

Sistema de Suporte à Decisão em Recursos Hídricos na Bacia Hidrográfica do Rio Uberabinha, Minas Gerais

Marcio Ricardo Salla¹, Javier Paredes Arquiola², Abel Solera², Joaquín Andreu Álvarez², Carlos Eugênio Pereira¹, José Eduardo Alamy Filho¹, André Luiz de Oliveira¹

mrsalla@seciv.ufu.br; jparedes@hma.upv.es; asolera1@gmail.com; ximoand@upv.es; carloseugenio@seciv.ufu.br; zealamy@yahoo.com.br; andreoliveira@seciv.ufu.br

Recebido: 05/07/13 - revisado: 02/08/13 - aceito: 18/09/13

RESUMO

A quantidade e qualidade da água tornaram-se um problema comum em muitas bacias hidrográficas localizadas em países com rápido desenvolvimento. Lidar com este problema requer a utilização de sofisticadas ferramentas de planejamento de recursos hídricos. O aumento populacional e industrial no município de Uberlândia (Minas Gerais) tem gerado conflitos de interesse pessoal e coletivo no uso múltiplo da água no Rio Uberabinha, que resulta na necessidade de um gerenciamento integrado de quantidade e qualidade da água. Este artigo explica o desenvolvimento do sistema de suporte à decisão AQUATOOL na bacia hidrográfica do Rio Uberabinha, para o planejamento e gerenciamento, incluindo modelo de quantidade e qualidade. A parte quantitativa consistiu na modelagem hidrológica chuva-vazão e, na sequência, no desenvolvimento de uma modelagem quantitativa através do módulo SIMGES para o período de outubro de 2006 até setembro de 2011. A modelagem de qualidade da água foi realizada através do módulo GESCAL, o qual está conectado com o módulo SIMGES. Os parâmetros estudados foram oxigênio dissolvido, demanda bioquímica de oxigênio, nitrogênio orgânico, amônia, nitrato e fósforo total. Os cenários de intervenções evidenciam a necessidade de escolha de novos locais, fora da bacia hidrográfica do Rio Uberabinha, para captações de água utilizadas no abastecimento público na cidade de Uberlândia. O desacordo com a DN COPAM-CERH 01:2008 dos parâmetros demanda bioquímica de oxigênio e fósforo total, nos meses menos chuvosos, também evidenciam a necessidade de escolha de novos locais para lançamentos pontuais de cargas poluidoras adicionais advindas da principal Estação de Tratamento de Efluente do município.

Palavras-chave: Modelagem de quantidade e qualidade da água, Sistema de suporte à decisão AQUATOOL, Módulo SIMGES, Módulo GESCAL, Rio Uberabinha

INTRODUÇÃO

A existência ou não da gestão adequada dos recursos hídricos na escala da bacia hidrográfica é um indicativo real do grau de desenvolvimento econômico e sócio-ambiental de uma região ou país. Neste contexto, os maiores conflitos de uso múltiplo da água ocorrem em bacias hidrográficas com elevadas densidades populacionais, nas quais as elevadas demandas consuntivas, os efluentes lançados pontualmente com eficiência insuficiente de redução da carga poluidora e os defensivos agrícolas e fertilizantes carregados superficialmente de forma difusa, comprometem a capacidade de

diluição dos poluentes e a autodepuração natural dos cursos de água. Os grandes centros urbanos apresentam os menores índices de qualidade da água superficial associados às maiores demandas consuntivas. Tal situação está diretamente relacionada à falta de infraestrutura urbana (VIEIRA FILHO et al., 2013).

A necessidade crescente de planejamento e gestão de recursos hídricos na escala da bacia hidrográfica fez com que os modelos de simulação se tornassem cada vez mais aprimorados. Em todo o mundo existem diversas ferramentas computacionais, com complexidades matemáticas distintas, úteis na gestão de usos múltiplos de água, tais como Hec-Ras (FAN et al., 2009), Modflow (XU et al., 2012), Topmodel (CHEN & WU, 2012), Wargi-Sim (SECHI & SULIS, 2009), entre outros.

A partir da década de 30, o comprometimento da qualidade da água superficial nos municípios com elevada densidade

¹ Faculdade de Engenharia Civil - Universidade Federal de Uberlândia

² Instituto de Ingeniería del Agua y Medio Ambiente – Universidad Politécnica de Valencia

populacional impulsionou o surgimento dos primeiros modelos de qualidade da água que, com o passar do tempo, tornaram-se cada vez mais completos (DE PAULA, 2011). Atualmente, os modelos com maiores aceitabilidade em todo o mundo são Qual2E e Qual2K (CHAPRA et al., 2008), Wasp (YENILMEZ & AKSOY, 2013), Aquatox (MAMAQANI et al., 2011) e Gescal (PAREDES-ARQUIOLA et al., 2010a e 2010b). Nas últimas décadas, a necessidade de implantação de planos de recursos hídricos na escala da bacia hidrográfica, motivou o surgimento de ferramentas computacionais que atuam como Sistemas de Suporte à Decisão - SSD e que vinculam a modelagem quantitativa e qualitativa da água, com destaque para trabalhos desenvolvidos por Argent et al. (2009), Paredes-Arquiola et al. (2010a, 2010b), Zhang et al. (2011), Sulis & Sechi (2013) e Dutta ET AL. (2013).

De acordo com o Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE), o município de Uberlândia cresceu 20% entre os anos de 2000 e 2010 e possui uma densidade populacional de 146,7 habitantes por km², valor este muito superior à média estadual que é de 33,4 habitantes por km². O sistema de abastecimento público do município encontra-se atualmente em situação preocupante referente à oferta hídrica disponível. O município é abastecido pelo alto curso do Rio Uberabinha e pelo Ribeirão Bom Jardim (ver Figura 1), cujas vazões disponíveis aproximam-se ao limite em função do acentuado crescimento populacional. A Estação de Tratamento de Esgoto - ETE, que lança carga poluidora no rio Uberabinha, é responsável pelo tratamento de 95% do efluente gerado no município. A baixa eficiência de tratamento do efluente associada à reduzida capacidade de diluição no rio Uberabinha acarreta o comprometimento da qualidade de água superficial no baixo curso do rio Uberabinha (a jusante do município de Uberlândia).

Com isso, diante da necessidade de realização de um diagnóstico e posterior prognóstico integrado de quantidade e qualidade de água nesta bacia hidrográfica, foi utilizado no estudo a ferramenta computacional AQUATOOL como SSD na escala da bacia hidrográfica. A partir de dados pluviométricos monitorados pelo Laboratório de Climatologia da Universidade Federal de Uberlândia, dados fluviométricos monitorados pela Agência Nacional de Água - ANA e de qualidade da água monitorados e supervisionados pelo Instituto Mineiro de Gestão das Águas (IGAM), apresenta-se a modelagem quantitativa e qualitativa para o período de outubro de 2006 até setembro de 2011. A modelagem quantitativa foi realizada no módulo SIMGES,

utilizando como dados de entrada os resultados dos modelagens hidrológicas chuva-vazão para áreas urbanas e rurais. Na sequência, foi realizada a calibração do modelo de qualidade juntamente com a análise de sensibilidade dos principais coeficientes de reações bioquímicas. Para finalizar, quatro cenários com intervenções de caráter quantitativo e qualitativo foram realizados a fim de avaliar a capacidade de autodepuração natural do Rio Uberabinha.

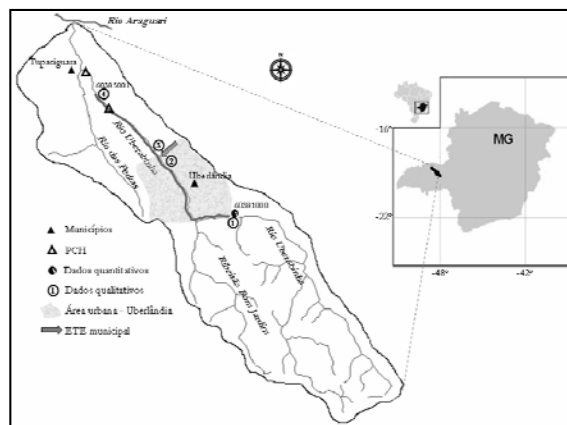


Figura 1 - Bacia hidrográfica do rio Uberabinha

MATERIAL E MÉTODOS

SSD AQUATOOL

Existem poucas ferramentas ou modelos computacionais que simulam a qualidade de água (módulo Gescal) vinculada à quantidade (módulo SIMGES) na escala da bacia hidrográfica. Andreu et al. (1996) desenvolveram o SSD denominado AQUATOOL, que é uma interface para a edição, simulação, revisão e análise de modelo de simulação de gestão de bacias hidrográficas, incluindo o módulo de simulação da qualidade da água em ambientes lênticos e lóticos, muito útil na Europa, África, Ásia e América Latina (PAREDES-ARQUIOLA et al., 2010a e 2010b; NAKAMURA, 2010; SULIS & SECHI, 2013).

Módulo SIMGES

É utilizado na simulação da vazão em rios, córregos e reservatórios na escala da bacia hidrográfica, a partir da definição espacial e quantitativa das descargas (retiradas pontuais para irrigação, indústria, mineradora, consumo humano, entre outros), das recargas (afluentes pontuais e difusos superfí-

ais e subterrâneos) e dos requisitos ambientais definidos pelos órgãos ambientais. Este módulo permite: simular quantitativamente qualquer bacia hidrográfica que possua regra de gestão definida por Comitê de Bacia Hidrográfica; definir as prioridades de demanda para garantir a vazão ecológica mínima e a qualidade de água mínima em respeito à classificação do curso de água (Resolução CONAMA 357:2005 para o território nacional e Deliberação Normativa Conjunta COPAM-CERH 01:2008 para o Estado de Minas Gerais); definir as vantagens e desvantagens das variações da vazão frente a um ou mais usos prioritários; simular a capacidade de bombeamento para dada demanda frente aos requisitos mínimos de reservação.

