

ARTIGO ORIGINAL

Comparação entre ferramentas computacionais na modelagem de qualidade da água em ambiente lótico

Comparison of computational tools for water quality modeling in lotic ambient



• **Data de entrada:**
11/10/2019



• **Data de aprovação:**
17/03/2020

Juliana Correa Riquieri¹ | Marcio Ricardo Salla^{1*} | Carlos Eugênio Pereira¹ |
Túlio Machado Humberto Guimarães² | William Dantas Vichete³

DOI: <https://doi.org/10.36659/dae.2021.056>

ORCID ID

Riquieri JC  <https://orcid.org/0000-0003-1570-2382>
Salla MR  <https://orcid.org/0000-0003-2567-6173>

Pereira CE  <https://orcid.org/0000-0002-8250-715X>
Guimarães TMH  <https://orcid.org/0000-0002-0643-5836>
Vichete WD  <https://orcid.org/0000-0003-1225-1037>

Resumo

A modelagem de qualidade da água por meio de ferramentas computacionais tem se mostrado um importante instrumento no planejamento e na gestão dos recursos hídricos. A escolha da ferramenta leva em consideração os objetivos da aplicação, detalhamento físico e hidráulico, correlação entre os processos físicos e bioquímicos e quantidade de indicadores de qualidade da água. Este artigo comparou as ferramentas QUAL-UFMG, QUALI-TOOL e HEC-RAS quanto à criação da topologia hídrica, entrada dos dados (geométricos, hidráulicos, fluviométricos, de qualidade da água e coeficientes dos processos físicos e bioquímicos) e interpretação dos resultados nas simulações dos indicadores oxigênio dissolvido, demanda bioquímica de oxigênio, nitrogênio orgânico, amônia, nitrato e fósforo total. Foi utilizado um curso de água com capacidade hídrica média anual de 4,8 m³/s e lançamento pontual de alta carga poluidora (528,8 kgDBO/dia, 163,8 kgNO/dia e 6,2 kgP/dia no período de estiagem). Os dados de entrada foram extraídos de De Paula (2011) e Salla et al. (2013). Diante da comparação entre as ferramentas, observou-se que os métodos de cálculo da profundidade líquida e velocidade do escoamento interferiram diretamente nos perfis longitudinais de oxigênio dissolvido e série de nitrogênio nas situações em que os coeficientes dos processos físicos e bioquímicos são estimados a partir de equacionamentos da literatura. Para estudos mais simplificados, em escalas reduzidas, as ferramentas QUAL-UFMG e QUALI-TOOL são as sugeridas, além de possuírem interface amigável, gratuita e de fácil acesso ao usuário. A ferramenta HEC-RAS, por se tratar de um modelo complexo e com conexão com SIG, é aconselhada em estudos que exigem um maior nível de detalhamento.

Palavras-chave: Qualidade da água. Modelagem matemática. QUAL-UFMG. QUALI-TOOL. HEC-RAS.

Abstract

Water quality modeling through computational tools has proved to be an important tool in planning and managing water resources. The tool choice considers application goals, physical and hydraulic detailing, physical and bio-

¹ Universidade Federal de Uberlândia (UFU) - Uberlândia - Minas Gerais - Brasil.

² Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS) - Porto Alegre - Rio Grande do Sul - Brasil.

³ Escola Politécnica da Universidade de São Paulo (Poli/USP) - São Paulo - São Paulo - Brasil.

* **Autor correspondente:** sallamarcioricardo@gmail.com.

chemical processes correlation and quantity of parameters. This paper compared QUAL-UFMG, QUALI-TOOL and HEC-RAS tools as for the creation of water topology, data input (geometric, hydraulic, fluviometric, water quality and coefficients of physical and biochemical processes). It also analyzed the results in simulations of dissolved oxygen, biochemical demand for oxygen, organic nitrogen, ammonia, nitrate and total phosphorus. We used a watercourse with an average annual water capacity of 4.8 m³/s and punctual release of high pollutant load (528.8 kgDBO/day, 163.8 kgNO/day and 6.2 kgP/day during the dry season). The input data was extracted from De Paula (2011) and Salla et al. (2013). Considering the comparison between the tools, the methods of calculating the net depth and flow velocity directly interfered in longitudinal profiles of dissolved oxygen and nitrogen series in situations where the coefficients of physical and biochemical process were estimated from literature equations. For more simplified studies, on a reduced scale, QUAL-UFMG and QUALI-TOOL tools are suggested, with user-friendly interface, free distribution and easy access to the user. The HEC-RAS tool, as it is a complex model and connected to GIS, is recommended in studies that require a greater level of detail.

Keywords: Water quality. Mathematical modeling. QUAL-UFMG. QUALI-TOOL. HEC-RAS.

1 INTRODUÇÃO

O desenvolvimento acelerado da economia e da tecnologia, aliado às mudanças nos processos produtivos, faz com que a indústria explore o meio ambiente sem nenhum sentimento de gestão e preservação. Como consequência, as riquezas naturais são afetadas direta e indiretamente, causando impactos negativos, irreversíveis ou de difícil recuperação.

Dentro desse contexto, a poluição dos recursos hídricos tem se tornado cada vez mais fonte de estudos e pesquisas em todo o mundo. A poluição das águas superficiais é causada pelo lançamento pontual de cargas poluidoras domésticas e industriais, sem nenhum tratamento ou com tratamento inadequado, e também pelo lançamento difuso da carga de agrotóxicos e fertilizantes agrícolas. Essas cargas poluidoras afetam negativamente o meio aquático, deixando a qualidade da água em desacordo com padrões exigidos por instituições ambientais regulamentadoras.

Assim, a fim de mitigar a situação da degradação dos recursos hídricos, um importante passo é compreender a capacidade de autodepuração dos sistemas hídricos. O marco inicial da modela-

gem matemática de autodepuração foi proposto por Streeter-Pheelps, no rio Ohio, nos Estados Unidos, assumindo os processos de reaeração natural e degradação da matéria orgânica carbonácea (SCAVIA et al., 2006; FAN et al., 2012; MENDES, 2014). Sua estrutura matemática serviu de base para a maioria dos modelos mais avançados de simulação existentes no mundo (CAO e ZHANG, 2006; KANNEL et al., 2011; SALLA et al., 2013; FLECK, TAVARES e EYNG, 2013).

Desde então, impulsionadas pelo incremento na capacidade computacional, inúmeras ferramentas computacionais para modelagem de qualidade da água em ambientes lênticos e lóticos foram desenvolvidas, diferentes por diversos aspectos, tais como capacidade de processamento, representação dos processos físicos, químicos e biológicos, quantidade de indicadores simulados e interações entre esses indicadores, modo de alimentação dos dados de entrada, visualização dos resultados e integração com plataforma SIG.

Contudo, é normal que o usuário tenha dúvida sobre qual é a melhor ferramenta computacional a utilizar em um estudo ou projeto. Diante dessa situação, é fundamental conhecer previamente as potencialidades e limitações das diversas fer-

ramentas. É nessa vertente que o presente artigo está inserido.

