

## COMPARATIVO ENTRE O MODELO QUAL2K E UMA METODOLOGIA SIMPLIFICADA DE MODELAGEM DA QUALIDADE DA ÁGUA INTEGRADA A UM AMBIENTE DE SISTEMA DE INFORMAÇÕES GEOGRÁFICAS: ESTUDO DE CASO NA BACIA DO RIO MACAÉ

*Rafael Henrique Bloedow Kayser<sup>1\*</sup>; Arthur de Fontoura Tschiedel<sup>2</sup>; Luiz Fernando de Abreu Cybis<sup>3</sup> & Walter Collischonn<sup>4</sup>*

**Resumo** – A pesquisa teve por finalidade realizar um estudo comparativo entre uma metodologia de modelagem de qualidade da água conhecida e uma abordagem alternativa, mais simplificada em relação ao equacionamento, porém com maior facilidade em relação ao uso e à entrada de dados. O modelo utilizado para fins de comparação trata-se do QUAL2K, desenvolvido pela Agência de Proteção Ambiental Americana, software de domínio público e com utilização mundialmente difundida. O modelo é implementado no programa *Excel*, que embora seja de livre acesso, o processo de representação de rios e tributários de uma bacia em planilhas pode exigir um trabalho muito intenso, dependendo da complexidade da bacia hidrográfica. Nesse sentido, propõe-se um modelo integrado a um Sistema de Informações Geográficas (SIG), facilitando a representação da bacia e a entrada de dados, e com um equacionamento mais simplificado, mas que seja suficientemente eficaz na utilização dos instrumentos de gestão de recursos hídricos, como os planos de bacia e o enquadramento de corpos hídricos. Aplicou-se ambas as metodologias para o mesmo estudo de caso, na bacia do rio Macaé, e verificou-se uma aproximação bastante razoável em termos de resultados, para todos os parâmetros analisados.

**Palavras-Chave** – modelagem matemática da qualidade da água, modelo QUAL2K, Sistemas de Informações Geográficas

## COMPARATIVE BETWEEN THE QUAL2K MODEL AND A SIMPLIFIED METHODOLOGY OF WATER QUALITY MODELING INTEGRATED TO A GEOGRAPHICAL INFORMATION SYSTEM ENVIRONMENT: A CASE STUDY IN THE MACAÉ RIVER BASIN

**Abstract** – The aim of the research was to carry out a comparative study between a known water quality modeling methodology and an alternative approach, simplified in relation to equation, but with greater ease in relation to use and input data. The model used for comparison purposes is QUAL2K, developed by the American Environmental Protection Agency, public domain software with worldwide use. The model is implemented in the *Excel* program, which although free access, the process of representing basin rivers and tributaries in worksheets may require a very intense work, depending on the watershed complexity. In this sense, an integrated model for a Geographic Information System (GIS) is proposed, facilitating the basin representation and input data, with a more simplified equation, but which is sufficiently efficient in water resource management instruments applications, such as basin plans and the future water body classification programs. Both methodologies were applied for the same case study, in the Macaé river basin, and a very reasonable approximation in terms of results was observed for all parameters analyzed.

<sup>1</sup> Doutorando - Instituto de Pesquisas Hidráulicas – Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Email: rafael.hbkayser@gmail.com

<sup>2</sup> Doutorando - Instituto de Pesquisas Hidráulicas – Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Email: arthurtidel@hotmail.com

<sup>3</sup> Professor Adjunto - Instituto de Pesquisas Hidráulicas – Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Email: lfcybis@gmail.com

<sup>4</sup> Professor Adjunto - Instituto de Pesquisas Hidráulicas – Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Email: waltercollischonn@gmail.com

## 1. INTRODUÇÃO

O diagnóstico das condições da qualidade da água na escala de bacia hidrográfica é uma necessidade bastante comum em processos de gestão dos recursos hídricos, uma vez que são quantificadas todas as fontes pontuais e difusas de poluição que podem contribuir para que a qualidade da água esteja desconforme em relação ao padrão que a população da bacia necessita. Para a realização de um diagnóstico integrado da qualidade da água a nível de bacia, é necessário a consideração de diversos processos, desde o balanço hídrico entre precipitação, o escoamento superficial, o escoamento subterrâneo e os níveis de vazão em diferentes seções da bacia, até a alocação das principais fontes de poluição pontual e difusa. Os modelos matemáticos são técnicas que permitem simular condições reais, que poderiam ocorrer dentro de uma faixa de incerteza, abrangendo todos os processos físicos elencados anteriormente. Utilizando tais modelos, é possível estabelecer cenários de redução de cargas orgânicas lançadas no sistema estudado, de modo a atender a legislação vigente (Ferreira, 2015).