As simulações são executadas através de um algoritmo de otimização de rede de fluxo, que controla a vazão superficial dentro da bacia hidrográfica objetivando, ao mesmo tempo, minimizar os déficits e maximizar os níveis líquidos nos reservatórios para demandas como irrigação, consumo humano, produção hidrelétrica, etc. Para isso, algumas características são admitidas pelo módulo, tais como: cálculo das descargas e recargas simplesmente pelo balanço de massa; com relação aos aquíferos, a vazão pode ser simulada por modelos simples, multicelulares e lineares distribuídos; considera as perdas por evaporação e infiltração em reservatórios de acumulação e leitos de rio, além das interações existentes entre águas superficiais e subterrâneas.

Módulo GESCAL

Com o propósito de simular a qualidade da água vinculada ao gerenciamento quantitativo em ambientes lênticos e lóticos previamente definidos no módulo SIMGES, Paredes et al. (2009) desenvolveram o módulo de qualidade da água GESCAL, que permite simular a qualidade da água em diferentes condições quantitativas. Os parâmetros de qualidade que o módulo permite simular incluem temperatura, sólidos suspensos, oxigênio dissolvido, matéria orgânica carbonácea, nitrogênio orgânico, amônia, nitrato, fósforo total e fitoplâncton – clorofila *a*. No processo de modelagem adotado neste artigo, foi considerada a relação do ciclo do nitrogênio e da matéria orgânica carbonácea entre si e o efeito sobre o oxigênio dissolvido, além do fósforo total como um parâmetro no qual o processo de degradação foi modelado através de uma cinética

de primeira ordem e da sedimentação da fração particulada.

As principais características admitidas pelo módulo GESCAL foram:

- escoamento unidimensional com concentração de qualquer constituinte constante na seção transversal e condições estacionárias de qualidade da água afluentes ao curso de água em escala de tempo mensal;
- para cada trecho modelado considerou-se escoamento permanente e uniforme e, nos 11,4 km de cabeceira, a vazão escoada Q (m^3/s) foi associada com a velocidade média u (m/s), a profundidade média h (m) e a largura da seção transversal b (m) através das relações $u = a_1.Q^{\beta_1}$, $h = a_2.Q^{\beta_2}$ e $b = a_3.Q^{\beta_3}$. Os coeficientes $\beta_1, \beta_2, \beta_3$, a_1 , a_2 e a_3 foram ajustados através da otimização do coeficiente de eficiência de Nash-Sutcliffe, no qual $\beta_1 + \beta_2 + \beta_3 = 1,0$ e $a_1.a_2.a_3 = 1,0$;
- o módulo considera os processos de advecção, dispersão longitudinal, descargas difusas e relação hidráulica com o aquífero através de distribuição uniforme, tanto pelo aporte de água desde o aquífero como pela filtração do rio ao aquífero.

De uma forma geral e independente do parâmetro estudado, através do balanço de massa dentro de um trecho de rio, chega-se na equação diferencial de simulação, conforme equação (1).

$$0 = \frac{d}{dx} \left(E \cdot \frac{dC}{dx} \right) - \frac{d(u.C)}{dx} + \frac{(S_d + C_e.q_e - C_s.q_s + \sum W_i)}{V} \quad (1)$$

Na equação (1), E é o coeficiente de dispersão longitudinal (m^2/dia); C é a concentração de um parâmetro qualquer (mg/L); C_e é a concentração deste parâmetro no aquífero ao qual o rio está inserido (mg/L); x é a distância longitudinal do trecho de rio estudado (m); u é a velocidade média da água (m/dia); V é o volume líquido do trecho estudado (m^3); q_e é a vazão de entrada do aquífero (m^3/dia); q_s é a vazão filtrada ao aquífero (m^3/dia); S_d é a carga de entrada de um parâmetro de qualidade qualquer de forma difusa no trecho de rio estudado (g/dia); $\sum W_i$ representa o conjunto de processos que aumentam ou diminuem a carga de

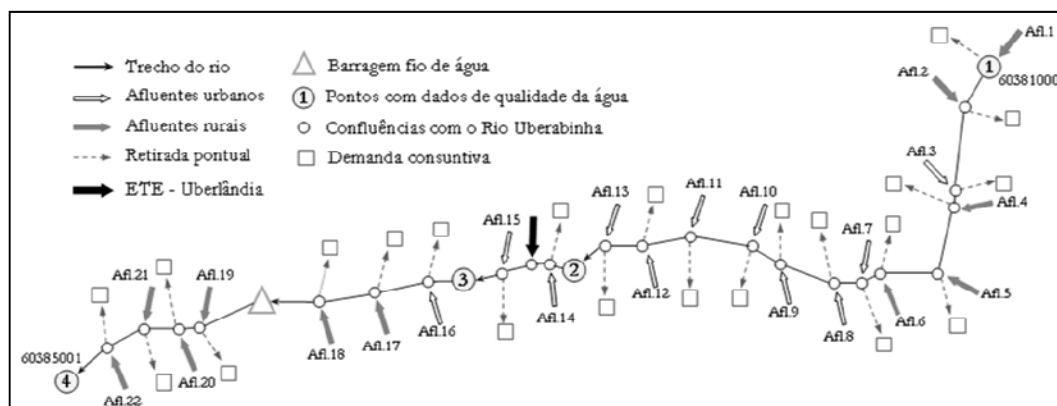


Figura 2 - Esquema do modelo aplicado

um determinado parâmetro na massa líquida, dependente da degradação, da sedimentação, reaeração, nitrificação, crescimento e respiração de fitoplâncton e adsorção.

Área de estudo

A bacia hidrográfica do Rio Uberabinha está localizada na região oeste do Estado de Minas Gerais, entre as coordenadas 18°33'49" e 19°24'33" de latitude Sul e 47°50'30" e 48°40'18" de longitude Oeste (Figura 1). A nascente encontra-se no município de Uberaba e percorre aproximadamente 140 km até a sua foz no rio Araguari. Possui uma área de aproximadamente 22 mil km², com cotas altimétricas entre 550 m e 1000 m e precipitações médias anuais entre 1248 a 1869 mm (para os anos de 2006 a 2011). Integram a bacia hidrográfica os municípios de Uberaba, Uberlândia e Tupaciguara. A população residente é de aproximadamente 650 mil habitantes, distribuída no município de Uberlândia e no distrito de Martinésia. Das três Estações de Tratamento de Esgoto - ETE existentes no município de Uberlândia, 95% da carga poluidora é tratada na ETE Uberabinha, a qual lança pontualmente seu efluente no baixo curso do Rio Uberabinha.

A bacia hidrográfica possui duas Pequenas Centrais Hidrelétricas tipo fio de água a jusante do lançamento pontual da ETE - Uberabinha (PCH Martins e PCH Malagone, na sequência).

Os principais usos das águas do Rio Uberabinha estão vinculados ao consumo humano, dessedentação de animais, irrigação (cana-de-açúcar, soja e milho), indústrias alimentícias e geração de energia elétrica (ROSOLEN et al., 2009). As demandas superficial e subterrânea de água outorgadas para consumo humano, irrigação, indústria e dessedentação de animais em 2006 foram de 17,07 e 1,61

hm³/mês, respectivamente. De toda a demanda superficial, 14,77 hm³/mês está direcionada ao consumo humano, sendo 9,59 hm³/mês captada no alto curso do Rio Uberabinha e 5,18 hm³/mês no Ribeirão Bom Jardim. O clima na região é tropical, com estação seca entre os meses de maio e outubro e estação úmida entre os meses de novembro e abril.

O estudo foi realizado em um trecho de aproximadamente 48,15 km, desde o alto curso até o baixo curso do Rio Uberabinha, englobando toda a área urbana do município de Uberlândia e parte do trecho a jusante da ETE - Uberabinha. Considerou-se apenas um posto de monitoramento de quantidade de água, administrado pela Agência Nacional de Água sob o código de estação número 60381000 (ponto 1 na Figura 1). Os dados trimestrais de qualidade da água sob os códigos 60381000 e 60385001 (respectivamente, pontos 1 e 4 na Figura 1) são monitorados pelo Instituto de Gestão das Águas Minas - IGAM. Já os dados mensais de qualidade da água da ETE - Uberabinha e dos postos localizados a montante e jusante desta ETE (pontos 2 e 3 na Figura 1) são monitorados pela Superintendência Regional de Minas Gerais - Triângulo Mineiro e Alto Paranaíba - SUPRAM/IGAM.

Modelagem quantitativa

O procedimento inicial foi definir a topologia do modelo dentro da ferramenta AQUATOOL, que refere-se basicamente ao esquema situacional da bacia hidrográfica do Rio Uberabinha, no qual estão incluídos, sem escala, os elementos do modelo (Figura 2). Para otimizar a visualização desta figura, foram retirados os elementos que representam a distribuição difusa ao longo do trecho de rio.

Neste estudo, o Rio Uberabinha foi dividido em 3 trechos, no qual cada trecho é identificado por

um ponto numerado a montante e outro a jusante. (Figura 2). As simulações quantitativas, no período de outubro de 2006 até setembro de 2011, foram realizadas através do módulo SIMGES após o traçado do esquema do modelo e a alimentação de dados quantitativos de entrada solicitados, tais como afluentes rurais e urbanos, descargas difusas rurais e urbanas, ETE - Uberabinha e demandas consuntivas.

