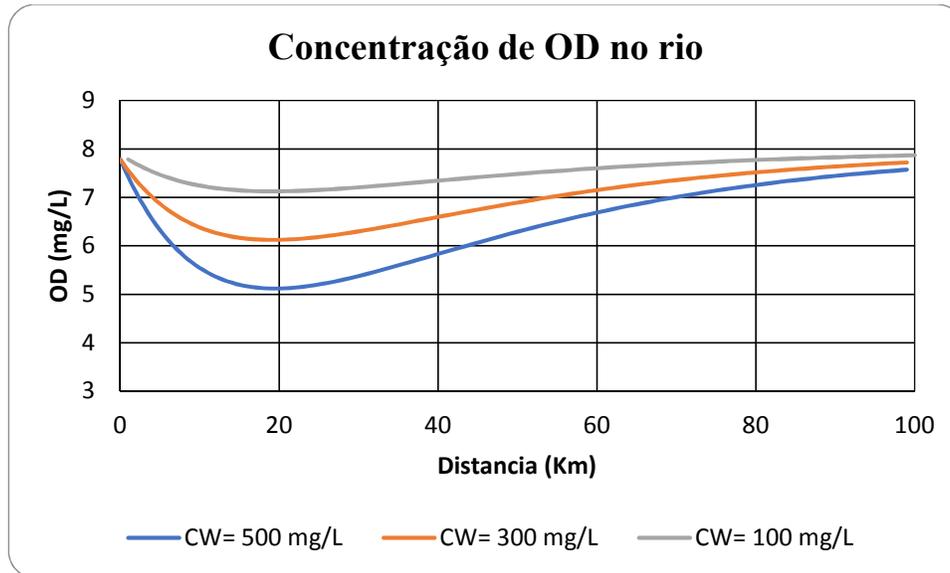


Fonte: Própria Autora

A análise seguinte, Figura 6, estuda o comportamento da concentração de OD do rio, para diferentes lançamentos na seção de origem. Considerando que as concentrações de oxigênio dissolvido são calculadas a partir da diferença entre o oxigênio saturado e o déficit de OD, o gráfico gerado representa exatamente o oposto do que ocorre com o déficit. Sendo assim, os valores de concentração de OD são menores na seção a 20 km da seção de origem do rio. Esta seção tem uma especial relevância para as análises de OD por se tratar do ponto crítico da curva de OD, onde

ocorre o início da recuperação, ou autodepuração, do rio. A partir deste ponto, o balanço de oxigênio passa a ser positivo.

Figura 6. Comportamento da concentração de OD após o lançamento da carga de DBO.