Desde a década de 1960, diversos pacotes comerciais têm sido desenvolvidos para modelagem de qualidade da água. O modelo Streeter-Phelps, desenvolvido em 1925, apresenta uma solução analítica, unidimensional, em regime permanente e uniforme, para reações de primeira ordem para DBO e OD. Mesmo com as simplificações envolvidas, o modelo ainda é aplicado atualmente, principalmente por sua facilidade de uso e por gerar soluções diretas e rápidas (Fan et al., 2012). O modelo QUAL2E, apresentado pela agência USEPA (United States Environmental Protection Agency) em 1985, permite caracterizar a qualidade da água para vários parâmetros simultaneamente. As simulações podem ser feitas para o rio principal e para os tributários, com a inclusão de fontes pontuais e difusas. Deste modo, o modelo pode ser empregado na elaboração dos planos de bacia, bem como na implementação dos instrumentos de gestão de recursos hídricos (Knapik, 2009). A condição adotada na formulação do modelo, entretanto, é a de regime permanente, com escoamento unidimensional.

A possibilidade de integração com Sistemas de Informações Geográficas (SIG) também é um aspecto importante, considerando a possibilidade de discretização da bacia de forma distribuída. Nestes modelos a bacia é dividida em sub-bacias ou células, possibilitando a simulação das alterações da variabilidade espacial natural do tipo e cobertura do solo. Atualmente, a tendência é o desenvolvimento de aplicações completamente integradas com SIG, como nos trabalhos de Foster e McDonald (2000) e Lins et al. (2012) que desenvolveram modelos e métodos acoplados à estrutura de plataformas SIG. Nesse contexto, também se insere a integração com modelos hidrológicos distribuídos para a aquisição dos dados de vazão, no qual diversas plataformas são desenvolvidas igualmente em ambiente SIG, como o caso do MGB-IPH (Collishonn, 2001), bastante utilizado no Brasil.

Neste trabalho é apresentada uma metodologia de simulação da qualidade da água integrada ao ambiente de SIG, podendo se integrar também a um modelo hidrológico para aquisição dos dados de vazão. O esquema adotado é relativamente mais simples em relação ao QUAL2E (ou sua versão mais recente, o QUAL2K), principalmente por não se incluir a simulação de algas e sua inter-relação com os demais constituintes. Nesta versão, também é adotado um esquema analítico, ao invés do esquema numérico do QUAL2E. O modelo aqui proposto, denominado SiGBAH-Qual, será comparado aos resultados de uma aplicação do modelo QUAL2K na bacia do rio Macaé, mantendo-se os mesmos coeficientes, as entradas de carga e as reduções adotadas na etapa de calibração

## 2. METODOLOGIA

O modelo SIGBAH-Qual tem como principal funcionalidade a sua operacionalização dentro de um Sistema de Informações Geográficas (SIG), facilitando o processo de entrada de dados, a aquisição das informações hidráulicas dos trechos de rio, além da organização topológica de todo o

sistema hídrico. A versão mais atual do sistema desenvolvido no grupo de Hidrologia de Grande Escala (HGE) está descrita em Kayser (2013), no qual se propõe o desenvolvimento de um sistema integrado ao software MapWindow®, um SIG programável de código aberto, e livre distribuição na internet. Esta integração é realizada através de um plug-in, que corresponde a um programa de computador usado para adicionar funções a outros programas maiores, provendo alguma funcionalidade especial ou muito específica.