Dados de entrada

Afluentes

Os dados fluviométricos existentes no alto curso do Rio Uberabinha (código 60381000 - ponto 1 - Figura 1) foram utilizados diretamente como dados de entrada na simulação quantitativa. As vazões difusas e pontuais dos afluentes rurais e urbanos foram estimadas através de modelos hidrológicos chuva-vazão.

Foi utilizado no estudo o método do número da curva CN, desenvolvido pelo *Soil Conservation Service*, para as sub-bacias urbanas. Trata-se de um modelo distribuído, com elevada aceitação mundial devido ao reduzido número de parâmetros e relação destes com as características físicas da bacia (REZENDE, 2012). Em uma mesma sub-bacia urbana, existem áreas permeáveis e impermeáveis com diferentes tipos de ocupação do solo. Este método estima o número CN resultante em cada sub-bacia urbana considerando essas diferentes áreas (rural, urbana e industrial). As diferentes áreas foram obtidas através de uma ferramenta GIS, diretamente na plataforma *GoogleEarth* através do traçado perimetral.

Nas sub-bacias rurais foi utilizado o modelo HBV, desenvolvido por Bergström (1995). Trata-se de um modelo semi-distribuído conceitual, que utiliza os processos mais importantes integrantes do escoamento superficial, através de uma estrutura simples e com reduzido número de parâmetros. Trabalha com escala temporal diária ou mensal e utiliza como dados de entrada as séries de precipitação, temperatura atmosférica e evapotranspiração média mensal (HUNDECHA & BÁRDOSSY, 2004). As descrições detalhadas das equações de estado, das equações que regulam os processos de transferência hídrica e do restante do ciclo hidrológico utilizadas no modelo HBV podem ser obtidas em Paredes-Arquiola et al. (2011).

Os parâmetros do modelo HBV foram calibrados através do algoritmo evolutivo de calibração SCE-UA (*Shuffled Complex Evolution method, University of Arizona*). Para isso, os resultados das séries tempo-

rais de vazão superficial obtidas no modelo foram comparados com as séries temporais existentes no alto curso do Rio Uberabinha e, através de uma adaptação em *Visual Basic* do algoritmo SCE-UA, procedeu-se a autocalibração (PAREDES-ARQUIOLA et al., 2011). O algoritmo SCE-UA avalia grande quantidade de combinações de parâmetros para encontrar o melhor ajuste entre os dados observados e simulados, cujo melhor ajuste foi avaliado através da maximização do valor médio das funções objetivos definidas por: coeficiente de eficiência de Nash-Sutcliffe, coeficiente de eficiência de Nash-Sutcliffe da transformação logarítmica da vazão, coeficiente de correlação de Pearson e medida da simetria do ajuste entre a simulação média e a observação média.

O modelo chuva-vazão HBV foi aplicado para a sub-bacia correspondente ao único posto de monitoramento de vazão existente no alto curso do Rio Uberabinha (código 60381000 - Figura 1), cuja área de contribuição é de 801,6 km². Em função de similaridade das condições climáticas, geológicas e de uso e ocupação do solo em toda a bacia hidrográfica do Rio Uberabinha, os parâmetros inicialmente calibrados foram utilizados como dados de entrada na estimativa da vazão superficial nas outras sub-bacias rurais. Para o trecho do Rio Uberabinha estudado, o Ribeirão Bom Jardim possui a maior área superficial (394,6 km²). A modelagem hidrológica chuva-vazão foi realizada no período de 1997 até 2011, cujos dados de temperatura do ar, precipitação e evaporação foram obtidos no Laboratório de Climatologia da Universidade Federal de Uberlândia. A evapotranspiração potencial foi calculada pelo método de Thornthwaite.

ETE - Uberabinha

As vazões da ETE - Uberabinha foram calculadas através da equação da vazão de distribuição de água para consumo multiplicada pelo coeficiente de retorno que, de acordo com a NBR ABNT 9649:1986 e 14486:2000, é fixado em 0,80 quando não existem dados locais comprovados e oriundos de pesquisas.

Demandas pontuais consuntivas

Os dados referentes às demandas superficiais outorgadas e georreferenciadas para consumo humano, irrigação, indústria e dessedentação de animais foram obtidos junto à Agência de Bacia Hidrográfica do Rio Araguari, a partir de dados cadastrados no ano de 2006. As duas maiores demandas consuntivas estão relacionadas às captações superficiais para abastecimento público de Uberlân-

dia, a primeira a montante de ponto 1 (estação código 60381000) e a segunda no Ribeirão Bom Jardim, com demandas respectivas de 11,617 e 5,897 hm³/mês. Para os demais afluentes rurais e os urbanos, a demanda variou entre 0,002 a 0,419 hm³/mês. A demanda consuntiva difusa total foi de 0,011 hm³/mês.

Modelagem qualitativa

A modelagem de qualidade da água e calibração dos coeficientes de reações bioquímicas e velocidades de sedimentação foram realizadas no período de outubro de 2006 até setembro de 2011. Neste período, a PCH Martins ainda não havia iniciado o processo de enchimento do reservatório de acumulação, o que fez com que esta região fosse considerada como trecho de rio no processo de modelagem qualitativa da água.

Os parâmetros de qualidade da água simulados foram: oxigênio dissolvido (OD), demanda bioquímica de oxigênio (DBO₅), nitrogênio orgânico (NO), nitrogênio amoniacal (NH₄⁺), nitrato (NO₃⁻) e fósforo total (P_{Total}). Dentro da ferramenta AQUATOOL, a modelagem qualitativa através do módulo GESCAL é posterior à modelagem quantitativa, cujas simulações foram realizadas após a alimentação dos dados de qualidade dos afluentes e da ETE - Uberabinha em arquivo tipo bloco de notas. Os dados de qualidade da água do ponto 1 (Figuras 1 e 2) foram obtidos junto ao Instituto de Gestão das Águas Mineiras - IGAM e da ETE - Uberabinha foram fornecidos pela Superintendência Regional de Regularização Ambiental do Alto Paranaíba e Triângulo Mineiro (SUPRAM). Os dados de qualidade da água dos córregos rurais foram estimados como similares aos dados do ponto 1, em função da similaridade de uso do solo nessas sub-bacias. Já os dados de qualidade da água dos córregos urbanos foram estimados como similares aos encontrados por Salla et al. (2011) nos córregos do Óleo e do Liso (respectivamente, afluentes 12 e 13 das Figuras 2 e 3). A Tabela 1 ilustra os dados de entrada de qualidade da água utilizados na modelagem.

Diante da limitação deste estudo com relação à falta de monitoramento de qualidade da água nos córregos rurais e urbanos, realizou-se uma análise de sensibilidade na qualidade final da água nos pontos 2, 3 e 4, diante das variações dos parâmetros de qualidade da água nestes córregos. Nesta análise considerou-se, como situação mais crítica, aquela em

que houve mudanças percentuais iguais no valor quantitativo para todos os parâmetros e simultâneas para os vinte e dois afluentes e descargas difusas. Avaliou-se a sensibilidade por meio do aumento dos valores dos parâmetros de 10% a 40%, em intervalos de 10%. Para o parâmetro OD, avaliou-se a sensibilidade por meio da diminuição de 10% e 20% na concentração.

Tabela 1 - Dados de entrada de qualidade da água

Parâm.	Unid.	Córregos rurais	Córregos urbanos	ETE - Uberabinha
OD	mgO.L ⁻¹	7,37±0,34 ^a	6,52±0,52 ^a	0,0±0,0 ^a
		6,6-8,2 ^b	3,8-8,4 ^b	0,0-0,0 ^b
DBO ₅	mgO.L ⁻¹	2,5±0,95 ^a	4,68±3,05 ^a	134,40±59,70 ^a
		2,0-12,0 ^b	2,0-30,0 ^b	63,25-293,00 ^b
NO	mgN.L ⁻¹	0,16±0,08 ^a	0,14±0,05 ^a	19,0±0,0 ^a
		0,10-0,50 ^b	0,10-0,53 ^b	19,0-19,0 ^b
Amônia	mgNH ₄ ⁺ .L ⁻¹	0,11±0,02 ^a	0,39±0,31 ^a	46,60±14,95 ^a
		0,10-0,20 ^b	0,02-2,8 ^b	25,0-87,0 ^b
Nitrato	mgNO ₃ ⁻ .L ⁻¹	0,07±0,04 ^a	0,05±0,00 ^a	0,49±0,43 ^a
		0,01-0,18 ^b	0,05-0,05 ^b	0,01-1,40 ^b
P _{Total}	mgP.L ⁻¹	0,016±0,008 ^a	0,25±0,11 ^a	6,37±2,56 ^a
		0,01-0,05 ^b	0,09-1,40 ^b	0,50-22,0 ^b

^a média ± desvio padrão

^b mínimo - máximo

A Figura 3 ilustra o diagrama unifilar da modelagem integrada de quantidade e qualidade da água na bacia hidrográfica do Rio Uberabinha. Através deste diagrama, visualiza-se a distância longitudinal existente entre os afluentes pontuais, as distâncias longitudinais dos três trechos de rio adotados e a posição das estações de qualidade da água que foram utilizadas no processo de calibração do modelo. Na calibração do modelo, em cada trecho de rio, foram utilizados dados de qualidade da água existentes no ponto a jusante do trecho. A legenda da Figura 3 é similar à fornecida na Figura 2.

O módulo GESCAL permite que o coeficiente de reaeração em cada trecho de rio seja obtido através do método de Covar (VON SPERLING, 2007; PAREDES et al., 2009) ou pela introdução direta de seu valor no processo de calibração. O método de Covar engloba equações empíricas que dependem da velocidade média do escoamento e da profundidade líquida.