O artigo avaliou a aplicabilidade das ferramentas computacionais QUAL-UFMG (VON SPERLING, 2007), QUALI-TOOL (MAGALHÃES et al., 2017) e HEC-RAS (HEC, 2016) em um curso de água de pequeno porte e que recebe lançamentos pontuais e difusos de carga poluidora em seu curso de água principal. As ferramentas foram comparadas quanto à criação da topologia do sistema hídrico, aos procedimentos para entrada dos dados (hidráulicos, fluviométricos, de qualidade da água e coeficientes dos processos físicos e bioquímicos) e interpretação dos resultados para simulações nos períodos de estiagem e chuvoso.

2 METODOLOGIA

2.1 Área de estudo

Foi escolhido um trecho de 46,5 km no baixo curso do rio Jordão, bacia hidrográfica do rio Dourado, Triângulo Mineiro. De acordo com o diagrama unifilar ilustrado na Fig. 1, foram utilizados três pontos de monitoramento fluviométrico e de qualidade da água (pontos A, B e C). Foram considerados os tributários menores ao longo do trecho do rio Jordão (tributários identificados como T3 até T19 na Fig. 1), cujos valores de vazão e qualidade da água foram estimados, considerando água de boa qualidade (SALLA et al., 2013). Ainda na Fig. 1, as estações ST1 até ST4 foram utilizadas para levantamentos batimétricos.

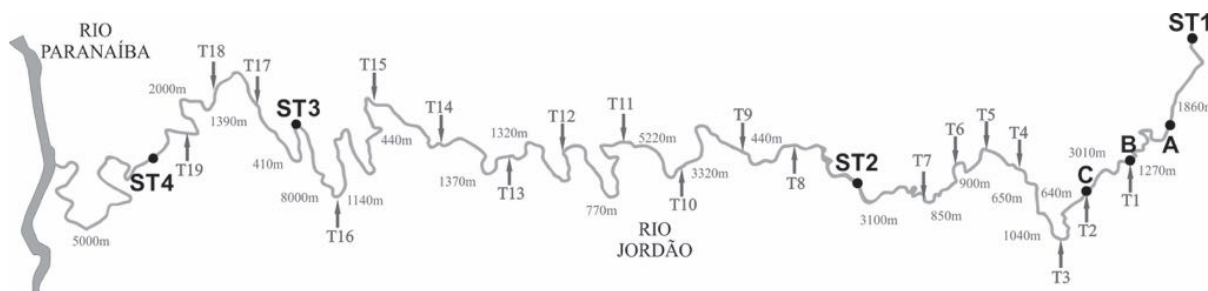


Figura 1 - Diagrama unifilar no baixo curso do rio Jordão

O principal afluente do rio Jordão é o córrego Brejo Alegre, que recebe efluente sem tratamento gerado pelo município de Araguari-MG. Essa cidade, localizada na porção nordeste do Triângulo Mineiro, possui uma área de aproximadamente 2.729,508 km² e população estimada em 117.445 habitantes, de acordo com Brasil (2017). O córrego Brejo Alegre apresenta elevado grau de degradação (PEREIRA e LIMA, 2015).

2.2 Equacionamento matemático

Independentemente da ferramenta computacional, o comportamento dos indicadores de quali-

dade da água no rio é representado pela equação diferencial de difusão-advectação (Eq. 1).

$$\frac{dC}{dt} + \frac{d(u.C_i)}{dx} = \frac{d}{dx} \left(E. \frac{dC_i}{dx} \right) + \frac{Sd_i}{V} + \sum W_i \quad (1)$$

Na Eq. 1, t é o tempo a partir da zona de mistura (dia); C é a concentração do indicador (mg/L); E é o coeficiente de difusão longitudinal (m²/dia); i é um indicador qualquer (neste estudo, oxigênio dissolvido, demanda bioquímica de oxigênio, fósforo total, nitrogênio orgânico, amônia e nitrato); x é a distância longitudinal do trecho de

rio estudado a partir da zona de mistura (m); u é a velocidade média (m/dia); V é o volume líquido do trecho estudado (m^3); S_d é a carga de entrada do indicador de qualidade de forma difusa no trecho de rio (g/dia); ΣW representa o conjunto de processos físicos e bioquímicos que aumenta ou diminui a carga do indicador na massa líquida ($g/m^3.dia$).

A solução da equação diferencial de advecção-difusão nas ferramentas QUAL-UFMG e QUALI-TOOL é obtida pelo método de diferenças finis-

tas, enquanto a ferramenta HEC-RAS emprega o esquema numérico explícito denominado QUICKEST-ULTIMATE (*Quadratic Upstream Interpolation of Convective Kinematics with Estimated Streaming Terms*), proposto por Leonard (1979) e Leonard (1991).

Os processos bioquímicos e físicos considerados e suas relações com os indicadores estão ilustrados na Fig. 2, com os coeficientes que representam as reações bioquímicas, de sedimentação e de ressurgimento de fundo nas ferramentas.

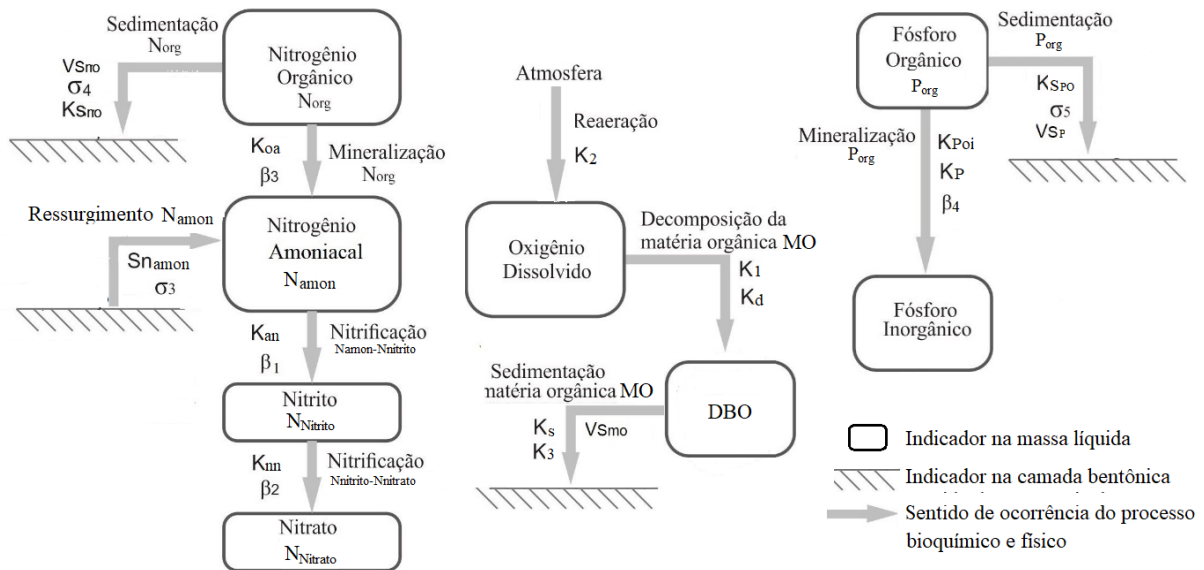


Figura 2 - Processos relacionados aos indicadores e coeficientes de reações bioquímicas, de sedimentação e de ressurgimento de fundo

2.3 Dados de entrada

2.3.1 Coeficientes de reações bioquímicas, de sedimentação e de ressurgimento de fundo

A Tabela 1 traz os processos e suas descrições, as identificações dos coeficientes por ferramenta e os valores dos coeficientes extraídos de Salla et al. (2013).