O processo de modelagem corresponde na adoção de soluções analíticas em regime permanente, utilizando modelos de transporte advectivo com reações cinéticas simplificadas. As equações utilizadas são apresentadas em Sperling (2007), todas em sua forma analítica de resolução. O modelo SIGBAH-Qual possibilita a modelagem dos seguintes constituintes ao longo do rio:

- Demanda bioquímica de oxigênio;
- Oxigênio dissolvido;
- Nitrogênio total e suas frações (orgânico, amoniacal, nitrito e nitrato);
- Fósforo total e suas frações (orgânico e inorgânico);
- Coliformes termotolerantes (fecais) ou E. Coli.

## 2.1. Dados de entrada

O modelo integrado a um SIG utiliza como base uma rede de drenagem vetorial discretizada em segmentos de diferentes comprimentos e possuindo algumas informações importantes, como uma codificação que identifica o ordenamento dos trechos, o comprimento, a área de drenagem, dentre outros atributos. Para a geração da rede de drenagem, lança-se mão da utilização de ferramentas de geoprocessamento e dos chamados Modelos Digitais de Elevação (MDE). Os MDE correspondem a uma representação de dados topográficos na forma de uma imagem no formato raster, ou matricial, onde cada pixel dessa imagem tem como atributo o valor de elevação do terreno representado. Estes arquivos são processados executando-se algoritmos de definição de direções de fluxo, área acumulada e discretização em trechos e unidades de bacia, podendo ser utilizadas ferramentas como o ArcGIS (Maidment, 2002), ou então uma metodologia de livre acesso descrita em Siqueira et al (2015). A Figura 1 abaixo apresenta, do lado esquerdo, o Modelo Digital de Elevação da bacia hidrográfica do rio Macaé, e à direita o resultado do processo de discretização e obtenção da rede de drenagem e de suas respectivas microbacias.

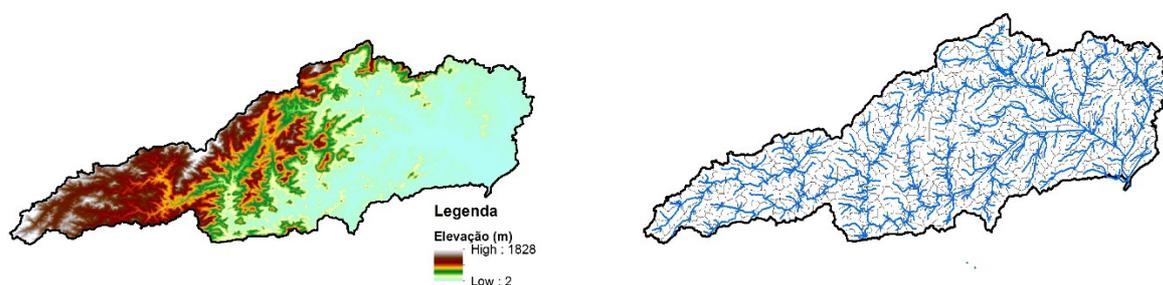


Figura 1 – Processo de geração da rede hidrográfica topologicamente consistente a partir de Modelo Digital de Elevação.

Além da base hidrográfica codificada, o modelo possui outros dados de entrada, sendo devidamente inseridos utilizando a interface do sistema.

- Disponibilidade hídrica: por se tratar de um modelo em regime permanente, as vazões são inseridas considerando um determinado retrato da bacia, idealmente próximo da condição dos dados disponíveis de monitoramento. Sob o ponto de vista de gestão, é comum a adoção de vazões de referência, normalmente cenários mínimos como Q90% ou a Q7,10, no intuito de avaliar as condições mínimas de diluição de efluentes. A obtenção e inserção destes dados

pode-se dar utilizando um modelo hidrológico do tipo chuva-vazão, mais precisamente o MGB-IPH (Collishonn, 2001), ou então, mais simplificadamente, a partir de equações de regionalização em função da área de drenagem, uma vez que cada trecho carrega consigo, dentre outras informações, o valor da área acumulada de bacia.