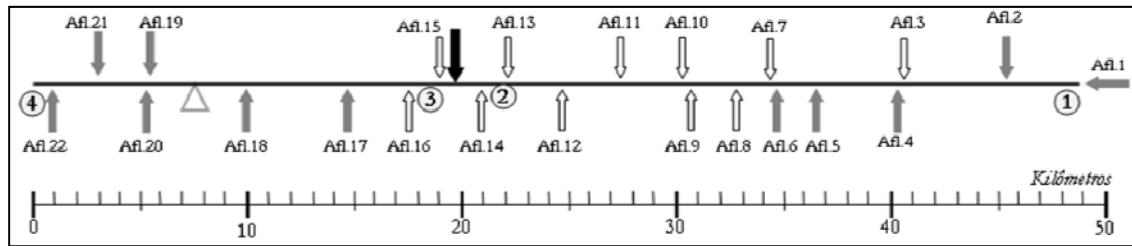


Figura 3 - Diagrama unifilar do modelo

O perfil de temperatura anual da água em cada trecho de rio também é solicitado pelo módulo GESCAL. Nesta região do Brasil, para todos os trechos de rio, a temperatura variou entre 17°C e 30°C, atingindo valores máximos entre os meses de novembro e fevereiro e mínimos entre maio e julho.

Calibração e análise da sensibilidade

Através de processo de tentativa e erro, foram calibrados os coeficientes de reações bioquímicas e velocidades de sedimentação nos três trechos identificados nas Figuras 2 e 3, para o período de outubro de 2006 até setembro de 2011. Os coeficientes de reações bioquímicas e velocidades de sedimentação pertencentes à modelagem qualitativa são: reaeração, decomposição da matéria orgânica carbonácea, velocidade de sedimentação da matéria orgânica carbonácea, hidrólise do nitrogênio orgânico, velocidade de sedimentação do nitrogênio orgânico, nitrificação da amônia, desnitrificação, crescimento do fitoplâncton, morte /respiração do fitoplâncton, velocidade de sedimentação do fitoplâncton, decaimento de fósforo orgânico e velocidade de sedimentação de fósforo orgânico. Também, para os três trechos, realizou-se uma análise de sensibilidade dos resultados da modelagem diante de alterações nos valores de entrada dos quatro principais coeficientes de reações previamente calibrados, que incluem: coeficiente de reaeração K_a , coeficiente de degradação de matéria orgânica carbonácea K_d , coeficiente de degradação de matéria orgânica nitrogenada KN_{oa} e coeficiente de nitrificação da amônia KN_{ai} .

O método fatorial utilizado na análise da sensibilidade permitiu avaliar as mudanças nas concentrações dos parâmetros de qualidade a partir de variação simultânea de K_a , K_d , KN_{oa} e KN_{ai} em +10% e -10% de seu valor calibrado, a qual denomina-se análise de 2 níveis. De acordo com Loucks et al.

(2005) e Nakamura (2010), na análise de 2 níveis são realizadas 2^n simulações diferentes, no qual n é o número de coeficientes estudados. Contudo, para cada trecho de rio, foram realizadas $1 \times 2 \times 2^4$ simulações (32 simulações), sendo que o número 1 corresponde à quantidade de pares + e -, o primeiro número 2 corresponde às duas simulações +10% e -10%, e 4 corresponde ao número de coeficientes.

Cenários

Finalizadas a calibração e a análise da sensibilidade, quatro cenários com intervenções de caráter qualitativo e quantitativo foram avaliados. No Cenário 1 avaliou-se a proporção necessária de melhoria na eficiência da ETE - Uberabinha a fim de atender aos requisitos mínimos da Deliberação Normativa Conjunta COPAM/CERH 01:2008. Nos outros cenários foram avaliados os impactos na autodepuração do rio Uberabinha devido às variadas intervenções quantitativas: o Cenário 2 considerou a não captação de água superficial no alto curso do Rio Uberabinha e Ribeirão Bom Jardim para o abastecimento urbano do município de Uberlândia e a manutenção das demais demandas consuntivas outorgadas; o Cenário 3 considerou a retirada máxima de demanda consuntiva permitida pela Portaria IGAM nº 49/2010, que é de 30% da vazão crítica $Q_{7,10}$, em todos os afluentes rurais e manutenção das demandas urbanas já cadastradas; o Cenário 4, a partir da situação mais crítica possível, considerou vazão crítica $Q_{7,10}$ em toda a bacia hidrográfica e retirada de demanda máxima permitida para os afluentes rurais (30% de $Q_{7,10}$). Nos Cenários 2, 3 e 4, a fim de adequar os parâmetros de qualidade à DN COPAM/CERH 01:2008 ao longo do trecho estudado, algumas propostas para redução da carga orgânica lançada pontualmente pela ETE - Uberabinha são apresentadas.

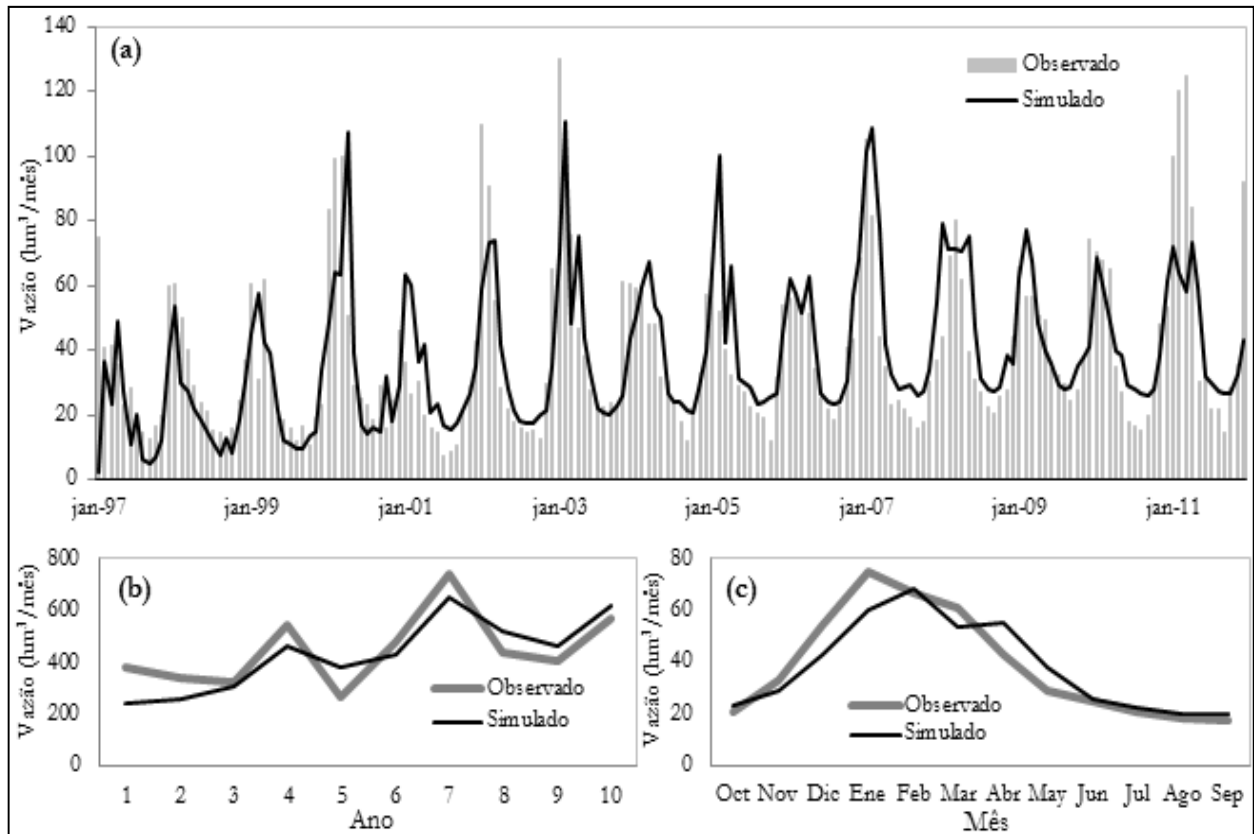


Figura 4 - Modelagem hidrológica do alto curso do Rio Uberabinha, no qual: (a) perfil dos dados observados e simulados entre 1997 e 2011; (b) vazão total anual observada e simulada entre 2001 e 2011; (c) vazão média mensal observada e simulada

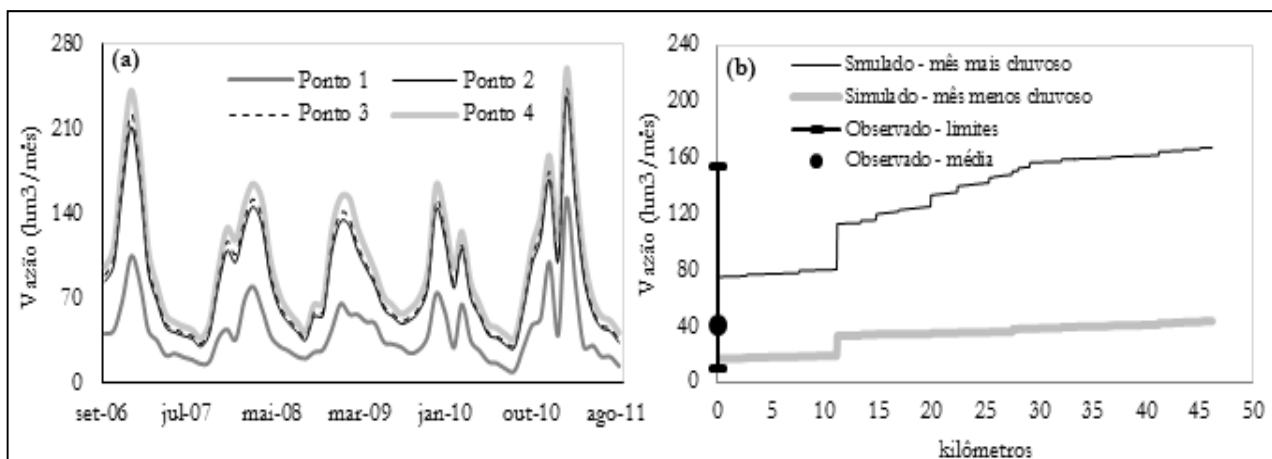


Figura 5 - (a) variação da vazão simulada nos quatro pontos definidos na bacia hidrográfica; (b) perfil longitudinal das vazões simuladas nos meses menos e mais chuvosos juntamente com valores de vazões médias, máximas e mínimas observadas

RESULTADOS

Modelagem quantitativa

Com relação ao modelo hidrológico para as bacias rurais utilizou-se o modelo HBV, a partir dos dados observados no ponto 1 (estação 60381000). De acordo com a Figura 4(a), observa-se que a aplicação deste modelo na sub-bacia do alto curso do Rio Uberabinha forneceu resultados aceitáveis, na qual a calibração realizada, por meio do algoritmo evolutivo SCE-UA, alcançou 0,67 como valor médio para a função objetivo. A modelagem hidrológica em área rural favoreceu na simulação de qualidade da água, devido ao satisfatório ajuste entre dados observados e simulados para a vazão média mensal obtido no período de poucas chuvas, conforme ilustra a Figura 5(c).