O coeficiente de reeração k_2 foi calculado a partir de equações da literatura, onde k_2 é função da profundidade líquida h , velocidade média do escoamento v e vazão Q (MAGALHÃES et al., 2017; Von SPERLING, 2007). Dentre as ferramentas, QUALI-TOOL é a única que calcula automaticamente k_2 . Na ferramenta QUAL-UFMG, após o cálculo em planilha separada, o usuário alimenta

a ferramenta com os coeficientes de ajuste da equação (2). Na ferramenta HEC-RAS é necessário realizar os cálculos em planilha separada.

$$k_2 = m \cdot Q^n \quad (2)$$

Na Eq. 2, k_2 é o coeficiente de reaeração (dia^{-1}); m e n são os coeficientes de ajuste (adimensionais); Q é a vazão superficial no curso de água (m^3/s).

Tabela 1 - Processos e suas descrições, coeficiente por ferramenta e valores adotados

Processos bioquímicos	Descrição	QUAL-UFGM	QUALI-TOOL	HEC-RAS	Valores adotados	
		Coeficiente (unidade)			Período chuvoso	Período estiagem
Reaeração	Reoxigenação natural na massa líquida	k_2 (dia^{-1})			Equações da literatura	
Decomposição MO	Degradação aeróbia da DBO	k_d (dia^{-1})	k_d (dia^{-1})	k_1 (dia^{-1})	0,12	0,24
Mineralização N_{org}	Conversão do nitrogênio orgânico para amoniacal	k_{oa} (dia^{-1})	k_{oa} (dia^{-1})	β_3 (dia^{-1})	0,20	0,25
Nitrificação $N_{amon} - N_{nitrito}$	Conversão de nitrogênio amoniacal em nitrito	k_{an} (dia^{-1})	k_{an} (dia^{-1})	β_1 (dia^{-1})	0,15	0,25
Nitrificação $N_{nitrito} - N_{nitrato}$	Conversão de nitrito em nitrato	k_{nn} (dia^{-1})	k_{nn} (dia^{-1})	β_2 (dia^{-1})	0,20	1,00
Mineralização P_{org}	Conversão de fósforo orgânico em inorgânico.	k_{poi} (dia^{-1})	k_p (dia^{-1})	β_4 (dia^{-1})	0,20	0,30
Processos físicos	Descrição	QUAL-UFGM	QUALI-TOOL	HEC-RAS	Valores adotados	
		Coeficiente (unidade)			Período chuvoso	Período estiagem
Sedimentação MO	Decaimento de DBO por sedimentação	k_s (dia^{-1})	$V_{s_{mo}}$ (m/dia)	k_3 (dia^{-1})	0,05	0,05
Sedimentação N_{org}	Decaimento nitrogênio orgânico por sedimentação	$k_{s_{no}}$ (dia^{-1})	$V_{s_{no}}$ (m/dia)	σ_4 (dia^{-1})	0,05	0,05
Sedimentação P_{org}	Decaimento de fósforo orgânico por sedimentação	$k_{s_{po}}$ (dia^{-1})	V_{s_p} (m/dia)	σ_5 (dia^{-1})	0,02	0,05
Liberção N_{amon}	Liberção do nitrogênio amoniacal por sedimentação de fundo	$S_{n_{amon}}$ ($\text{g}/\text{m}^2 \cdot \text{dia}$)	$S_{n_{amon}}$ ($\text{g}/\text{m}^2 \cdot \text{dia}$)	σ_3 ($\text{g}/\text{m}^2 \cdot \text{dia}$)	0,10	0,50

2.3.2 Vazão e qualidade de água

A Tabela 2 traz os dados de entrada de vazão e de qualidade da água adotados para o período de estiagem e chuvoso (SALLA et al., 2013).

Tabela 2 - Dados de entrada de vazão e qualidade de água

Parâmetro	Ponto A		Ponto B		Ponto C		T3 a T19	
	Estiagem	Chuvoso	Estiagem	Chuvoso	Estiagem	Chuvoso	Estiagem	Chuvoso
Vazão (m^3/s)	5,66	15,57	0,4	1,62	0,15	0,58	0,06 - 0,15	0,16 - 0,54
OD (mg/L)	6,95	6,81	5,55	5,48	7	6,06	7,0	7,0
DBO (mg/L)	7,18	6,71	15,3	23,4	8,7	8,45	2,0	2,0
N_{total} (mg/L)	2,01	2,01	4,74	6,84	2,25	2,77	1,0	1,0
Amônia (mg/L)	0,48	0,36	1,27	2,18	0,5	0,7	1,0	1,0
Nitrito (mg/L)	0,03	0,09	0,4	0,55	0,07	0,13	---	---
Nitrato (mg/L)	1,17	1,26	2,4	2,98	1,3	1,48	---	---
P_{org} (mg/L)	0,03	0,015	0,09	0,14	0,035	0,05	0,01	0,01
P_{inorg} (mg/L)	0,03	0,015	0,09	0,14	0,035	0,05	0,01	0,01

O procedimento para inserção dos dados de entrada de vazão e de qualidade da água nas ferramentas é diferente. A ferramenta QUAL-UFMG é a mais trabalhosa; o usuário precisa identificar a linha correta para introdução dos dados de entrada dentre os trechos discretizados. Na ferramenta QUALI-TOOL o usuário deve apenas informar a distância, a partir do ponto inicial da modelagem, onde são inseridos os dados de entrada. Em HEC-RAS, dentro da plataforma da ferramenta, a inserção está vinculada à criação de uma seção transversal no ponto de confluência com o rio principal.

2.3.3 Grandezas hidráulicas

As grandezas hidráulicas, profundidade líquida e velocidade média do escoamento foram determinadas para a estimativa do coeficiente de reaeração natural a partir de equações da literatura. Dentro das ferramentas computacionais, as grandezas hidráulicas podem ser obtidas por relações potenciais na ferramenta QUAL-UFMG, equação de Manning na ferramenta QUALI-TOOL e *Standard Step Method* na ferramenta HEC-RAS. No entanto, os valores de declividade de fundo do canal, geometria transversal do canal e coeficiente de rugosidade de Manning

são fundamentais na obtenção dessas grandezas hidráulicas.

As declividades de fundo assumidas nas ferramentas estão ilustradas na Fig. 3. A declividade de fundo não é um dado de entrada na ferramenta QUAL-UFMG, uma vez que utiliza relações potenciais na obtenção das grandezas hidráulicas. A ferramenta QUALI-TOOL adota uma declividade para cada subtrecho formado entre dois pontos georreferenciados ao longo do curso de água. Com isso, o maior número de pontos georreferenciados propicia declividade de fundo mais realista (foram adotadas 392 coordenadas geográficas – mais altitude – para demarcação do rio e posteriormente discretizado em 1600 nós). A ferramenta HEC-RAS adota declividade fixa para cada subtrecho formado entre duas seções transversais alimentadas na topologia. Na Fig. 3 foram consideradas as seções medidas ST1 até ST4 e as seções estimadas para inserção dos tributários T1 até T19. A dificuldade operacional e financeira para o traçado de seções transversais acarreta declividades de fundo simplificadas. Como exemplo, as cachoeiras e cascatas em HEC-RAS são representadas por seções transversais a montante e jusante do local de interesse.