- Cargas pontuais e difusas: a grande vantagem de se trabalhar internamente a um Sistema de Informações Geográficas é justamente a alocação das cargas pontuais e difusas no modelo. As cargas pontuais são representadas por lançamentos diretos e contínuos, normalmente representadas por fontes oriundas do esgotamento urbano ou de indústrias. A inserção no modelo pode ser feita utilizando o próprio mapa, selecionando o local de lançamento com o cursor do mouse, ou então a partir de tabelas com dados de coordenadas e respectivas vazões e concentrações dos efluentes. As cargas difusas são caracterizadas em função do uso do solo, neste caso é possível inserir bases com a identificação de cada uso, juntamente com os respectivos valores característicos de carga específica gerada (kg/dia.ha).
- Condições iniciais de vazão e concentração: assim como no modelo QUAL2K, no presente trabalho também é necessário definir as condições iniciais de vazão e concentração de todas as cabeceiras, valendo-se idealmente a partir de dados monitorados, se existentes, ou então condições muito baixas e próximas de uma condição natural.
- Dados de monitoramento: os dados de monitoramento são importantes para que seja feita adequadamente a calibração do modelo, pois existem muitos parâmetros que representam os processos de transformação dos principais constituintes que necessitam ser ajustados de acordo com as observações. É possível inserir no sistema estes dados, e testar diferentes valores dos coeficientes, ainda que de forma manual.

## 2.2. Estrutura do modelo

O esquema de simulação é representado na Figura 2.a. Primeiramente é feita a identificação do ordenamento dos trechos, selecionando inicialmente aqueles de primeira ordem, ou de cabeceira. Em seguida, são processados os trechos de segunda ordem, utilizando as saídas de concentrações e vazões obtidas no passo anterior, e assim por diante, até encontrar o trecho de ordem mais alta, correspondente ao exutório da bacia. Na figura 2.b são apresentadas as principais variáveis no processo de diluição e transformação dos constituintes de qualidade, sendo descritas logo a seguir.

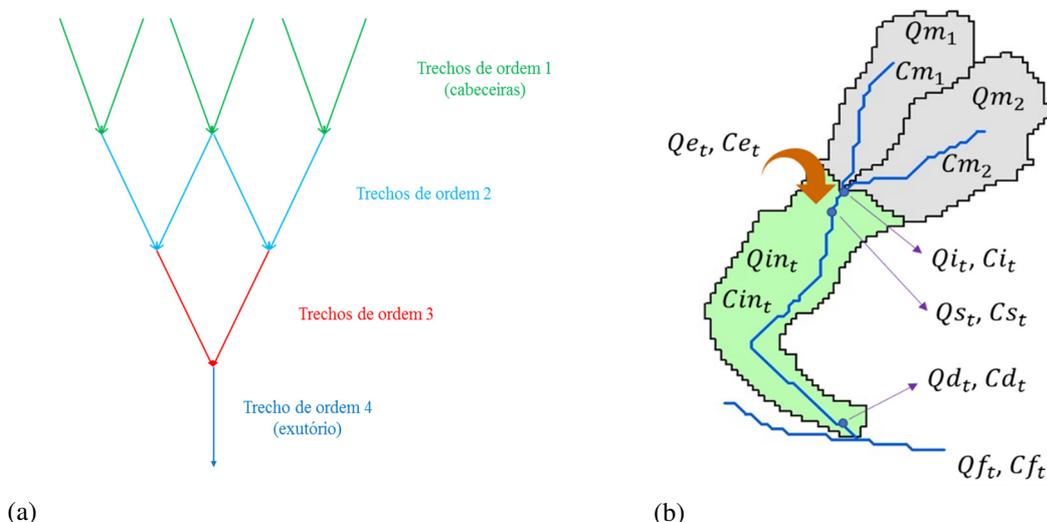


Figura 2 – Esquema de representação do modelo de qualidade da água: a) representação dos trechos em relação ao ordenamento; b) representação das principais variáveis de simulação por microbacia.