Já a modelagem hidrológica em área urbana, por meio do método da curva CN, forneceu comportamento perene para todos os afluentes urbanos, exceção feita às descargas difusas no período sem chuva. As maiores vazões dos afluentes urbanos foram obtidas em dezembro de 2006, alcançando 3,32 m³/s no Afluente 8, 5,92 m³/s no Afluente 11, 3,15 m³/s no afluente 12 e 8,29 m³/s para a descarga difusa urbana.

Os resultados das simulações hidrológicas urbanas e rurais foram utilizados como dados de entrada para as simulações quantitativas no módulo SIMGES, no período de outubro de 2006 até setembro de 2011. As simulações forneceram resultados satisfatórios e que traduzem bem a realidade hídrica na bacia hidrográfica. De acordo com a Figura 5(a), a vazão simulada no ponto 1 variou entre 10,2 a 152,7 hm³/mês, no ponto 2 houve aumento significativo em função da confluência com o Ribeirão Bom Jardim, variando entre 29,5 a 235,9 hm³/mês, enquanto que nos pontos 3 e 4 manteve-se entre 31,5 a 243,0 hm³/mês e 37,1 a 259,5 hm³/mês, respectivamente. Já a Figura 5(b) ilustra os perfis longitudinais das vazões simuladas em meses menos e mais chuvosos, juntamente com o valores das vazões média, máxima e mínima observadas no ponto 1. Devido à área impermeabilizada existente na área urbana, nota-se maior variação de vazão superficial por km entre os afluentes 7 e 11 (entre os quilômetros 13 e 31).

Modelagem qualitativa

Conforme já mencionado anteriormente, os dados de qualidade dos córregos rurais foram considerados similares aos dados do ponto 1 e dos cór-

regos urbanos similares aos dados encontrados por Salla et al. (2011). Por meio da análise da sensibilidade constatou-se como máxima variação obtida, respectivamente, nos pontos 2, 3 e 4: a diminuição de 8,3%, 8,6% e 10,8% para o OD; aumento de 23,8%, 11,5% e 12,3% para a DBO₅; aumento de 20,6%, 3,8% e 4,6% para o nitrogênio orgânico; aumento de 23,6%, 4,5% e 9,6% para a amônia; aumento de 19,6%, 14,7% e 14,4% para o nitrato; aumento de 37,1%, 15,7% e 15,6% para o fósforo. Esta análise de sensibilidade enfatiza ainda mais a importância do freqüente monitoramento da quantidade e qualidade da água em cursos de água menores, como subsídio para adequada calibração de modelo.

A classificação dos corpos de água no território brasileiro é definida pela Resolução CONAMA 357:2005. Além desta resolução, o Estado de Minas Gerais possui uma Deliberação Normativa própria (DN COPAM-CERH 01:2008), similar à Resolução CONAMA 357:2005 com relação aos parâmetros de qualidade estudados. De acordo com a DN COPAM-CERH 01:2008, o Rio Uberabinha está enquadrado na Classe 2, na qual deve-se respeitar os seguintes limites: oxigênio dissolvido $\geq 5,0$ mgO/L; DBO₅ $\leq 5,0$ mgO/L; amônia $\leq 3,7$ mgNH₄⁺/L; nitrato $\leq 10,0$ mgNO₃⁻/L; fósforo (ambiente lótico) $\leq 0,1$ mgP/L.

Todavia, diante de uma análise geral dos perfis longitudinais dos parâmetros de qualidade simulados nos meses mais e menos chuvosos (Figura 6), observam-se desacordos com relação aos parâmetros DBO₅ e fósforo total. No baixo curso do Rio Uberabinha, desde a confluência da ETE - Uberabinha com o rio principal até o ponto 4 (trechos nomeados como Uberabinha 2 e 3), os parâmetros DBO₅ e fósforo total comportam-se como classe 3. A DBO₅ manteve-se entre 5,1 a 6,8 mgO/L no mês mais chuvoso e entre 6,2 a 9,1 mgO/L no mês menos chuvoso. Com relação ao parâmetro fósforo total para ambiente lótico, este manteve-se entre 0,10 a 0,14 mgP/L no mês mais chuvoso e entre 0,17 a 0,28 mgP/L no mês menos chuvoso. As maiores concentrações de DBO₅ e fósforo total no mês menos chuvoso estão associadas à diminuição da capacidade de autodepuração natural e de diluição de poluentes para vazões reduzidas.

A análise geral das séries temporais dos valores observados dos parâmetros de qualidade (Figura 6) mostra um comportamento em desacordo com as preconizações da DN COPAM-CERH 01:2008 apenas em datas isoladas nos quatro pontos

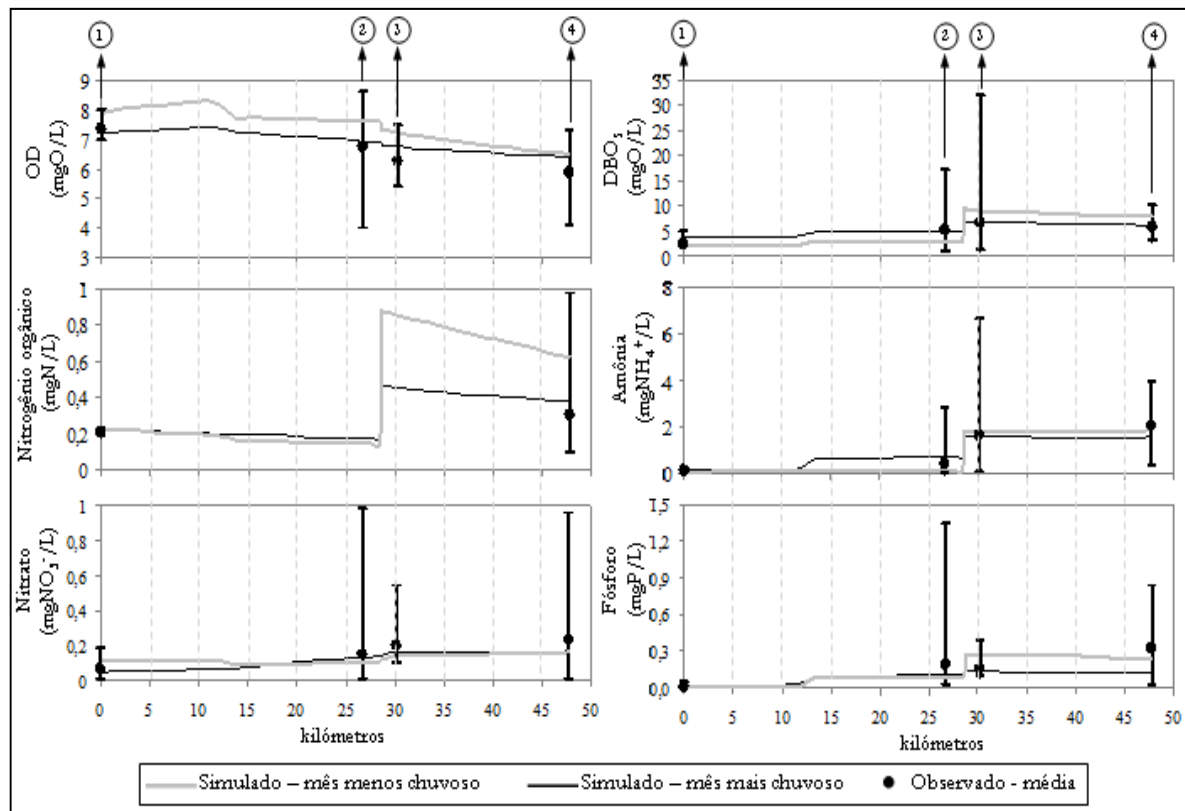


Figura 6 - Perfil longitudinal dos parâmetros de qualidade simulados nos meses mais e menos chuvosos e valores observados no rio Uberabinha

de monitoramento. O parâmetro OD apresenta valores menores que 5,0 mgO/L em apenas seis ocasiões e em meses de estiagem a jusante da ETE - Uberabinha (pontos 3 e 4). A DBO₅ apresentou valores bem superiores ao máximo de 5,0 mgO/L, tanto a montante quanto a jusante da ETE, alcançando até 17,0 mgO/L a montante (ponto 2), 41,0 mg/L no ponto 3 e 11,0 mg/L no ponto 4. Os elevados valores de DBO₅ encontrados a montante da ETE - Uberabinha, para época chuvosa e não chuvosa, estão relacionados aos possíveis lançamentos clandestinos de efluentes na calha principal do Rio Uberabinha. A amônia apresentou valores superiores ao máximo de 3,7 mgNH₄⁺/L apenas a jusante da ETE, no qual alcançou 11,0 mgNH₄⁺/L em um mês isolado sem chuva. O parâmetro nitrato não apresentou desacordo com a DN COPAM-CERH 01:2008 nas séries temporais observadas. Todavia, o parâmetro fósforo total apresentou valores observados em desacordo com o máximo de 0,1 mgP/L para todos os pontos estudados.