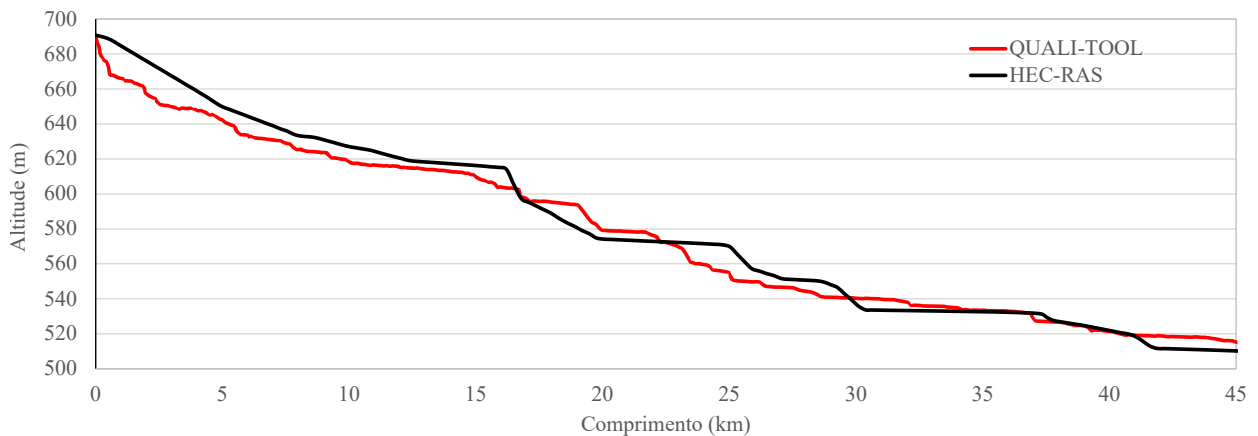


Figura 3 - Declividades de fundo assumidas nas ferramentas

As seções transversais ST1, ST2, ST3 e ST4 foram obtidas pelo método acústico de efeito doppler, conhecido como ADCP (*Acous-*

tic Doppler Current Profiler). Os dados geométricos das seções transversais são ilustrados na Tabela 3.

Tabela 3 - Dados geométricos das seções transversais

Seção transversal	Distância entre seções (km)	Largura da base (m)	Declividade talude esquerdo (graus)	Declividade talude direito (graus)
ST1	---	10,0	27,5°	22,4°
ST2	12,83	15,0	21,8°	90,0°
ST3	23,98	21,0	45,0°	90,0
ST4	4,61	7,5	7,4°	9,6°
Foz Rio Jordão	5,08	7,5	7,4°	9,6°

Foram consideradas geometrias transversais fixas para o canal entre as estações: ST1 e ST2, adotando a seção ST1 com 12,83 km; ST2 e ST3, adotando a seção ST2 com 23,98 km; ST3 e ST4, adotando a seção ST3 com 4,61 km; ST4 e a foz do rio Jordão, adotando ST4 com 5,08 km. O coeficiente de rugosidade de Manning foi considerado fixo e igual a $0,04 \text{ m}^{-1/3} \cdot \text{s}$ para as simulações nas ferramentas QUALI-TOOL e HEC-RAS (CHOW, 1959).

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 Escala de trabalho

As três ferramentas trabalham em ambiente lótico, todavia em escalas diferentes. A ferramenta QUAL-UFMG, apesar de não limitar a quantidade de afluentes, torna-se imprópria para cursos de água de ordem 3 ou superior, também porque não vincula os resultados das simulações de ordem inferior aos dos de ordem superior. A quantidade máxima de 15 tributários na ferramenta QUALI-TOOL limita sua capacidade espacial, além da lentidão no processamento em *Visual Basic*. Já a ferramenta HEC_RAS trabalha em qualquer escala, desde um trecho de rio até uma bacia hidrográfica complexa.

3.2 Topologia do sistema hídrico

A topologia foi gerada apenas nas ferramentas computacionais QUALI-TOOL e HEC-RAS. A ferramenta QUAL-UFMG não gera uma topologia, apenas possibilita a criação de um diagrama unifilar para entendimento do sistema.

A criação da topologia em QUALI-TOOL foi considerada a mais trabalhosa pelo fato de demandar o lançamento manual de coordenadas geográficas (latitude, longitude e altitude) ao longo de todo o trecho de rio estudado. Os 392 pontos para preenchimento de toda extensão de rio foram levantados manualmente, um a um, em graus e então transformados em UTM para alimentar a planilha, o que tornou esta etapa mais complexa e demorada. Outro ponto considerado negativo nesta etapa é que, quanto maior a quantidade de trechos discretizados, mais lento é o processamento na planilha de Excel. Isso ocorre porque, na linguagem de programação *Visual Basic*, o processo de leitura e armazenamento dos dados de entrada, incluídos na planilha pelos vetores no código computacional, é lento. Da mesma forma, é lenta a resposta do código à planilha de cálculo. Igual problema foi enfrentado por Guimarães (2018), no ribeirão do Salitre, Triângulo Mineiro, o qual levantou 77 pontos em um trecho de 7,29 km no ribeirão do Salitre, com discretização do curso de água em 240 nós.

Quanto à HEC-RAS, desde o princípio do processo de modelagem apresentou-se como uma ferramenta complexa para entendimento de todo o processo de lançamento da topologia do sistema. Durante sua utilização, percebe-se o quanto o modelo é altamente hermético e abrangente, pois inclui elementos de edição geométrica capazes de simular pontes, áreas de inundação, estruturas laterais e inclinadas, além de simulações em 2D.

Uma vantagem do HEC-RAS, em comparação às demais ferramentas, é sua interface com o SIG (HEC-GeoRas), que possibilita a apresentação e a interpretação visual das informações de entrada e saída do modelo. Esse processo demanda um conhecimento prévio tanto do modelo como da plataforma SIG, de forma que o usuário precisa compreender o passo a passo para utilização correta das imagens e dados georreferenciados.

Essa interação dinâmica entre a plataforma SIG e os dados de entrada facilita a compreensão da área de interesse e do problema. A plataforma SIG, aliada a um modelo matemático, é capaz de gerar bancos de dados espaciais e o geoprocessamento das informações, facilitando a descrição detalhada da região de estudo, gerando dados de entrada em modelos hidrológicos e de qualidade da água, como seções transversais. Outro ponto positivo desta interface com SIG é que os resultados gerados pelo modelo podem ser enviados de volta à plataforma GeoRas, a fim de mapear outros parâmetros como, por exemplo, profundidade e velocidade do escoamento. Apesar dessa interação com o SIG, a ferramenta também permite ao usuário realizar o lançamento da geometria do rio (rio principal, tributários, junções, elementos físicos e seções transversais) manualmente, sem utilizar dados georreferenciados.

Jensen e Lowney (2004) também avaliaram a ferramenta HEC-RAS positivamente quanto a

sua interface com a plataforma SIG. Os autores destacaram a facilidade de exibição dos dados de saída por meio de mapas georreferenciados. Consideraram o modelo robusto e abrangente, de modo que a interface gráfica é simples e de fácil interpretação.

3.3 Grandezas hidráulicas

Como já mencionado anteriormente, nas simulações de autodepuração em curso de água, as grandezas hidráulicas (profundidade média e velocidade média do escoamento) são utilizadas na estimativa de alguns coeficientes de reação bioquímica por meio de equações da literatura. A determinação dessas grandezas é diferente para as três ferramentas computacionais analisadas.