Sendo:

$Qm_j$  e  $Cm_j$ : vazão e concentração final do trecho  $j$  à montante do trecho  $t$ ;

$Qi_t$  e  $Ci_t$ : vazão e concentração inicial do trecho  $t$ ;

$Qe_t$  e  $Ce_t$ : vazão e concentração (ou somatório) das cargas pontuais existentes em qualquer ponto da microbacia correspondente ao trecho  $t$ ;

$Qs_t$  e  $Cs_t$ : vazão e concentração de mistura após a entrada das cargas pontuais no trecho  $t$ ;

$Qd_t$  e  $Cd_t$ : vazão e concentração após os processos de transformação dos constituintes ao longo do trecho  $t$ ;

$Qd_t$  e  $Cd_t$ : vazão e concentração incremental do trecho  $t$ , correspondendo à entrada das cargas difusas;

$Qf_t$  e  $Cf_t$ : vazão e concentração final do trecho  $t$ , após a inserção da vazão e concentração incremental.

A seguir, será apresentada uma descrição de cada etapa do processo de diluição e transformação dos constituintes considerados no modelo proposto:

- **Verificação das condições iniciais**

Para os trechos de ordem 1, as vazões e concentrações no início do trecho serão dados de entrada do modelo. Para os trechos de ordem superior, essas variáveis serão dadas utilizando as saídas dos trechos de montante, somando as vazões e misturando as respectivas concentrações.

- **Mistura da carga pontual no trecho de rio**

Nesta etapa é feita a diluição do efluente pontual no curso principal do rio. Para efeito de simplificação, considera-se que o ponto de lançamento esteja localizado imediatamente no ponto inicial do trecho, logo após a confluência dos trechos de montante, ainda que o ponto esteja localizado em qualquer outra região da microbacia correspondente ao trecho. Também se considera aí o somatório dos lançamentos e a diluição das concentrações, caso existam mais um ponto de lançamento por microbacia.

- **Transformação dos constituintes ao longo do trecho**

Nesta etapa são consideradas as transformações devido aos processos de decomposição, sedimentação, além de outras transformações dos constituintes simulados. As equações partem do esquema clássico de Streeter-Phelps, agregando-se, porém, outras variáveis, como a sedimentação da matéria orgânica, além da consideração dos elementos fosfatados e nitrogenados e também da modelagem dos coliformes termotolerantes. As equações envolvem basicamente uma relação de decaimento de primeira ordem para a maioria dos parâmetros, incluindo processos de degradação da matéria orgânica, sedimentação, além de processos de transformação de elementos, como nos casos das formas fosfatadas e nitrogenadas. A equação é descrita abaixo, em sua forma geral, onde  $K$  é o coeficiente de transformação (degradação, sedimentação, etc.) e  $T$  é o tempo de deslocamento ao longo do trecho simulado, calculado a partir da informação da velocidade da água:

$$Cd_t = Cs_t \cdot e^{-(K \cdot T)} \quad (1)$$

- **Vazão incremental e cargas difusas**

Nesta parte, considera-se a entrada da vazão gerada pela própria microbacia correspondente ao trecho e de sua respectiva concentração resultante dos processos de entrada da carga difusa. Neste contexto, há várias simplificações, a começar por considerar a entrada incremental como uma fonte pontual ao fim do trecho, sendo que na verdade, a entrada é contínua e distribuída ao longo do segmento. Outra simplificação reside no fato de considerar toda a vazão incremental como decorrente do escoamento superficial, responsável por carrear a carga do uso do solo para o curso principal, sem considerar as porções subsuperficial e subterrânea.

- **Vazão e concentração final do trecho**

A vazão e concentração final do trecho se dará pela soma e diluição da carga incremental com as vazões e concentrações provenientes do processo de transformação dos constituintes ao longo do trecho.

### 2.3. Estudo de caso: Aplicação na Bacia do rio Macaé

Para fins de validação do modelo proposto, foram utilizados os resultados obtidos a partir de uma aplicação do modelo QUAL2K na bacia do rio Macaé, na qual está descrita em Tschiedel et al (2013). A bacia do rio Macaé está localizada no Estado do Rio de Janeiro, possui uma área em torno de 1760 km<sup>2</sup> e faz parte da Região Hidrográfica do Atlântico Leste, cujas águas desaguam diretamente no Oceano Atlântico. A principal característica da bacia é a elevada amplitude altimétrica, em torno de 1975 metros, tendo duas regiões características. A primeira, formada pela cabeceira, é constituída pelas escarpas da Serra do Mar, possui acentuada declividade e relativamente preservada, sendo possível encontrar povoados esparsos sem tratamento de esgotos, além da atividade pecuária, gerando cargas que podem alcançar a calha dos rios. A segunda região corresponde à planície litorânea, conta com uma presença mais forte da atividade agropecuária, além de concentrar a maior parte da população do município de Macaé, junto à faixa litorânea.