Calibração e análise de sensibilidade

A calibração dos coeficientes de reações bioquímicas e das velocidades de sedimentação ocorreu no módulo GESCAL, que é vinculado ao SSD AQUATOOL, em 3 trechos ao longo do Rio Uberabinha, mantendo-se como objetivo o melhor ajuste entre dados simulados e observados nos pontos de jusante de cada trecho. A Tabela 2 traz os valores calibrados, por trecho de rio, dos principais coeficientes de reações bioquímicas (K_a é de reaeração, K_d é de degradação de matéria carbonácea, KN_{oa} é a mineralização do nitrogênio orgânico, KN_{ai} é a nitrificação da amônia e K_{fosf} é a degradação do fósforo total) e das velocidades de sedimentação (V_{sd} é da matéria orgânica carbonácea, V_{SNO} é do nitrogênio orgânico e V_{Sfosf} é de fósforo particulado). Os valores ilustrados estão dentro de limites recomendados por Chapra (2003), Von Sperling (2007) e Paredes et al. (2009). Ainda na Tabela 2, o valor fixado em -1 para K_a no trecho nomeado Uberabinha 1 indica que,

Tabela 2 - Coeficientes de reações bioquímicas e velocidades de sedimentação calibrados

Trecho	Entre pontos	Comprimento (km)	K_a (dia ⁻¹)	K_d (dia ⁻¹)	V_{sd} (m.dia ⁻¹)	KN_{oa} (dia ⁻¹)	V_{sNo} (m.dia ⁻¹)	KN_{ai} (dia ⁻¹)	$K_{fosf.}$ (dia ⁻¹)	$V_{sfosf.}$ (m.dia ⁻¹)
Uberabinha 1	1 - 2	27,06	-1; 0,05	0,02	0,01	0,2	0,001	0,1; 0,2	0,01	0,001
Uberabinha 2	2 - 3	3,15	0,04; 0,08	0,04; 0,06	0,01	0,2; 0,4	0,001; 0,01	0,1	0,01	0,001
Uberabinha 3	3 - 4	17,94	0,04	0,06	0,01	0,4	0,01	0,01	0,01	0,001

nos primeiros 11,4 km no alto curso do Rio Uberabinha, desde o ponto inicial da modelagem (código ANA 60381000) até a confluência com o Ribeirão Bom Jardim (Afluente 5 - Figuras 2 e 3), o método de Covar apresentou bons ajustes entre dados observados e simulados para OD. As relações hidráulicas utilizadas foram: $u = 0,240.Q^{0,391}$, $h = 0,214.Q^{0,580}$ e $b = 19,496.Q^{0,029}$, no qual Q é a vazão média, u é a velocidade média, h é a profundidade líquida média e b é a largura da superfície líquida.

Os valores de $K_a = 0,04 \text{ dia}^{-1}$ e $K_d = 0,06 \text{ dia}^{-1}$ no trecho Uberabinha 2 estão relacionados ao lançamento pontual de carga poluidora da ETE - Uberabinha.

As séries das simulações e dados observados dos parâmetros de qualidade da água nos três pontos apresentaram bons ajustes, conforme ilustra a Figura 7. A calibração alcançou resultado considerado satisfatório para os parâmetros OD, DBO₅, amônia, nitrato e fósforo total, apesar da existência de alguns dados observados dispersos, principalmente do ano de 2010. A ausência de dados observados de nitrogênio orgânico prejudicou o ajuste das simulações nos trechos Uberabinha 1 e 2. Todavia, no trecho Uberabinha 3, apesar da existência de dados observados, a Figura 7(c) mostra que o ajuste de nitrogênio orgânico não foi satisfatório.

Neste artigo realizou-se a análise de sensibilidade às alterações de +10% e -10% nos valores de K_a , K_d , KN_{oa} e KN_{ai} . De uma forma geral, as variações dos coeficientes geraram poucas mudanças nos resultados previamente calibrados, cujas maiores amplitudes foram detectadas nos trechos Uberabinha 2 e 3. Nestes trechos, o valor calibrado de OD variou $\pm 0,8\%$ pela alteração de K_d . O parâmetro DBO₅ apresentou sensibilidades de $\pm 0,3\%$ devido à alteração de K_d . O nitrogênio orgânico variou $\pm 2,1\%$ devido às variações de KN_{oa} . A amônia variou $\pm 0,7\%$ e $\pm 0,09\%$ devido ao KN_{oa} e KN_{ai} , respectivamente. Já o nitrato apresentou $\pm 3,2\%$ de variação devido ao KN_{ai} .

Cenários

Os quatro cenários tiveram o propósito de avaliar a capacidade de autodepuração natural do Rio Uberabinha principalmente no seu baixo curso, a jusante do lançamento pontual de carga poluidora da ETE - Uberabinha, a partir de intervenções qualitativas e quantitativas, cujos resultados estão apresentados na Figura 8. No Cenário 1 observa-se que os parâmetros fósforo total e DBO₅ passam a atender aos requisitos mínimos da Deliberação Normativa Conjunta COPAM/CERH 01:2008 após a redução, respectivamente, de 93,6% e 65,6% das cargas poluidoras lançadas pontualmente pela ETE, que corresponde a uma redução média de $429,9 \pm 168,9 \text{ Kg/dia}$ para o fósforo total e $6,1.10^3 \pm 2,3.10^3 \text{ Kg/dia}$ para a DBO₅.

No Cenário 2, a não captação de água superficial no alto curso do Rio Uberabinha e no Ribeirão Bom Jardim para o abastecimento público no município de Uberlândia, aumentou consideravelmente a capacidade de diluição no médio e baixo curso diante do aumento de 33,7% na vazão.

Todavia, de acordo com a Figura 8, os parâmetros DBO₅ e fósforo total ainda mantiveram-se em desacordo com a DN COPAM/CERH 01:2008, no trecho desde a zona de mistura do efluente tratado com o Rio Uberabinha até o ponto 4, mantendo-se entre 6,92 a 7,65 mg/L para DBO₅ e 0,20 a 0,23 mg/L para fósforo total. As reduções de 84,7% (média de $389,0 \pm 152,8 \text{ kg/dia}$) e 53,2% (média de $4,9.10^3 \pm 1,8.10^3 \text{ kg/dia}$) das cargas orgânicas para o fósforo total e DBO₅, respectivamente, seriam suficientes para as adequações dos parâmetros frente à DN COPAM/CERH 01:2008. A similaridade dos resultados obtidos nos Cenários 2 e 3 mostra que as outorgas superficiais na bacia hidrográfica do Rio Uberabinha estão muito próximas da saturação de 30% da vazão crítica $Q_{7,10}$ permitida pela Portaria IGAM nº 49/2010.

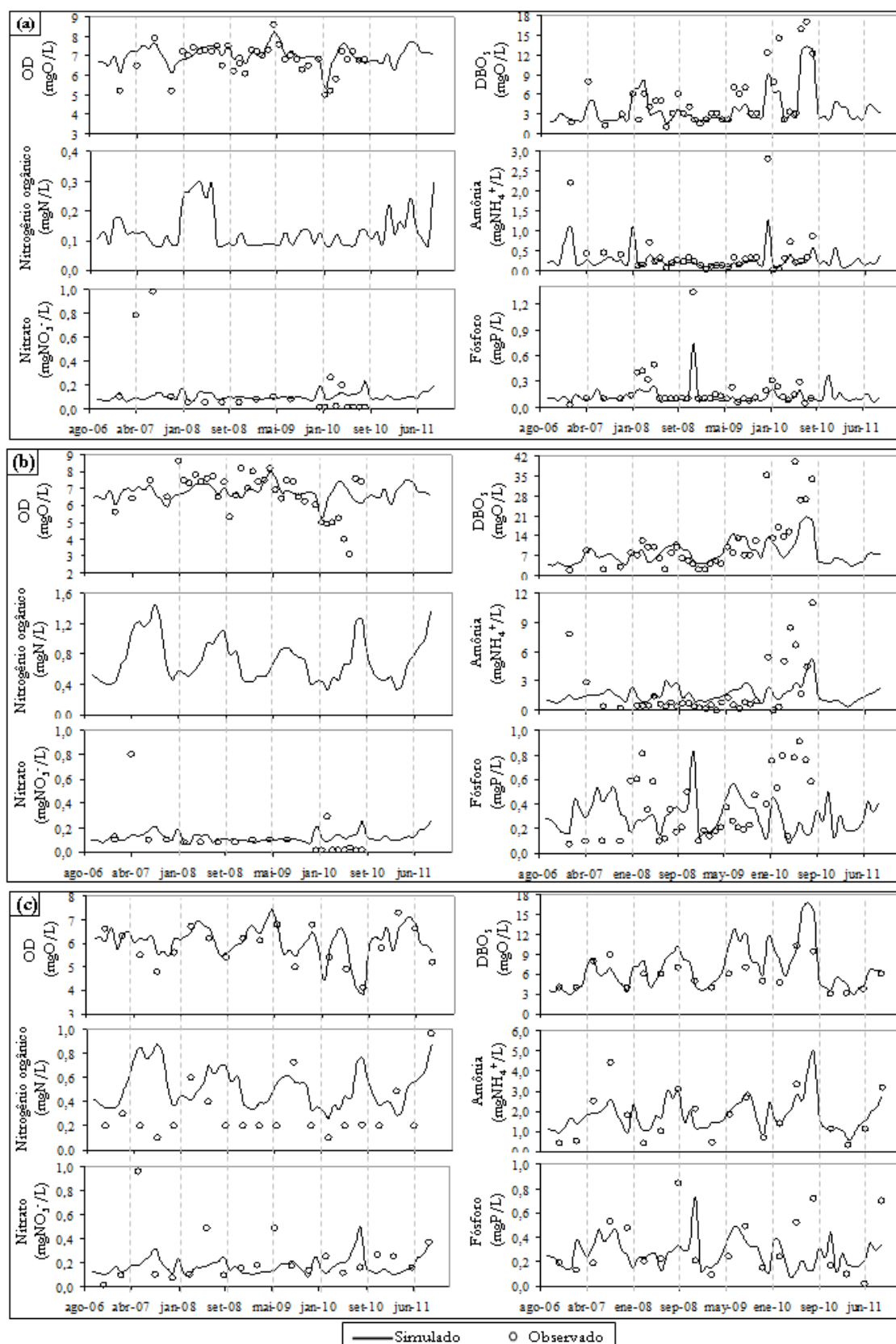


Figura 7 - Séries temporais das simulações e dados observados: (a) ponto 2; (b) ponto 3; (c) ponto 4