A versão original da ferramenta QUAL-UFMG considera relações potenciais fixas para todo o curso de água. Essas relações potenciais são obtidas apenas quando existe estação fluviométrica em operação, o que torna a utilização deste método limitada em função da deficiência de estações em operação no país. Todavia, em função de a modelagem em QUAL-UFMG ser realizada em planilha de cálculo Excel que pode ser modificada, nada impede ao usuário alterar o método de cálculo das grandezas hidráulicas (como exemplo, a utilização da equação de Manning para o cálculo da profundidade líquida e a equação da continuidade para o cálculo da velocidade média do escoamento).

De uma forma geral, a versão original da ferramenta QUAL-UFMG é simplificada quanto ao cálculo das grandezas hidráulicas, uma vez que considera uma seção transversal retangular única (esta seção aproxima-se da realidade apenas em cursos de água muito largos e rasos) e valores fixos dos coeficientes de ajuste das relações potenciais para todo o trecho de rio.

A utilização da ferramenta QUAL-UFMG no rio Jordão trouxe uma tarefa extra ao usuário em função da alteração da seção transversal ao longo do trecho de rio estudado. Foram consideradas 4 seções trapezoidais diferentes ao longo de 4 trechos no rio Jordão, conforme já mencionado. Essa alteração exigiu muita dedicação do usuário na alimentação dos dados ao longo dos trechos discretizados.

Na ferramenta QUALI-TOOL, por se tratar de abas específicas para hidráulica do modelo, o processo foi simples e rápido tanto para compreensão como para obtenção dos resultados hidráulicos. A ferramenta faz uso da equação de Manning e equação da continuidade. A alimentação das características físicas do rio, como declividade de talude direito e esquerdo, largura de base e coeficiente de rugosidade de Manning, é feita para cada trecho específico definido pelo usuário, o que torna a atividade facilitada e mais próxima da realidade do rio. Os dados de declividade lon-

gitudinal são obtidos previamente no traçado da topologia do sistema hídrico.

Quanto ao lançamento do modelo hidráulico em HEC-RAS, a etapa é simples, com a necessidade de introdução do aporte de vazão nas seções transversais e as declividades iniciais e finais nos dados de contorno para simulação de fluxo permanente.

Para geração de bons resultados da modelagem da qualidade do rio Jordão no HEC-RAS, a ferramenta exige um modelo hidráulico estabilizado. Entretanto, a quantidade de seções transversais disponíveis neste estudo (seções ST1 até ST4 medidas e seções estimadas para aporte dos tributários T1 até T19) não permitiu realizar um bom modelo hidráulico, estável e dentro das limitações que a ferramenta necessita. A Fig. 4 traz os perfis longitudinais de profundidade líquida e velocidade média do escoamento utilizados por QUAL-UFMG, QUALI-TOOL e HEC-RAS ao longo dos 46,5 km do rio Jordão em seu baixo curso.

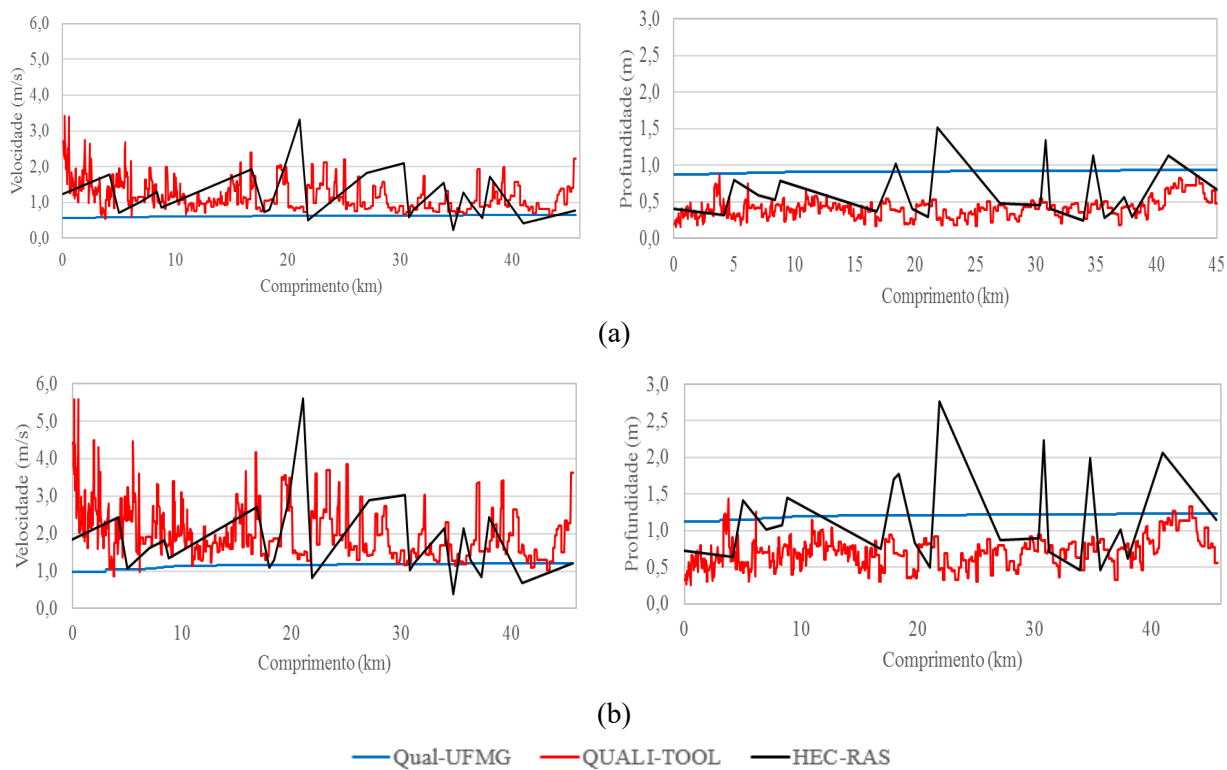


Figura 4 - Perfis longitudinais de profundidade líquida e velocidade média do escoamento: (a) período de estiagem; (b) período chuvoso

Os perfis longitudinais de velocidade do escoamento e profundidade líquida nas três ferramentas estão dentro de uma mesma faixa de valores (profundidade de 0,16 até 1,52 m e 0,26 até 2,77 m para os períodos de estiagem e chuvoso, respectivamente; velocidade média de 0,24 até 3,42 m/s e 0,39 até 5,60 m/s para os períodos de estiagem e chuvoso, respectivamente). As maiores oscilações na ferramenta QUALI-TOOL estão relacionadas ao maior detalhamento na declividade longitudinal. Apesar de a ferramenta HEC-RAS apresentar a melhor metodologia para estimativa da profundidade líquida, a quantidade reduzida de seções transversais levantadas em campo compromete a sua aplicação.

3.4 Dados fluviométricos e de qualidade de água

Na planilha de cálculo da ferramenta QUAL-UFMG existe a possibilidade de “Copiar-Colar” valores em várias células ao mesmo tempo, tomando-se a devida atenção com as mudanças de trecho. Todavia, o processo de discretização do trecho de rio deve ser feito de tal forma que permita alimentar os dados de entrada fluviométricos e de qualidade de água no lugar correto. Também, a forma de visualização global da planilha foi dificultada por conter inúmeras linhas e colunas (tem relação com o passo de discretização e comprimento do rio).