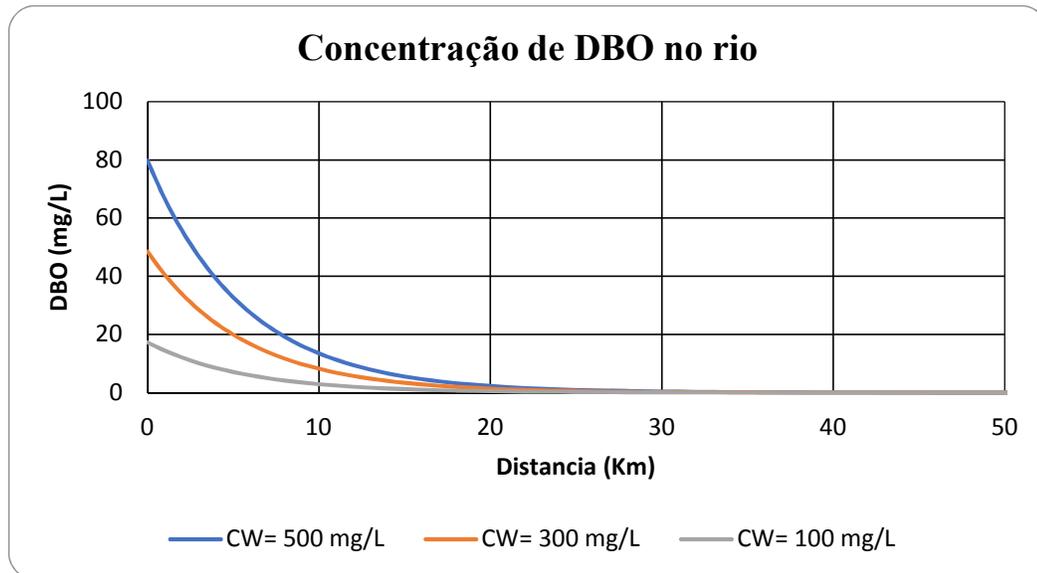
Fonte: Própria Autora

Para uma carga de 300 mg/L tem-se o limite a ser atingido de carga poluente do efluente, ultrapassando este valor já não há garantias de recuperação do rio e obedece a legislação que estabelece que o OD não pode ser inferior a 5 mg/L.

Cenário 2: Estação Seca

Para este caso, manteve-se o mesmo tipo de lançamento que o cenário anterior, mas a vazão considerada agora é da ordem de $2,5 \text{ m}^3/\text{s}$ ($216.000 \text{ m}^3.\text{d}^{-1}$). Também foram usados os valores para as cargas poluentes e os dados de entrada presente na Tabela 1 para posterior comparação entre os cenários chuvoso e seco.

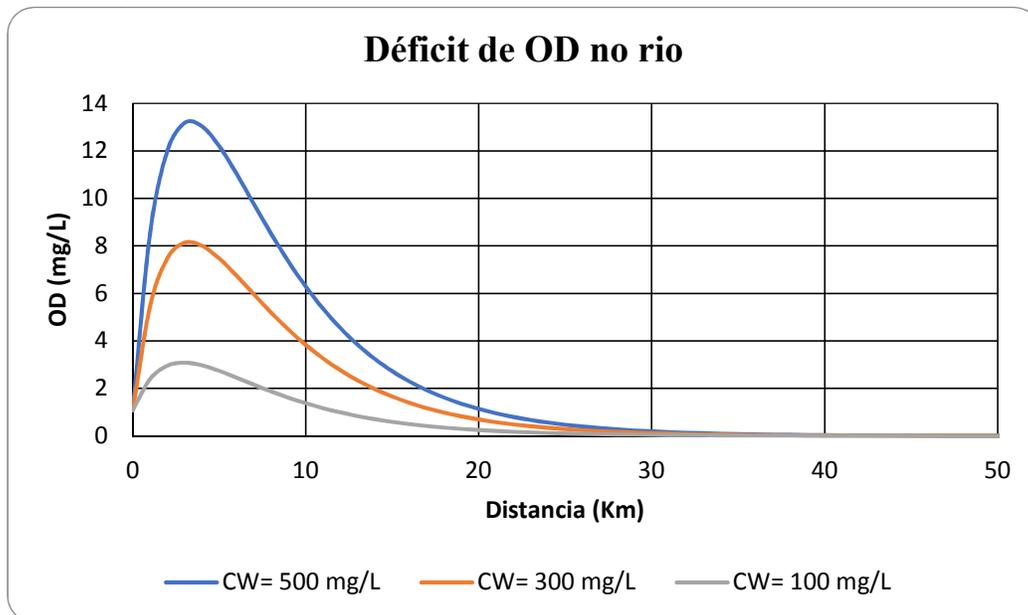
Figura 7. Comportamento da DBO lançada na seção de origem do rio.



Fonte: Própria Autora

De acordo com a Figura 7, verifica-se que, para esta vazão, os lançamentos de 300 mg/L e 500 mg/L são completamente inadequados para este rio. Por exemplo, para um lançamento de 500 mg/L a concentração de diluição da DBO é da ordem de 80 mg/L, valor inadequado para qualquer ambiente aquático. Para este caso, somente a vazão de 100 mg/L mostra-se adequada.