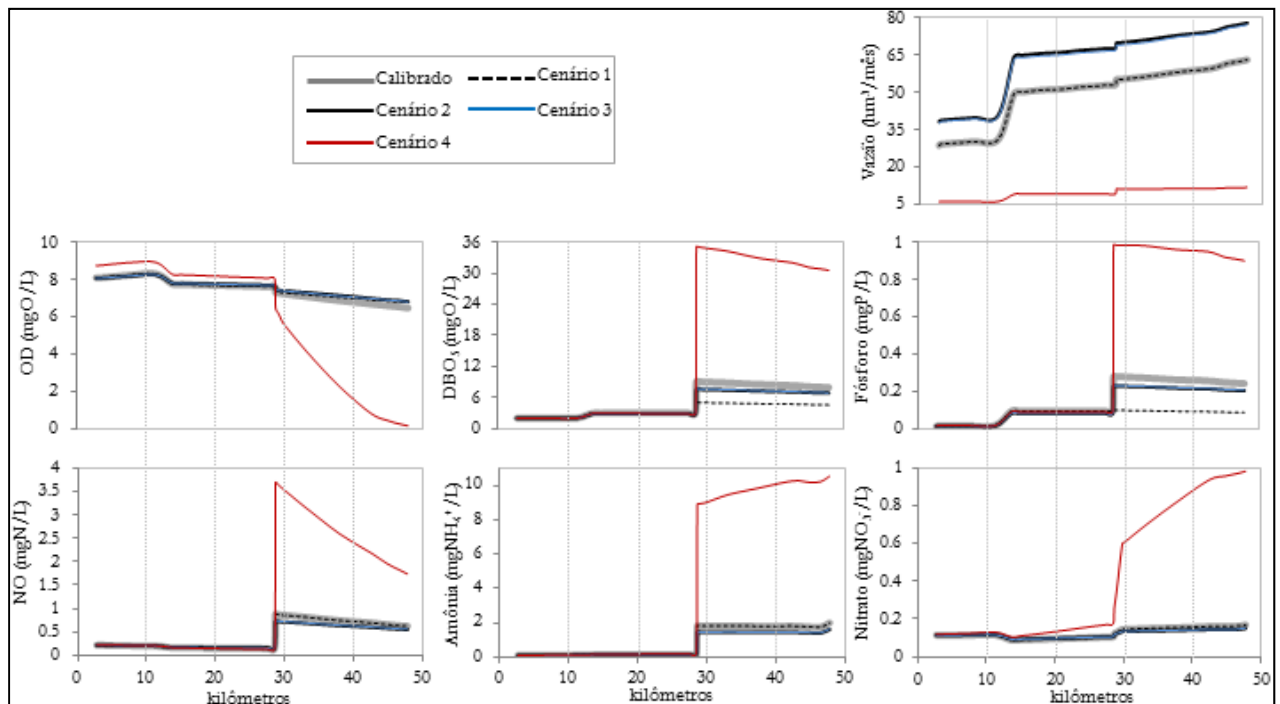


Figura 8 - Cenários analisados

Os resultados obtidos nos Cenários 1, 2 e 3 evidenciam o comprometimento na capacidade de autodepuração no baixo curso do Rio Uberabinha, agravado pela necessidade de remoção de cargas orgânicas poluidoras adicionais advindas da ETE - Uberabinha. Este comprometimento é ainda mais agravado no Cenário 4, no qual considerou-se a vazão crítica $Q_{7,10}$ em toda a bacia hidrográfica e retirada de demanda máxima permitida para os afluentes rurais (30% de $Q_{7,10}$). De acordo com a Figura 8, observa-se que, no Cenário 4, a maioria dos parâmetros estão em desacordo com a DN CO-PAM/CERH 01:2008 em função da diminuição acentuada na capacidade de diluição dos poluentes, com exceção ao nitrato. No trecho compreendido entre a confluência da carga pontual da ETE com o rio até o ponto 4 observa-se que: a amônia manteve-se entre 8,9 a 10,5 mgNH₃⁺/L, a DBO₅ entre 30,6 a 35,1 mgO/L, o fósforo total entre 0,90 a 0,98 mgP/L e o oxigênio dissolvido decresce de 5,6 mgO/L na zona de mistura do efluente tratado da ETE com o rio, até 0,14 mgO/L no ponto 4. Este cenário desfavorável passaria à adequar-se à DN COPAM/CERH 01:2008 com a redução da carga poluidora em: 74,4% (média de $1,0.10^3 \pm 47,4$ kg/dia) para nitrogênio orgânico, 74,4% (média de $2,5.10^3 \pm 217,7$ kg/dia) para amônia, 92,8% (média

de $8,9.10^3 \pm 818,9$ kg/dia) para DBO₅ e 97,7% (média de $449,1 \pm 122,6$ kg/dia) para fósforo total.

CONCLUSÕES

O município de Uberlândia possui uma densidade populacional muito superior à média do Estado de Minas Gerais, no qual o aumento populacional acentuado acarreta a deterioração do principal curso de água natural que atravessa o município. Esta problemática gerou a necessidade de realização de um diagnóstico e posterior prognóstico integrado de quantidade e qualidade de água na bacia hidrográfica do Rio Uberabinha. Para isso, foi utilizado no estudo o programa para gestão quantitativa (módulo SIMGES) e o programa para modelagem qualitativa (módulo GESCAL), ambos integrados ao SSD AQUATOOL. Os parâmetros de qualidade considerados foram OD, DBO₅, nitrogênio orgânico, amônia, nitrato e fósforo total. O período para calibração do modelo de qualidade foi de outubro de 2006 até setembro de 2011.

O modelo hidrológico chuva-vazão aplicado na área rural apresentou o melhor ajuste entre dados observados e simulados no período de poucas

chuvas. Através da modelagem quantitativa no módulo SIMGES, nota-se claramente a maior variação da vazão superficial por km ao longo da área impermeabilizada do perímetro urbano.

A qualidade da água estimada para os córregos menores não ocasionou alterações significantes na qualidade da água no rio Uberabinha, principalmente no baixo curso deste rio, como foi constatado através da análise de sensibilidade realizada. Todavia, não deve ser descartada a importância do freqüente monitoramento em cursos de água menores, como subsídio à adequada calibração do modelo.

No baixo curso do Rio Uberabinha, a jusante da ETE - Uberabinha, os perfis longitudinais no mês menos chuvoso dos parâmetros DBO₅ e fósforo total comportam-se como classe 3 (de acordo com a DN COPAM/CERH 01:2008 e Resolução CONAMA 357:2005), como consequência da diminuição da capacidade de autodepuração natural e de diluição de poluentes para vazões reduzidas. A calibração dos coeficientes de reações bioquímicas e das velocidades de sedimentação alcançou satisfatório ajuste entre dados observados e simulados para os parâmetros OD, DBO₅, amônia, nitrato e fósforo total, com valores dentro de limites definidos na literatura. A ausência de dados observados para nitrogênio orgânico prejudicou o ajuste das simulações para este parâmetro. As análises das sensibilidades às alterações de +10% e -10% nos valores de K_a , K_d , KN_{oa} e KN_{ai} geraram poucas interferências nos resultados previamente calibrados.

Os cenários analisados tiveram o propósito de prognosticar a capacidade de autodepuração natural do Rio Uberabinha, principalmente a jusante da ETE - Uberabinha, a partir de intervenções qualitativas e quantitativas. Apenas com a intervenção na eficiência da ETE existente, no Cenário 1 prognosticou-se a necessidade acentuada de melhoria na eficiência de redução de DBO₅ e fósforo total. Melhoria esta talvez superior à capacidade de um tratamento terciário, que acarretaria na necessidade de lançamento de cargas orgânicas adicionais em bacia hidrográfica vizinha.

O Cenário 2 mostra que, apesar do aumento considerável na capacidade de diluição no médio e baixo curso do Rio Uberabinha, diante da não captação superficial para consumo humano no alto curso, ainda os parâmetros DBO₅ e fósforo total mantiveram-se em desacordo com a DN COPAM/CERH 01:2008. Isso enfatiza ainda mais a necessidade de melhoria na eficiência de tratamento na ETE - Uberabinha. Também, a similaridade dos prognósticos alcançados nos Cenários 2 e 3 mostra

que as outorgas superficiais na bacia hidrográfica do Rio Uberabinha estão muito próximas da saturação de 30% da vazão crítica $Q_{7,10}$ permitida pela Portaria IGAM nº 49/2010.