Foram realizadas três campanhas de monitoramento em onze diferentes pontos ao longo do curso principal. Estas campanhas foram realizadas no contexto da aplicação do Plano de Recursos Hídricos na bacia (Rio de Janeiro, 2013), servindo de subsídio para a definição do instrumento de enquadramento. Portanto, para cada ponto de monitoramento foi definida uma sub-bacia onde foi possível variar o percentual aportante de cargas pontuais e difusas, além dos coeficientes das equações. Em relação às cargas, foram consideradas três fontes distintas, referentes àquelas geradas pelo esgotamento sanitário, as geradas a partir do uso do solo, além das oriundas da atividade agropecuária.

A seguir, a Figura 3 apresenta um mapa da bacia onde são definidos os pontos de monitoramento, as respectivas sub-bacias, o trecho de rio principal simulado e as cargas consideradas em ambos os modelos. As fontes pontuais são definidas aqui como os aportes dos principais afluentes e as cargas geradas em suas respectivas bacias. As fontes difusas foram definidas como contribuições incrementais entre as sub-bacias de monitoramento.

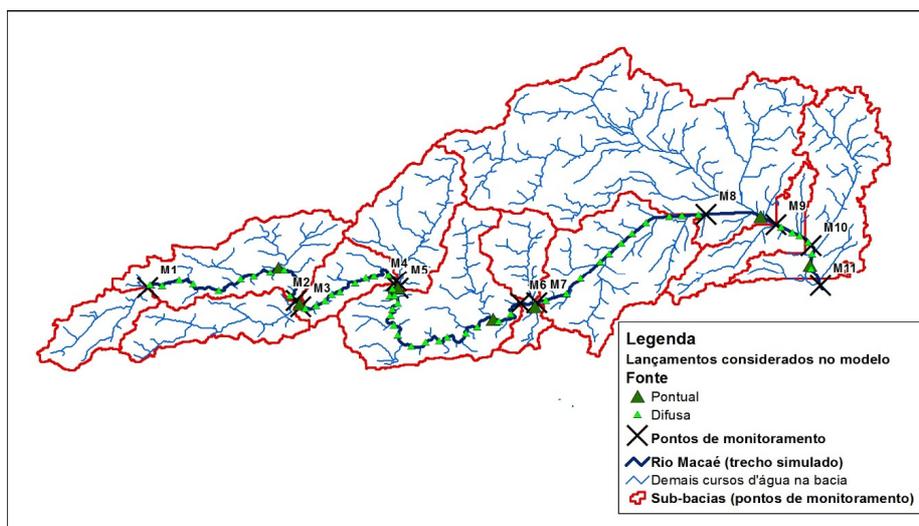


Figura 3 – Esquema da bacia com os pontos de monitoramento, sub-bacias correspondentes e principais cargas aportantes.

### 3. RESULTADOS

Como dito anteriormente, procurou-se estabelecer os mesmos valores dos coeficientes das equações e também em relação aos percentuais de abatimento das cargas, cujos valores foram obtidos no processo de calibração do modelo QUAL2K. Os resultados apresentados aqui correspondem à calibração realizada na segunda campanha de monitoramento, correspondendo a um período de forte estiagem na bacia. Em relação aos dados de vazão, em ambos os modelos foram utilizados os valores de vazões medidas juntamente com as amostragens

A seguir, a Figura 4 apresenta os perfis longitudinais dos parâmetros DBO, oxigênio dissolvido, fósforo orgânico, fósforo inorgânico, amônia e coliformes ao longo do curso principal do rio Macaé simulados com o QUAL2K e com a metodologia apresentada no presente trabalho.