A ferramenta QUALI-TOOL foi considerada a mais amigável quanto à inserção de dados de entrada. Apesar da dificuldade inicial de obter a topologia do sistema, o restante do processo de modelagem assumiu-se didaticamente simples e de fácil entendimento. Quando o modelo indicava um suposto erro, o mesmo facilmente era identificado por meio das linhas de programação do *Visual Basic* e também pelo fato de a ferramenta possuir uma interface simples com o usuário, que permite corrigir o código computacional.

O manual que acompanha o download da ferramenta também auxilia a operação de modelagem, uma vez que é completo e autoexplicativo (MAGALHÃES et al., 2017).

Quanto ao HEC-RAS, a introdução dos dados fluviométricos e qualitativos foi feita de forma individualizada para cada seção e parâmetro, tornando o processo trabalhoso principalmente na etapa de qualidade. No entanto, o modelo dispõe de outras alternativas para inserção dessas informações, seja por valor constante (como foi realizado nestas simulações) ou por importação de tabelas e séries temporais dos indicadores. Com isso, vê-se a existência de alguns facilitadores dentro da plataforma, mas que demandam um certo conhecimento da ferramenta pelo usuário para explorá-la.

Além disso, a HEC-RAS incorpora na sua metodologia as variações climáticas da região. Apesar de não ter sido o caso deste estudo, o modelo também considera áreas de sombreamento ao longo do trecho do rio, o que mostra a complexidade da ferramenta frente às outras duas analisadas. Outro ponto positivo da ferramenta HEC-RAS é a possibilidade de injeção de ar entre duas seções transversais próximas, a fim de representar fenômenos físicos como ressaltos, cachoeiras ou estruturas hidráulicas.

3.5 Coeficientes de reações bioquímicas e de sedimentação

Na ferramenta QUAL-UFMG, com exceção do coeficiente de reaeração natural, todos os outros coeficientes são mantidos fixos ao longo do curso de água, devidamente corrigido em função da variação da temperatura da água ao longo do trecho de rio estudado. Apesar de trabalhosa, a ferramenta permite ao usuário variar os valores dos coeficientes ao longo dos trechos discretizados.

Na ferramenta QUALI-TOOL, a inserção de coeficientes também foi simples, identificando valores fixos para quaisquer trechos. Como vantagem, a ferramenta calcula o coeficiente K_2 automaticamente, desde que a célula correspondente permaneça vazia.

O módulo de qualidade da água na ferramenta HEC-RAS apresentou-se complexo pela quantidade de coeficientes que a ferramenta considera na modelagem, principalmente pelo fato de incluir as interações com as algas no sistema. Uma limitação apresentada na ferramenta HEC-RAS foi a invariabilidade dos coeficientes ao longo dos trechos, o que dificulta uma comparação de resultados entre outros modelos. Além disso, a

ferramenta HEC-RAS apresenta seus coeficientes com nomenclaturas distintas das outras duas ferramentas brasileiras, necessitando consultar constantemente o Manual do Usuário para auxílio na modelagem.

3.6 Geração e visualização dos resultados

Os resultados dos perfis longitudinais de OD, DBO, nitrogênio orgânico, nitrogênio amoniacal, nitrato e fósforo total, para as três ferramentas modeladas nos períodos chuvoso e estiagem, são representados na Fig. 5. Para a confecção dessa figura, os resultados tabelados nas ferramentas foram compilados em planilha separada.

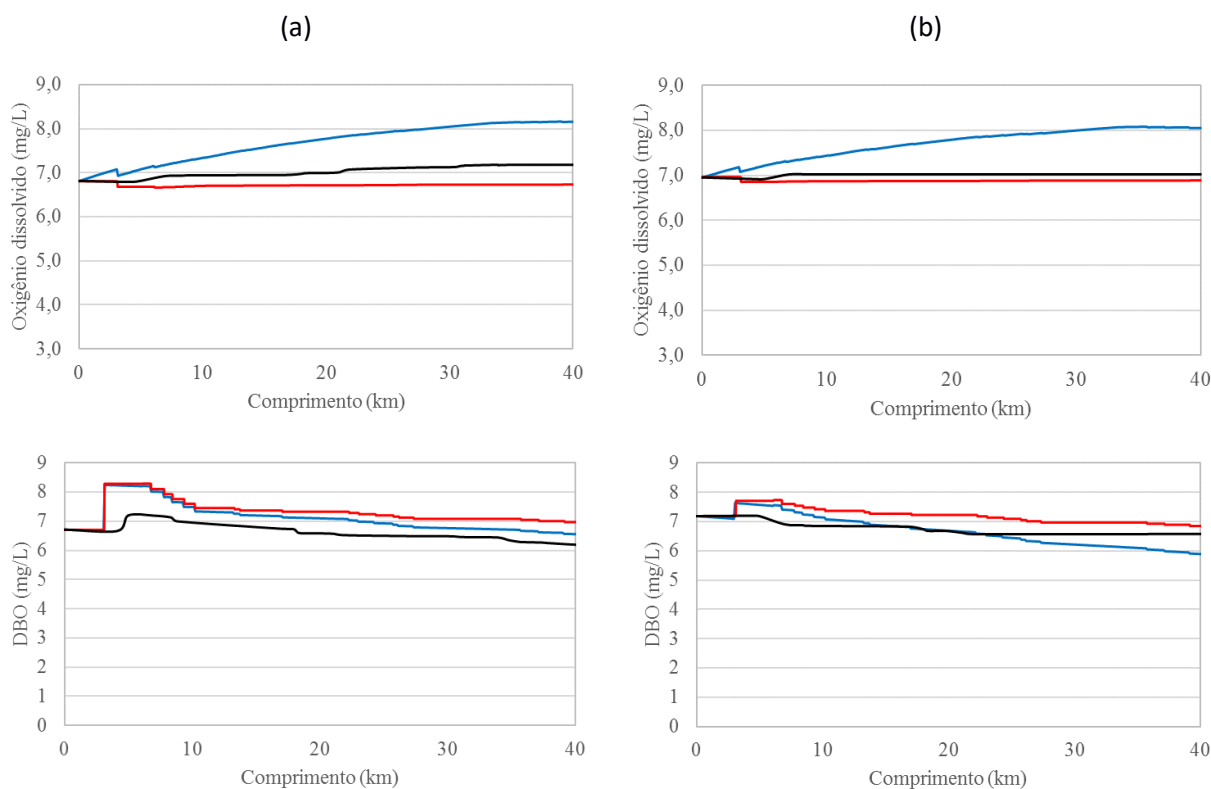
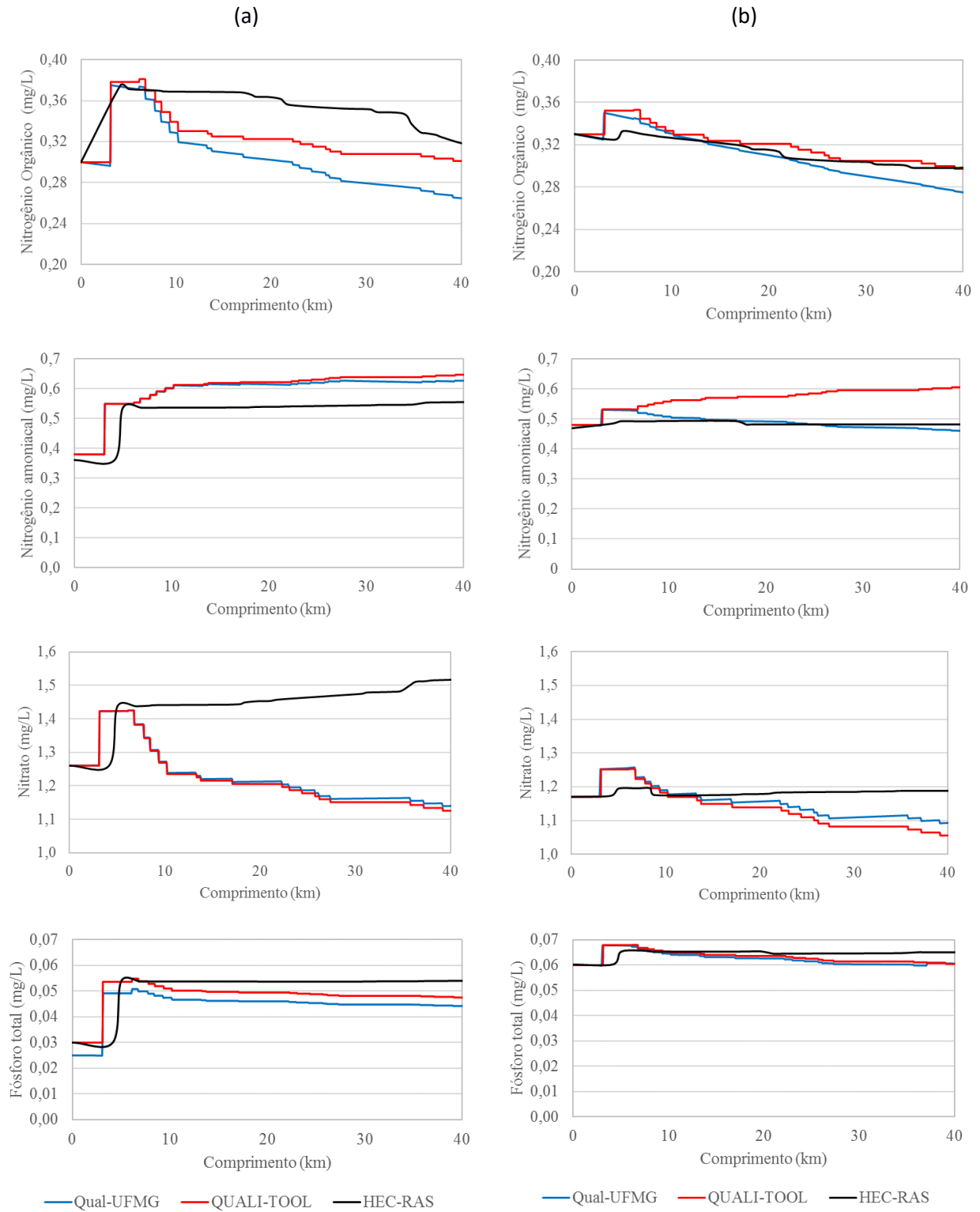


Figura 5 - Perfis longitudinais dos indicadores de qualidade da água em período: (a) chuvoso; (b) estiagem **continua...**

Figura 5 - Continuação...



De uma forma geral, no período de estiagem e chuvoso, os perfis longitudinais dos indicadores de qualidade mantiveram a mesma tendência, com exceção do oxigênio dissolvido na ferramenta QUAL-UFMG para o período de estiagem e chuvoso e série de nitrogênio na ferramenta HEC-RAS para o período chuvoso (Fig. 5).

O aumento de OD na ferramenta QUAL-UFMG está vinculado ao nível de discretização do coeficiente de reação natural k_2 ao longo do trecho do rio Jordão estudado. A ferramenta QUAL-UFMG adotou as mesmas relações potenciais de $h = f(Q)$ e $v = f(Q)$ para todo o trecho de rio a partir de uma única estação fluviométrica instalada no ponto A (localizado no rio Jordão a montante da confluência com o córrego Brejo Alegre – ver Fig. 1). Na realidade, as características geométricas do canal natural (largura de base, declividade de talude e rugosidade das paredes laterais e do fundo) se alteram ao longo do curso de água. Já as outras ferramentas, apesar de utilizar métodos diferentes para a estimativa das grandezas hidráulicas (equação de Manning na ferramenta QUALI-TOOL e Standard Step Method na ferramenta HEC-RAS), discretizaram as características geométricas ao longo de quatro trechos no rio Jordão.

A variação da série de nitrogênio na ferramenta HEC-RAS no período chuvoso tem relação com a profundidade líquida calculada nas três ferramentas (Fig. 4). As profundidades elevadas estimadas em HEC-RAS diminuem a capacidade de sedimentação do nitrogênio orgânico, resultando em maiores concentrações de nitrogênio na massa líquida, e conseqüentemente de nitrato após o processo de nitrificação. Todavia, a profundidade elevada minimiza a influência do ressurgimento de fundo do nitrogênio amoniacal, o que justifica também o perfil reduzido de nitrogênio amoniacal para a simulação na ferramenta HEC-RAS.

Nas ferramentas QUAL-UFMG e QUALI-TOOL, especificamente nas confluências dos tributários com o rio Jordão, as variações nos perfis em forma de degrau são ocasionadas pela descon sideração do coeficiente de difusão turbulenta em ambiente lótico. De acordo com Chapra (1997), Silvino (2008) e Salla et al. (2014), esse coeficiente pode ser desprezado em rios e córregos. Em contrapartida, a ferramenta HEC-RAS utiliza a equação de Fisher (1979) para a estimativa do coeficiente de difusão turbulenta. Esse estudo assumiu valores de 50 a 200 m^2/s para o coeficiente de difusão turbulenta na ferramenta HEC-RAS, o que justifica o comportamento mais suavizado do perfil junto às confluências dos afluentes com o rio Jordão.

4 CONCLUSÕES

O artigo comparou três ferramentas computacionais de modelagem de qualidade da água em ambiente lótico, com foco em um curso de água de pequeno porte com afluência de carga poluidora de uma cidade com aproximadamente 117.445 habitantes. As etapas de calibração e validação da modelagem matemática não foram abordadas no presente artigo, cujos coeficientes foram extraídos de De Paula (2011) e Salla et al. (2013). Exceção feita ao coeficiente de reaeração natural k_2 , que foi estimado a partir de equacionamento da literatura.

De uma forma geral, para estudos mais simplificados, com rede hidrográfica reduzida (com rios de ordem um e dois), as ferramentas QUAL-UFMG e QUALI-TOOL são as mais indicadas, visto que foram desenvolvidas em formatos de planilha de Excel, além de possuírem interface amigável, gratuita e de fácil acesso ao usuário. A vantagem de QUALI-TOOL sobre QUAL-UFMG está no mapeamento da extensão do escoamento por meio de coordenadas geográficas e altitude, o que permite representar a topologia hídrica. A

ferramenta HEC-RAS, por se tratar de um modelo complexo e com conexão com SIG, é aconselhada em bacia hidrográfica com elevada rede hidrográfica, cujo sucesso das simulações está vinculado às disponibilidades de pessoal qualificado e financeira para os trabalhos de campo batimétricos.

Os perfis longitudinais do indicador OD apresentaram comportamentos monotônicos para as ferramentas HEC-RAS e QUALI-TOOL, com variação máxima de 0,45 mg/L e 0,13 mg/L, respectivamente, no período chuvoso e de estiagem. A variação maior de OD em 1,17 mg/L para a ferramenta QUAL-UFMG, conforme já mencionado anteriormente, está vinculada à não discretização de k_2 ao longo do curso de água nesta ferramenta. Os perfis longitudinais dos indicadores DBO e fósforo total apresentaram comportamentos monotônicos para as três ferramentas. As variações máximas foram de 0,85 mg/L no período chuvoso e 0,79 mg/L no período de estiagem para DBO, além de 0,01 mg/L no período chuvoso e 0,0045 mg/L no período de estiagem para o fósforo total. As variações máximas foram de 0,056 mg/L no período chuvoso e 0,029 mg/L no período de estiagem para o nitrogênio orgânico, 0,091 mg/L no período chuvoso e 0,147 mg/L no período de estiagem para o nitrogênio amoniacal, além de 0,400 mg/L no período chuvoso e 0,132 mg/L no período de estiagem para o nitrato. O comportamento não monotônico para a série de nitrogênio tem relação com os diferentes métodos de cálculos das grandezas hidráulicas.

Considerando os valores limites de enquadramento do corpo hídrico definidos em resolução vigente (BRASIL, 2005), a ordem de grandeza das variações dos indicadores mostra que as três ferramentas apresentam comportamentos que não comprometem a representação matemática da capacidade de diluição, dispersão e conversões bioquímicas e físicas dos poluentes em ambiente lótico.

5 CONTRIBUIÇÃO DOS AUTORES

Todos os autores contribuíram de forma igualitária.

6 REFERÊNCIAS

- BRASIL. Conselho Nacional do Meio Ambiente - CONAMA. **Resolução nº 357**, de 17 de março 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, e dá outras providências. 2005.
- CAO, X.J. & ZHANG, H. Commentary on study of surface water quality model. **Journal of Water Resources and Architectural Engineering**, vol. 4, n. 4, p. 18–21. 2006.
- CHAPRA, S.C. **Surface water-quality modeling**. Tufts University, Long Grove, Illinois, Waveland Press Incorporation, 844 p. 1997.
- CHOW, V. T. **Open-Channel Hydraulics**. University of Illinois. The Blackburn Press, 2009.
- DE PAULA, L.M. **Avaliação da qualidade da água e autodepuração do rio Jordão, Araguari (MG)**. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Uberlândia, Engenharia Civil, Uberlândia, 177 p. 2011.
- FAN, C.; WANG, W.; LIU, K. F. 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. <https://doi.org/10.1007/s10666-012-9316-4>.
- FISCHER, H.B; LIST, E.J; KOH, R.C.Y; IMBERGER, J; BROOKS, N.H. **Mixing in inland and coastal waters**. San Diego, Academic Press, 1979.
- FLECK, L.; TAVARES, M.H.F; EYNG, E. Principais modelos matemáticos de qualidade da água e suas aplicações: uma revisão. **Revista Eletrônica Científica Inovação e Tecnologia**, v. 4, n. 7, p. 47-62. 2013.
- GUIMARÃES, T.M.H. **Interferência do uso e ocupação do solo na qualidade da água em bacia hidrográfica com disponibilidade hídrica crítica**. Dissertação (Mestrado), Universidade Federal de Uberlândia, Engenharia Civil, Uberlândia, 84 p. 2018.
- HEC - Hydrologic Engineering Center. **River analysis system users reference manual version 5.0[®]**. US Army of Crop Engineers. Davis, Califórnia. 2016.
- BRASIL. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística – IBGE. **Censos demográficos**. Disponível em: <http://www.ibge.gov.br>. Acesso em: 10 ago. 2017.
- JENSEN, M.R.; LOWNEY, C.L. Temperature Modeling with HEC - RAS. Critical transitions in water and environmental resources management. In: World Water Congress, American Society of Civil Engineers, Marrakech, Morocco. 2004. **Anais...**

KANNEL. P. R.; KANEL, S.R.; LEE, S.; LEE Y.S.; GAN. T. Y. A review of public domain water quality models for simulating dissolved oxygen in rivers and streams. **Environmental Modeling & Assessment**, v. 16, n. 2, p. 183-204. <https://doi.org/10.1007/s10666-010-9235-1>.

LEONARD, B.P. A stable and accurate convective modelling procedure based on quadratic upstream interpolation. **Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering**, v. 19, n. 1, pp. 59-98. 1979. [https://doi.org/10.1016/0045-7825\(79\)90034-3](https://doi.org/10.1016/0045-7825(79)90034-3).

LEONARD, B.P. The ULTIMATE conservative difference scheme applied to unsteady one-dimensional advection. **Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering**, v. 88, n. 1, pp. 17-74. 1991. [https://doi.org/10.1016/0045-7825\(91\)90232-U](https://doi.org/10.1016/0045-7825(91)90232-U).

MAGALHÃES, A.A.; SALLA, M.R.; FILHO, J.E. **Manual do Usuário QUALI-TOOL: Uma ferramenta gráfica-interativa para simulação da qualidade da água em ambientes lóticos**. 36 p. 2017.

MENDES, W.J.S. **Adaptação do modelo de Streeter-Phelps para modelagem da qualidade da água em uma grande bacia semiárida**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil com ênfase em Recursos Hídricos). Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 127 p. 2014.

PEREIRA, C.C. & LIMA, J.D. As influências dos usos das terras da Bacia Hidrográfica do córrego Brejo Alegre de Araguari (MG) sobre a qualidade das águas. **Revista Nacional de Gerenciamento de**

Cidades, v. 3, n. 19, p. 162-178. 2015. <http://dx.doi.org/10.17271/2318847231920151052>.

SALLA, M.R.; PEREIRA, C.E.; ALAMY FILHO, J.E.; DE PAULA, L.M.; PINHEIRO, A.M. Self-depuration study of Jordão River, located in Dourados River Basin. **Engenharia Sanitária e Ambiental**, v. 18, n. 2, p. 105-114. 2013. <http://dx.doi.org/10.1590/S1413-41522013000200002>.

SALLA, M.R.; ARQUIOLA, J. P.; SOLERA, A.; ÁLVAREZ, J. A.; PEREIRA, C. E.; ALAMY FILHO, J.E.; OLIVEIRA, A.L. Integrated modeling of water quantity and quality in the Araguari River basin, Brazil. **Latin American Journal of Aquatic Research**, v. 42, n. 1, p. 224-244, 2014. <http://dx.doi.org/103856/vol42-issue1-fulltext-19>.

SCAVIA, D.; KELLY, E. L. A.; HAGY, J.D. A simple model for forecasting the effects of nitrogen loads on Chesapeake Bay hypoxia. **Estuaries and Coasts**, v. 29, n. 4, p. 674-684. 2006. <http://dx.doi.org/10.1007/BF02784292>.

SILVINO, A.N.O. **Avaliação e modelagem da qualidade da água da bacia do rio Coxipó, no município de Cuiabá - MT**. Dissertação (Mestrado em Física e Meio Ambiente). Universidade Federal do Mato Grosso, Cuiabá, 173 p. 2008.

VON SPERLING, M. **Estudos e modelagem da qualidade da água de rios**. Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, UFMG, v. 7, 588 p. 2007.