No Cenário 4, assumindo-se a vazão crítica $Q_{7,10}$ em toda a bacia hidrográfica e retirada de demanda máxima permitida para os afluentes rurais (30% de $Q_{7,10}$), evidencia-se claramente a necessidade de lançamento de boa parte da carga orgânica advinda da ETE - Uberabinha em uma bacia hidrográfica vizinha.

Diante destes prognósticos, acredita-se na necessidade, em um futuro próximo, de escolhas de novos locais para captações superficiais de água para consumo humano e para lançamentos pontuais de cargas poluidoras adicionais advindas de efluentes domésticos e industriais.

De uma forma geral, a ferramenta AQUATOOL mostrou-se ser um SSD em recursos hídricos viável na escala da bacia hidrográfica e que, através deste artigo, ajudará na melhor gestão dos recursos hídricos na bacia hidrográfica do Rio Uberabinha.

AGRADECIMENTO

Os autores agradecem à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), pelo apoio ao processo nº 1304/12-7.

REFERÊNCIAS

- ANDREU, J.; CAPILLA, J.; SANCHÍS, E. AQUATOOL: a generalized decision support-system for water-resources planning and operational management. *Journal Hydrology*, v. 177, n. 3-4, p. 269-291, 1996.
- ARGENT, R.M.; PERRAUD J.M.; RAHMAN J.M.; GRAYSON R.B.; PODGER, G.M. A new approach to water quality modelling and environmental decision support systems. *Environmental Modelling Software*, v. 24, p. 809-818, 2009.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 9649: Projeto de redes coletoras de esgoto sanitário. Rio de Janeiro, 1986.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 14486: Sistemas enterrados para condu-

ção de esgoto sanitário – Projeto de redes coletoras com tubos de PVC, 2000.

BERGSTRÖM, S. The HBV model, computer models of watershed hydrology. *Water Resources Publications*, pp. 443-476, 1995.

BRASIL. CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE. Resolução nº 357, de 17 de março de 2005.

CHAPRA, S. C. Engineering water quality models and TDMs. *Journal Water Resource Pl-ASCE*, v. 129, n. 4, p. 247-256, 2003.

CHAPRA, S.C., G.J. PELLETIER & H. TAO. *QUAL2K: A Modeling Framework for Simulating River and Stream Water Quality, Version 2.11: Documentation and Users Manual*. Civil and Environmental Engineering Dept., Tufts University, Medford, MA, 109 pp, 2008.

CHEN, J.; WU Y. Advancing representation of hydrologic processes in the Soil and Water Assessment Tool (SWAT) through integration of the TOPographic MODEL (TOPMODEL) features. *Journal of Hydrology*, v. 420-421, february, p. 319-328, 2012.

DE PAULA, L. M. *Avaliação da qualidade da água e autodepuração do rio Jordão, Araguari (MG)*. 2011. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil), Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 177 p., 2011.

DUTTA, D.; WILSON, K.; WELSH, W.D.; NICHOLLS, D.; KIM, S.; CETIN, L. A new river system modeling tool for sustainable operational management of water resources. *Journal of Environmental Management*, v. 121, p. 13-28, 2013.

FAN, C.; KO, C.H.; WANG, W.S. An innovative modeling approach using Qual2K and HEC-RAS integration to assess the impact of tidal effect on river Water quality simulation. *Journal of Environmental Management*, v. 90, n. 5, april, p. 1824-1832, 2009.

HUNDECHA, Y.; BÁRDOSSY, A. Modeling of the effect of land use changes on the runoff generation of a river basin through parameter regionalization of a watershed model. *Journal of Hydrology*, v. 292, n. 1-4, p. 281-295, 2004.

INSTITUTO DE GESTÃO DE ÁGUAS MINEIRAS - IGAM - Portaria nº 49, de 01 de julho de 2010.

LOUCKS, D. P., E. VAN BEEK, J.R. STEDINGER, J.P.M. DIJKMAN & M.T. VILLARS. *Water Resources Systems Planning and Management: An Introduction to Methods, Models and Applications*. UNESCO, Paris, 2005.

MAMAQANI, A; KHORASANI, N.; TALEBI K.; HASHEMI, S.H.; RAFIEE G.; KHOSROSHAHI, F.B. Diazinon fate and toxicity in the tajan River (Iran) ecosystem. *Environmental Engineering Science*, v. 28, p. 1-10, 2011.

NAKAMURA, M.S. *Modelación y análisis de calidad del Río Atibaia en el tramo entre el punto de captación de la ciudad de Atibaia y el punto de vertido de la ciudad de Paulínia (São Paulo - Brasil)*. 2010. Master en Ingeniería Hidráulica y Medio Ambiente, Universidad Politécnica de Valencia, Valencia, 119 p., 2010.

PAREDES J, ANDREU J, SOLERA A. *Modelo GESCAL para la simulación de la calidad del agua en sistemas de recursos hídricos. Manual de usuario. Versión 1.1*. Universidad Politécnica de Valencia, Valencia, 2009.

PAREDES-ARQUIOLA, J.; ÁLVAREZ, J.A.; SOLERA, A. A decision support system for water quality issues in the Manzanares River (Madrid, Spain). *Science of the Total Environment*, v. 408, n. 12, p. 2576–2589, 2010a.

PAREDES-ARQUIOLA, J.; ÁLVAREZ, J.A.; SOLERA, A. Water quantity and quality models applied to the Jucar River Basin, Spain. *Water Resources Management*, v. 24, n. 11, p. 2759-2779, 2010b.

PAREDES-ARQUIOLA J., A. SOLERA, J.A. ÁLVAREZ, N.L. ELVIRA. *Manual Técnico v1.0 - Herramienta EvalHid para la evaluación de recursos hídricos*. Universidad Politécnica de Valencia, Valencia, 2011.

REZENDE, G.B.M. *Modelo hidrológico e hidráulico para estimativa e delimitação de áreas inundadas: uma ferramenta de auxílio à elaboração de planos diretores de drenagem urbana*. 2012. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil), Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 115 p, 2012.

ROSOLEN, V.; HERPIN, U.; COELHO, N.M.M.; COELHO, L.M.; BRITO, J.L.S.; SILVA, L.A.; LIMA, S.C. Qualidade dos sedimentos no rio Uberabinha (Uberlândia, MG) e implicações ambientais. *Revista*

Brasileira de Geociências, v. 39, n. 1, março, p. 151-159, 2009.

SALLA, M.R.; MARAGNO, A.L.F.C.; GUIMARÃES, T.M.H.; MARAGNO, I.C.; MAGALHÃES, A.A.B. *Avaliação da qualidade de água nos Córregos Liso e do Lobo, Uberlândia (MG)*. In: 26º Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental, ABES, 2011.

SECHI, G.M.; SULIS, A. Water system management through a mixed optimization-simulation approach, *Journal Water Resource Pl-Asce*, v. 135, n. 3, p. 160-170, 2009.

SULIS, A.; SECHI, G.M. Comparison of generic simulation models for water resource systems, *Environmental Modelling & Software*, v. 40, february, p. 214-225, 2013.

VIEIRA FILHO, D.S.; SILVA, F.B.; VERAS, R.L.O.M.; NÓBREGA, F.A.R. Infraestrutura urbana: infraestrutura e o crescimento populacional no Brasil. *Ciências Exatas e Tecnológicas*, v. 1, n. 16, p. 19-25, 2013.

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, Ed. UFMG, v.7, 588 p, 2007.

XU, X.; HUANG, G.; ZHAN H.; QU, Z.; HUANG Q. Integration of SWAP and MODFLOW-2000 for modeling groundwater dynamics in shallow water table areas. *Journal of Hydrology*, v. 412-413, january, p. 170-181, 2012.

YENILMEZ, F.; AKSOY, A. Comparison of phosphorus reduction alternatives in control of nutrient concentrations in Lake Uluabat (Bursa, Turkey): Partial versus full sediment dredging. *Limnologica*, v. 43, p. 1-9, 2013.

ZHANG, X.; HUANG, G.H.; NIE, X.; LI, Q. Model-based decision support system for water quality management under hybrid uncertainty. *Expert Systems with Applications*, v. 38, n. 3, march, p. 2809-2816, 2011.

Decision Support System In Water Resources In Uberabinha River Basin, Minas Gerais

ABSTRACT

Water supply and quality is becoming a common problem in many river basins located in rapidly developing countries. Dealing with the human water supply of cities located in these basins requires sophisticated water planning processes. The increase in population and industry in the city of Uberlândia (Minas Gerais) has generated private and collective conflicts of interest in the multiple use of water in the Uberabinha River, thus requiring integrated management of quantity and quality. This paper explains the development of decision support system AQUATOOL in the Uberabinha River Basin for water planning and management including water quantity and quality modeling. The quantitative part consists of hydrological rain-flow modeling and a subsequent water management model developed with the SIMGES module for the period from October 2006 to September 2011. The water quality model was performed using the GESCAL module that is connected with the SIMGES module. The parameters studied were dissolved oxygen, biochemical oxygen demand, organic nitrogen, ammonia, nitrate and total phosphorus. The future scenarios simulated show the need to choose new locations, outside the Uberabinha river basin, for the abstraction of water used in public water supply in Uberlândia. The disagreement with the DN COPAM-CERH 01:2008 regarding biochemical oxygen demand and total phosphorus, in the months with less rain also shows the need to choose new locations to discharge additional pollution loads coming from the main wastewater treatment plant of the city.

Key-words: Water quantity and quality modeling, Decision support system AQUATOOL, SIMGES module, GESCAL module, Uberabinha river.