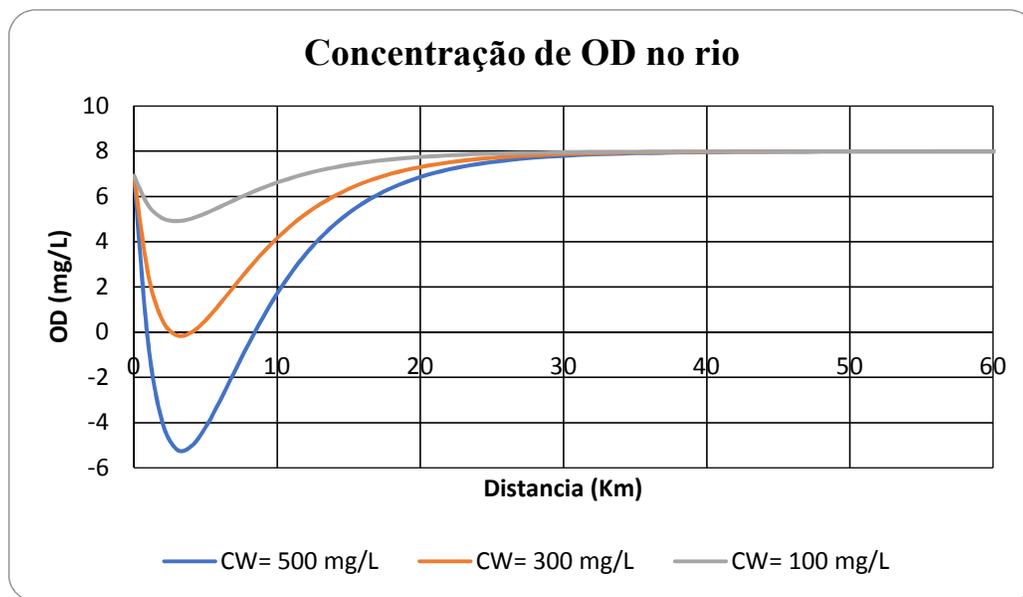
Figura 8. Comportamento do déficit de OD após o lançamento da carga de DBO



Fonte: Própria Autora

A Figura 8 justifica a análise anterior, mostrando que o déficit de OD é muito elevado para os lançamentos de 300 mg/L e de 500 mg/L nas proximidades de 5 Km. Neste caso, verificasse que o déficit supera a condição de saturação do OD mostrando assim, que o oxigênio dissolvido, nesta região, tende a zero ou para valores negativos. Este cenário indica que para estes lançamentos o rio perde sua capacidade de sustentabilidade aquática. A figura 9 só confirma a análise feita anteriormente.

Figura 9. Comportamento da concentração de OD após o lançamento da carga de DBO.



Fonte: Própria Autora

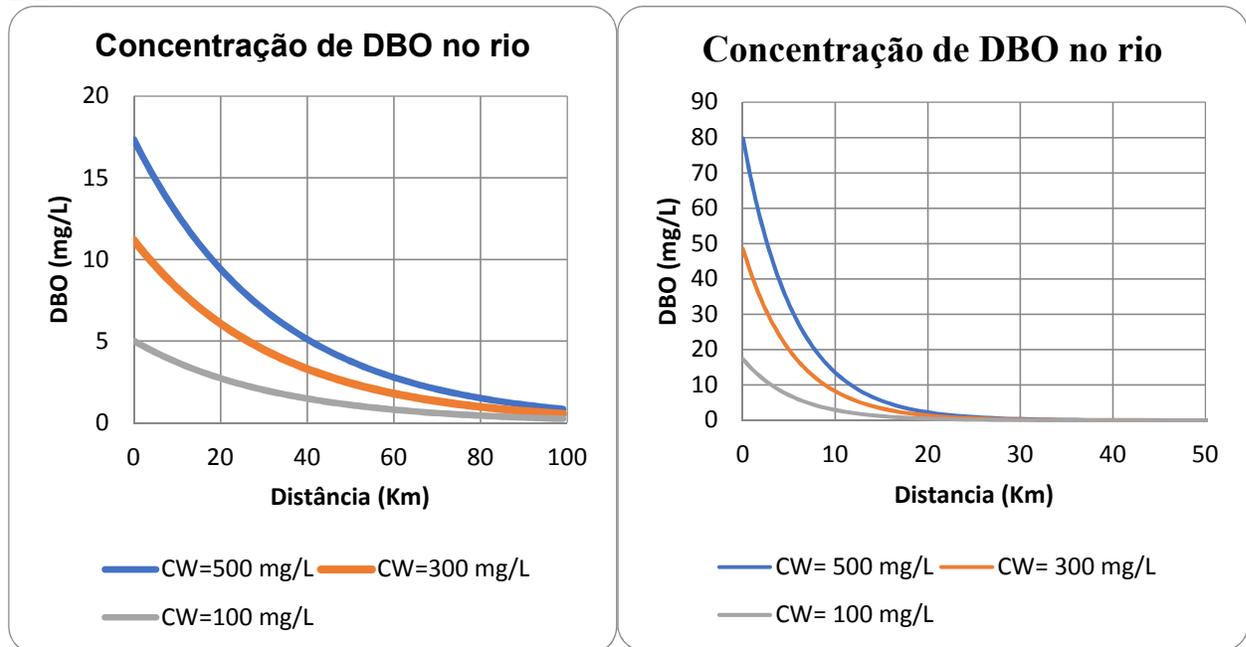
A Figura 9, nos diz que os valores para lançamento de efluentes não obedece a legislação e que a carga poluente deverá passar por um tratamento bem rigoroso para diminuir sua carga poluidora no período mais seco, pois não se teria a dispor do mesmo volume que no período chuvoso.

Os resultados mostraram que é possível fazer uma análise consistente do comportamento da DBO e do OD para diferentes concentrações de lançamentos de efluentes bem como diferentes vazões de acordo com a sazonalidade do nordeste brasileiro. Segundo o estudo, observou-se que nas estações secas os lançamentos de efluentes com concentrações acima de

200mg/L provocam sérios danos na qualidade da água do rio em estudo. Já para a estação chuvosa o rio possui uma capacidade de diluição que suporta os lançamentos superiores as concentrações de 200mg/L.

Análise dos cenários avaliando a concentração de DBO

Figura 10. Quadro comparativo entre os períodos chuvoso e seco. Parâmetro: Concentração de DBO.

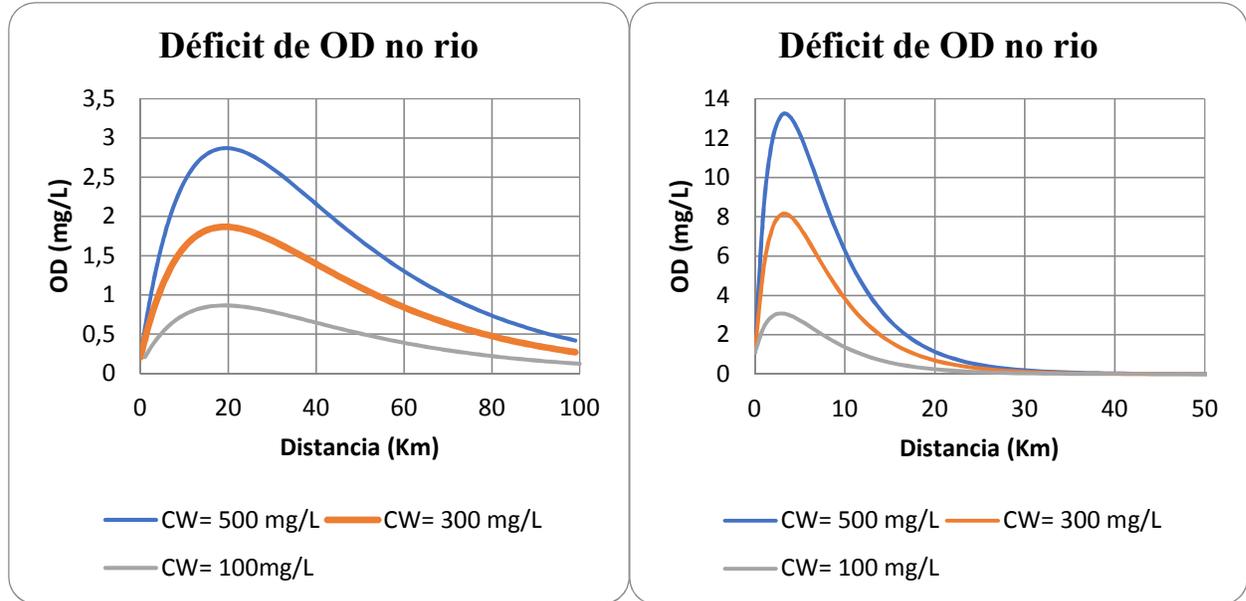


Fonte: Própria Autora

Apesar de aparentemente no período seco a queda da DBO ser mais anunciada, percebe-se que pela escala é possível visualizar a que distância é atingido o limite recomendado para a classificação do rio, mas com uma concentração maior a ser degradada pelos microorganismos terá efeitos sobre o déficit de OD e a concentração de OD ao longo do rio. Demonstra que para a outorga de lançamento de efluentes deve levar em consideração os efeitos da sazonalidade e qual a melhor medida a ser adotada para a minimização da carga poluente quando o volume não for suficiente.

Análise dos cenários avaliando o Déficit de OD

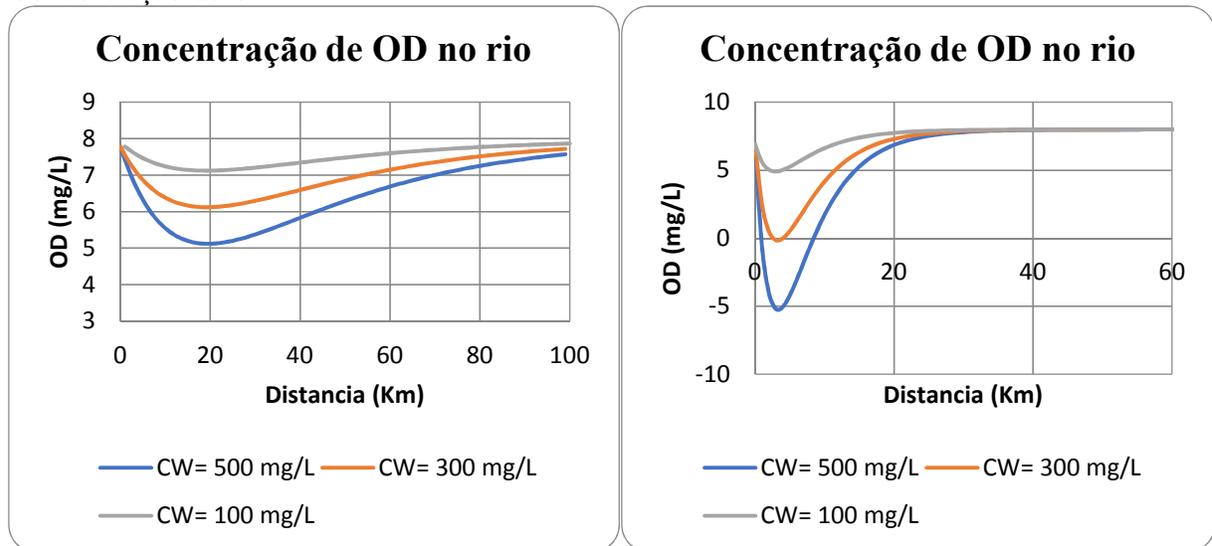
Figura 11. Quadro comparativo entre os períodos chuvoso e seco. Parâmetro: Concentração de Déficit de OD.



Fonte: Própria Autora

Análise dos cenários avaliando a concentração de OD

Figura 12. Quadro comparativo entre os períodos chuvoso e seco. Parâmetro: Concentração de Concentração de OD.



Fonte: Própria Autora

Os picos de déficit de OD para o período seco é atingido em uma distância menor, porém pela escala vê-se que o déficit atinge valores menores que os limites de OD, o que significa

que há uma grande perturbação da qualidade da água, significando a alteração do ambiente aquático. As situações são melhor visualizadas quando analisa-se a figura 12. Para valores menores que 100 mg/L seria adequado em ambos os períodos, mas seria o limite para o período seco, qualquer valor acima representa a alteração da capacidade de autodepuração.

5 CONCLUSÕES

Os resultados mostraram que é possível fazer uma análise consistente do comportamento da DBO e do OD para diferentes concentrações de lançamentos de efluentes bem como diferentes vazões de acordo com a sazonalidade do nordeste brasileiro. Segundo o estudo, observou-se que nas estações secas os lançamentos de efluentes com concentrações acima de 200mg/L provocam sérios danos na qualidade da água do rio em estudo. Já para a estação chuvosa o rio possui uma capacidade de diluição que suporta os lançamentos superiores as concentrações de 200mg/L.

Pelas características observadas em rios, principalmente do Nordeste Brasileiro, sofrem com a questão da grande variação de volumes de água. Os diversos usos tem uma situação crítica para ser garantida. Essa sazonalidade também influencia nas análises dos estudos de modelagem de água.

Ao observar os dados dos gráficos tem-se o limite para o lançamento de efluentes com grande carga de matéria orgânica de acordo com o volume disponível para isso. Sempre lembrando que deve-se garantir os outros usos e a qualidade, sendo importante frisar a autodepuração do rio. A autodepuração demonstra a capacidade do corpo d'água de se recuperar ao longo da extensão.

Dadas as condições analisadas a partir dos dados fornecidos, a forma das curvas obedece ao que é esperado na figura 1, o que mostra que o modelo é válido para o comportamento da DBO e OD. A situação para o rio estudado é crítica para o período seco, tendo que passar por um rigoroso tratamento.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

BRASIL. **Lei Federal nº 9.433, de 08 de janeiro de 1997.** Disponível em: <http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/LEIS/L9433.htm>. Acesso em 15 de agosto de 2018.

BRASIL. Ministério da Saúde. Funasa. **Manual de Controle da Qualidade da Água para Técnicos que Trabalham em ETAS.** 2014. Disponível em: <www.funasa.gov.br/site/wpcontent/files_mf/manualcont_quali_agua_tecnicos_trab_emetas.pdf>. Acesso em: 15 de junho de 2018.

BRASIL. Ministério de Meio Ambiente. **Outorga Federal.** Disponível em: <<http://www.mma.gov.br/agua/recursos-hidricos/outorga-federal>>. Acesso em 18 de julho de 2018.

BRASIL. Ministério do Meio Ambiente. Conselho Nacional de Recursos Hídricos. **Resolução CNRH Nº140, de 21 de Março 2012.** Disponível em: Acesso em 14 de agosto de 2018.

FLECK, Leandro. TAVARES, Maria Hermínia Ferreira. EYNG, Eduardo. **Principais modelos matemáticos de qualidade da água e suas aplicações: uma revisão.** Revista Eletrônica Científica Inovação e Tecnologia, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, volume 1, 47-62, 2013.

REIS, José Sérgio Aleluia dos. **Modelagem Matemática da qualidade de água para o Alto Rio das Velhas/MG.** Dissertação. 182f. Mestrado em Engenharia Ambiental, Universidade Federal de Ouro Preto. Ouro Preto, 2009.

SOUZA, Rafael Siqueira. **Simulação Hidrodinâmica da Qualidade da Água.** Estudo de Caso: Ajuste do Modelo *CE-QUAL-W2* à sub-bacia do Arroio Demétrio, Bacia Hidrográfica do rio Gravataí/RS. Dissertação. 156f. Programa de Pós-Graduação em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental, Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre/RS, 2006.

VARGAS, Eduardo Hermes. MARQUES, Felipe Souza. **Análise da Autodepuração do Curso d'água Pomba Cue Utilizando o Modelo Streeter-Phelps**. Pleiade. 83-92. Jan/Jun, 2015.

VON SPERLING, Marcos. **Estudos e modelagem da qualidade da água de rios**. 1ª edição. Belo Horizonte: Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental-UFMG, 2007.