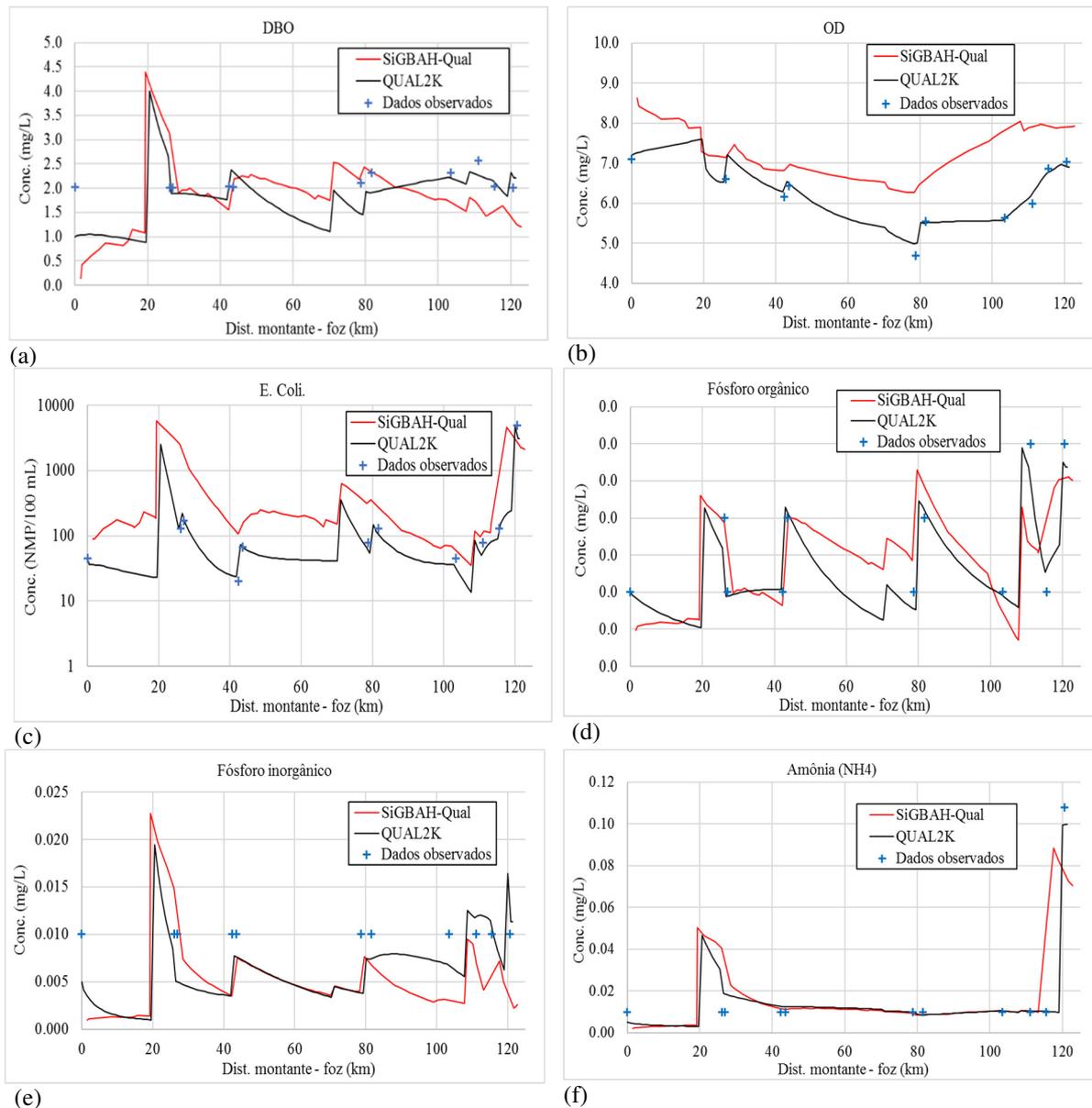


Figura 4 - Resultados da simulação do QUAL2-K e do SiGBAH-Qual ao longo do curso principal do rio Macaé para os seguintes parâmetros: a) DBO, b) oxigênio dissolvido, c) coliformes, d) fósforo orgânico, e) fósforo inorgânico e f) amônia.

#### 4. CONCLUSÕES

Considera-se satisfatório o comparativo entre as duas metodologias de modelagem da qualidade da água. Os picos de concentração representam a entrada dos principais afluentes e suas devidas cargas estimadas a partir dos pontos de amostragem. Além dessa questão, outros aspectos ainda precisam ser trabalhados e discutidos, como o entendimento de algumas diferenças apresentadas entre as duas modelagens, se esta diferença é decorrente do processo de alocação de cargas ou então em virtude das equações adotadas em cada modelo. Também será avaliada a possibilidade de inclusão de um esquema numérico simplificado, e verificar se há melhorias em relação ao modelo analítico. Concluindo-se que o modelo SIGBAH-Qual é capaz de produzir resultados semelhantes ao QUAL2K, considerando também a simplificação de alguns processos, seria possível oferecer a metodologia como alternativa nos processos de planejamento e gestão de recursos hídricos. As vantagens se devem principalmente devido à facilidade de uso ao ser operacionalizado em um ambiente SIG, considerando nesse aspecto toda a praticidade de inclusão de diversas bases de informações, como os mapas de uso de solo e de localização dos núcleos populacionais, além da facilidade de integração com um modelo hidrológico, sendo possível, testar cenários de vazões de referência, como a Q90% ou a Q7,10.

#### 5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- COLLISCHONN, W. Simulação Hidrológica de Grandes Bacias. 2001. 194f. Tese (Doutorado). Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental. Instituto de Pesquisas Hidráulicas. Universidade Federal do Rio Grande do Sul. 194 p.
- FAN, C.; WANG, W. S.; LIU, K. F. R.; YANG, T. M. Sensitivity analysis and water quality modeling of a tidal river using a modified streeter–phelps equation with HEC-RAS-calculated hydraulic characteristics. *Environmental Modeling & Assessment*, v. 17, n. 6, p. 639–651, 2012.
- FERREIRA, D. M. Simulação hidrodinâmica e de qualidade da água em rios: impacto para os instrumentos de gestão de recursos hídricos. Dissertação de Mestrado - Pós-Graduação em Engenharia de Recursos Hídricos e Ambiental da Universidade Federal do Paraná. Curitiba, 2015.
- FOSTER, J.A. & MCDONALD, A.T. (2000) Assessing pollution risks to water supply intakes using geographical information systems (GIS). *Environmental Modelling & Software*, v. 15, n. 3, p. 225-234.
- LINS, R.C.; MENDES, C.A.B.; AGRA, S.G.; CARVALHO, A.E.; FRAGOSO JR, C.R. (2012) Integração de um modelo hidrológico a um SIG para avaliação da qualidade da água na Bacia do Rio Doce. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, v. 17, p. 171-181.
- KAYSER, R. H. B.; COLLISCHONN, W. Integrando Sistema de Suporte à Decisão para Gerenciamento de Recursos Hídricos a um SIG de Código Aberto. In: XX SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS, 2013, Bento Gonçalves. Anais do XX SBSR. Porto Alegre: ABRH, 2013.
- KNAPIK, H. G.; FRANÇA, M. S.; MASINI, L. S.; *et al.* Análise crítica da calibração do modelo de qualidade de água QUAL2E – estudo de caso da bacia do Alto Iguaçu. *Revista Engenharia Sanitária e Ambiental*, v. 5, n. 2, p. 25–37, 2008.
- MAIDMENT D. R. Arc Hydro: GIS for Water Resources. Redlands, USA: ESRI Press. 2002
- RIO DE JANEIRO. Elaboração do Plano de Recursos Hídricos da Região Hidrográfica Macaé/Ostras. Relatório Técnico. Rio de Janeiro, 2014.
- SPERLING, M. V. Estudos e modelagem da qualidade da água de rios. Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental. Belo Horizonte, MG. UFMG. 2007.
- TSCHIEDEL, A. F. Simulação de Qualidade da Água para Cenários Futuros através do Modelo Qual-2K: Um Estudo de Caso para o Rio Macaé, RJ. Porto Alegre, 135 p., 2013. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Ambiental) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul.