

IV-058 – CALIBRAÇÃO DE MODELO MATEMÁTICO DE QUALIDADE DA ÁGUA EM UMA BACIA CRÍTICA QUALITATIVAMENTE

Carolina Harue Nakamura⁽¹⁾

Engenheira Química pela Escola de Engenharia Mauá, do Instituto Mauá de Tecnologia (EEM/IMT). Especialista em Engenharia de Controle da Poluição Ambiental pela Faculdade de Saúde Pública, da Universidade de São Paulo (FSP/USP). Engenheira da Cobrape – Cia. Brasileira de Projetos e Empreendimentos. Mestranda em Engenharia Civil e Ambiental na Faculdade de Engenharia de Bauru, da Universidade Estadual Paulista “Julio de Mesquita Filho” (FEB/UNESP).

Marcio Ricardo Salla⁽²⁾

Engenheiro Civil pela Faculdade de Engenharia Civil de Araraquara. Mestre e Doutor em Engenharia Hidráulica e Saneamento pela Escola de Engenharia de São Carlos, da Universidade de São Paulo (EESC/USP). Pós-Doutorado na *Universidad Politécnica de València*, na Espanha. Professor Adjunto na Faculdade de Engenharia Civil, da Universidade Federal de Uberlândia (FECIV/UFU)

Gustavo Henrique Ribeiro da Silva⁽³⁾

Engenheiro Civil pela Faculdade de Engenharia Civil de Araraquara. Mestre em Saneamento e Ambiente pela Universidade Estadual de Campinas (UNICAMP). Doutor em Engenharia Hidráulica e Saneamento pela EESC/USP. Pós-doutorado pela *Wageningen University*, na Holanda. Professor Assistente da FEB/UNESP.

Endereço⁽¹⁾: Av. Engenheiro Luiz Edmundo Corrije Coube, 14-01 - Vargem Limpa - Bauru - SP - CEP 17033-360 - Tel. +55 (11) 99753-6773 - e-mail: chnakamura@yahoo.com.br

RESUMO

O emprego de um modelo matemático de qualidade da água em escala de bacia hidrográfica auxilia no melhor conhecimento da situação atual de seus corpos d'água e na simulação de cenários futuros da qualidade da água para o subsídio de decisões relativas ao seu aproveitamento e preservação. A aplicação do modelo consiste em sete etapas (definição do problema, simplificação e formulação de hipótese, concepção do modelo, resolução do problema, calibração e verificação, validação, além da aplicação do modelo em gerenciamento e formulação de prognóstico), sendo que a etapa de calibração é considerada uma das mais importantes do processo de modelagem. Esta etapa ajusta os coeficientes das equações matemáticas que representam os processos físicos, químicos e biológicos no curso da água natural, focando-se no melhor ajuste entre os perfis simulados e os dados de qualidade medidos em campo. A ferramenta de apoio utilizada para a calibração da presente pesquisa foi o modelo matemático Análise de Bacias Críticas Ottocodificadas (ABaCO), aplicada na Bacia Hidrográfica do Rio Pardo, localizada entre os Estados de São Paulo e Minas Gerais, com foco no Rio Lambari, no município mineiro de Poços de Caldas. A calibração foi realizada de forma automática, através da função *Solver* do Excel e, quando necessário, foram realizados ajustes manuais, obtendo como resultados preliminares parâmetros calibrados com bons ajustes entre às concentrações simuladas e as observadas em campo no período de estiação. Os primeiros resultados obtidos permitem aprimorar os coeficientes obtidos, de forma a incorporá-los ao modelo para obtenção de prognósticos relativos à qualidade da água.

PALAVRAS-CHAVE: Calibração, Modelo Matemático, Qualidade da Água.

INTRODUÇÃO

O Brasil concentra cerca de 12% da água doce produzida mundialmente, espalhadas em 12 regiões hidrográficas, sendo que as mais importantes são: Amazonas, Paraná e São Francisco. De acordo com MMA (2017), o potencial hídrico elevado é capaz de fornecer um volume de água 19 vezes maior/pessoa do que o mínimo estabelecido pela ONU.

Apesar desta abundância, a água é distribuída de forma irregular no país, devido as variações climáticas ao longo do ano, alterando o regime de vazão dos corpos d'água, como ocorre na região Nordeste, que vive uma situação crônica de escassez hídrica, e em regiões com maior dinamismo econômico e produtivo, como no caso das regiões metropolitanas, que enfrentam conflitos pelo uso da água, de ordem tanto quantitativa como qualitativa.

No que se refere a ordem qualitativa, a manutenção de rios e reservatórios com boa qualidade, voltado para diversos usos, como abastecimento público e geração de energia, depende de dois fatores: naturais, através do escoamento superficial e infiltração do solo; e antrópicos, através de lançamentos de esgoto doméstico e industrial, e de carga difusa (VON SPERLING, 2007). De forma a impedir problemas provenientes da poluição da água, que possam comprometer o seu aproveitamento múltiplo e integrado, faz-se necessária a gestão dos recursos hídricos.

No Brasil, a Política Nacional de Recursos Hídricos (PNRH), através da Lei Federal nº 9.433, estabeleceu instrumentos para a gestão dos recursos hídricos para assegurar a disponibilidade hídrica em padrões de qualidade adequada aos diversos usos, criou o Sistema Nacional de Gerenciamento de Recursos Hídricos (SINGREH), e intensificou a formação e atuação de Comitês de Bacia Hidrográfica em todo o país (ANA, 2012; BRAGA *et al*, 2006; JESUS, 2006).

O emprego de ferramentas que auxiliem na gestão, controle e proteção dos recursos hídricos e que possibilitem a análise e o prognóstico dos corpos d'água é considerado essencial. Os modelos matemáticos de qualidade da água são utilizados para estes fins, permitindo a simulação dos processos de autodepuração do rio e, conseqüentemente, obter um melhor entendimento da bacia hidrográfica em estudo através da somatória de impactos de fontes de um determinado parâmetro de qualidade da água, com a identificação das fontes poluentes de maior impacto. Os resultados obtidos através dos modelos matemáticos permitem também subsidiar a tomada de decisões com o melhor conhecimento possível das conseqüências de cada alternativa sobre o sistema hídrico (OPPA, 2007; JESUS, 2006; NAKAMURA *et al*, 2012).

Neste sentido, a finalidade do presente trabalho é calibrar o modelo matemático Análise de Bacias Críticas Ottocodificadas (ABaCO), elaborado para análise da criticidade quantitativa e qualitativa de corpos hídricos superficiais, na Bacia Hidrográfica do Rio Pardo, especificamente para o Rio Lambari, considerado crítico pela Agência Nacional de Águas (ANA). Este corpo hídrico está localizado entre a porção sul do Estado de Minas Gerais, abrangendo o município de Poços de Caldas, e está inserido na Unidade de Planejamento e Gestão de Recursos Hídricos – UPGRH GD06.

O MODELO MATEMÁTICO DE QUALIDADE DA ÁGUA

O modelo matemático de qualidade da água é uma ferramenta utilizada no planejamento e gestão de recursos hídricos, desenvolvido originalmente para auxiliar na solução de problemas. Não obstante, além de ser utilizado para ajudar na minimização de problemas de poluição, ele possibilita compreender o meio ambiente e visualizá-lo integralmente, uma vez que associam as informações físicas, químicas e biológicas nas porções sobrenadante e de fundo do curso d'água.

O modelo Análise de Bacias Críticas Ottocodificadas (ABaCO) foi desenvolvido no âmbito do estudo “Modelagem quantitativa e qualitativa de trechos de rios em bacias hidrográficas consideradas críticas”, de modo a avaliar a criticidade quali-quantitativa de corpos d'água em bacias consideradas críticas pela Nota Técnica Conjunta nº 002/2012/SPR/SRE-ANA e ratificado pela Portaria ANA nº 62/2013, pelo LabSid, em parceria com o Consórcio Cobrape/CH2MHill, para a ANA.

O ABaCO apresenta um algoritmo específico que possibilita a criação automática de rede de fluxo compatível com o aplicativo AcquaNet, a partir de uma base ottocodificada, que teve seu algoritmo alterado para que fosse possível atender às complexidades das bacias hidrográficas inseridas no modelo, que podem apresentar 200.000 ottobacias e áreas até 82.000 km² (LABSID & CONSÓRCIO COBRAPE/CH2MHILL, 2015).

O modelo foi utilizado como ferramenta de apoio para a calibração do Rio Lambari e apresenta como um de seus componentes o módulo de qualidade da água, que visa fornecer uma quantificação da qualidade físico-química do corpo hídrico através da modelagem dos parâmetros de qualidade da água. Neste módulo, a solução das equações ordinárias é realizada pelo Método de Euler, onde são efetuados cálculos, trecho a trecho, relativos aos efeitos de dispersão (advecção e difusão) e aos processos (reaeração, degradação, sedimentação, amonificação, nitrificação, ressurgimento de fundo, demanda de fundo, respiração, fotossíntese, entre outros), ao longo do tempo, dos diversos parâmetros simulados nos trechos simulados.

A formulação básica que rege a variação da concentração em função do tempo é dada pela equação (1):

$$\frac{\delta C}{\delta t} = -U \cdot \frac{\delta C}{\delta x} + D \cdot \frac{\delta^2 C}{\delta x^2} - \lambda \cdot C + \frac{q_L}{A} \cdot (C_L - C) \quad \text{equação (1)}$$

em que C é a concentração no tempo t [mg.L^{-1}]; t é o tempo [s]; U é a velocidade [m.s^{-1}]; D é o coeficiente de difusão turbulenta [$\text{m}^2.\text{s}^{-1}$]; λ é o coeficiente de decaimento de 1ª ordem [dia^{-1}]; q_L é a contribuição lateral linear [L.s^{-1}]; A é a área da seção transversal [m^2]; C_L é a concentração da contribuição lateral [mg.L^{-1}].

Os parâmetros físicos, químicos e biológicos que podem ser simulados são demanda bioquímica de oxigênio - DBO, oxigênio dissolvido - OD, série de fósforo (fósforo inorgânico e fósforo orgânico), série de nitrogênio (nitrogênio orgânico, nitrito, nitrato e nitrogênio amoniacal), coliformes termotolerantes, pH e temperatura.

Na Figura 1 é apresentada a tela de simulação do ABaCO, onde é possível selecionar os parâmetros de qualidade e os elementos que se desejam simular, como as afluições das cargas difusas e pontuais e os usos pontuais e difusos (captações e lançamentos).

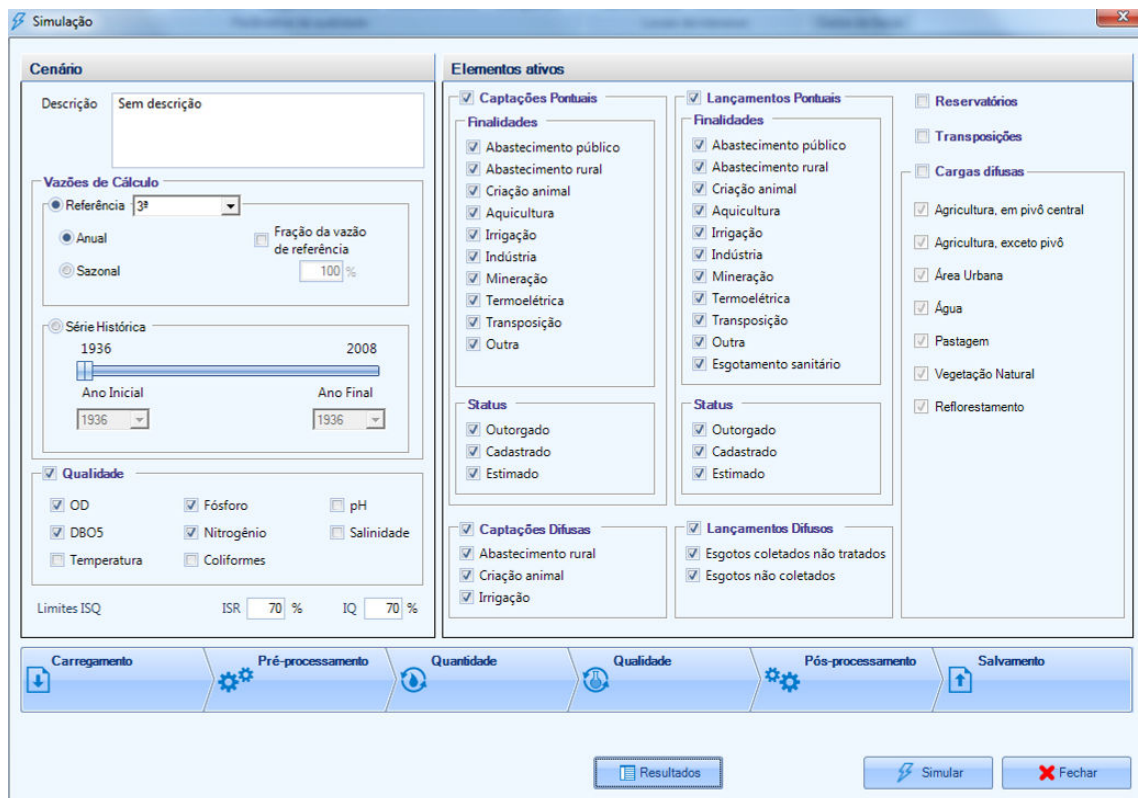


Figura 1: Tela de simulação do ABaCO

Para que o comportamento real de um corpo hídrico seja representado da melhor maneira possível, é imprescindível realizar a calibração do modelo matemático. De forma a auxiliar a execução desta etapa, o ABaCO permite exportar os resultados do balanço hídrico quali-quantitativo para uma planilha em Excel, em que é realizada automaticamente a calibração dos parâmetros de qualidade de água, através da ferramenta *Solver*.

ÁREA DE ESTUDO

A área selecionada para o desenvolvimento deste trabalho foi o Rio Lambari, localizado na Bacia Hidrográfica do Rio Pardo, na porção noroeste do município de Poços de Caldas, ao sul de Minas Gerais.

O Rio Lambari apresenta 23 km de extensão, sendo formado pela junção do Rio das Antas e do Ribeirão do Poços, localizado a jusante da barragem Bortolan, com deságue na margem esquerda do Rio Pardo, mais precisamente no reservatório Caconde (COSTA *et al*, 2001). Na Figura 2 é ilustrada a localização da sub-bacia do Rio Lambari no município de Poços de Caldas e deste município no Estado de Minas Gerais.

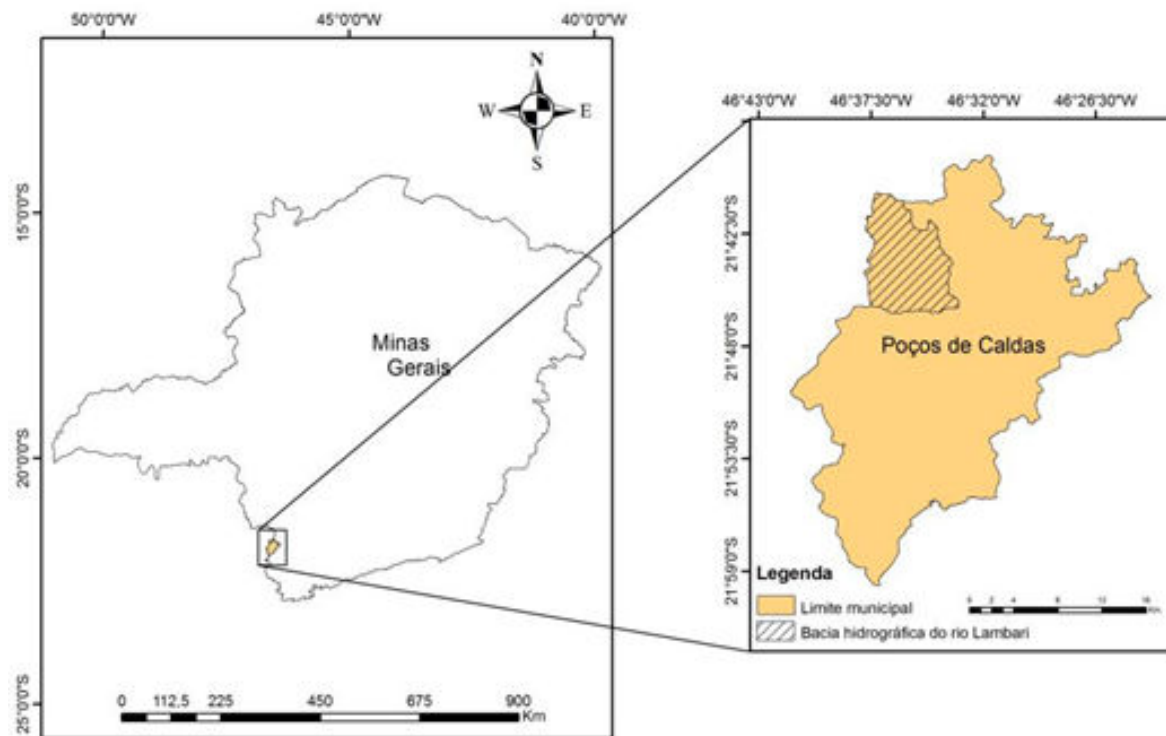


Figura 2: Sub-bacia do Rio Lambari no município de Poços de Caldas, MG

Fonte: OLIVEIRA *et al*, 2013

Sua área de drenagem corresponde a 513,4 km² (IGAM & CBH-MOGI/PARDO, 2010) e em seu leito encontram-se dois reservatórios destinados a geração de energia elétrica, ambos sob concessão do DME Poços de Caldas: (i) Usina Hidrelétrica (UHE) Eng. Pedro Affonso Junqueira ou Antas I, cuja energia gerada é totalmente destinada às distribuidoras de energia do Sistema Interligado Nacional, no regime de cotas de garantia física; e (ii) UHE Walther Rossi ou Antas II, cuja energia gerada é distribuída no município de Poços de Caldas

A população residente no município de Poços de Caldas é de aproximadamente 161 mil habitantes, sendo que 98% residem na área urbana. Apesar de apresentar 100% de esgoto coletado, Poços de Caldas possui baixo índice de tratamento, com 80% do esgoto produzido sendo lançado *in natura* diretamente ao Rio Lambari, provocando um odor desagradável na região.

MATERIAIS E MÉTODOS

O trecho crítico do Rio Lambari calibrado encontra-se entre as confluências do Rio das Antas e Ribeirão dos Poços até a confluência do Córrego das Laranjeiras, compreendendo 14 km de extensão e, por apresentar um trecho curto, o Rio Lambari não consegue reestabelecer o equilíbrio, ou seja, retornar a zona de águas limpas (TONON, 2014).

Por trabalhar com bases georreferenciadas otocodificadas, o ABaCO, neste trecho simulado, é composto por 13 unidades geográficas de trabalho, denominadas ottobacias, em escala 1:250.000, sendo que seis ottobacias pertencem ao corpo hídrico principal, e sete pertencem aos afluentes do Rio Lambari. Na Figura 3 estão representados esquematicamente as ottobacias e os afluentes do trecho principal e os pontos de efluentes doméstico e industrial.

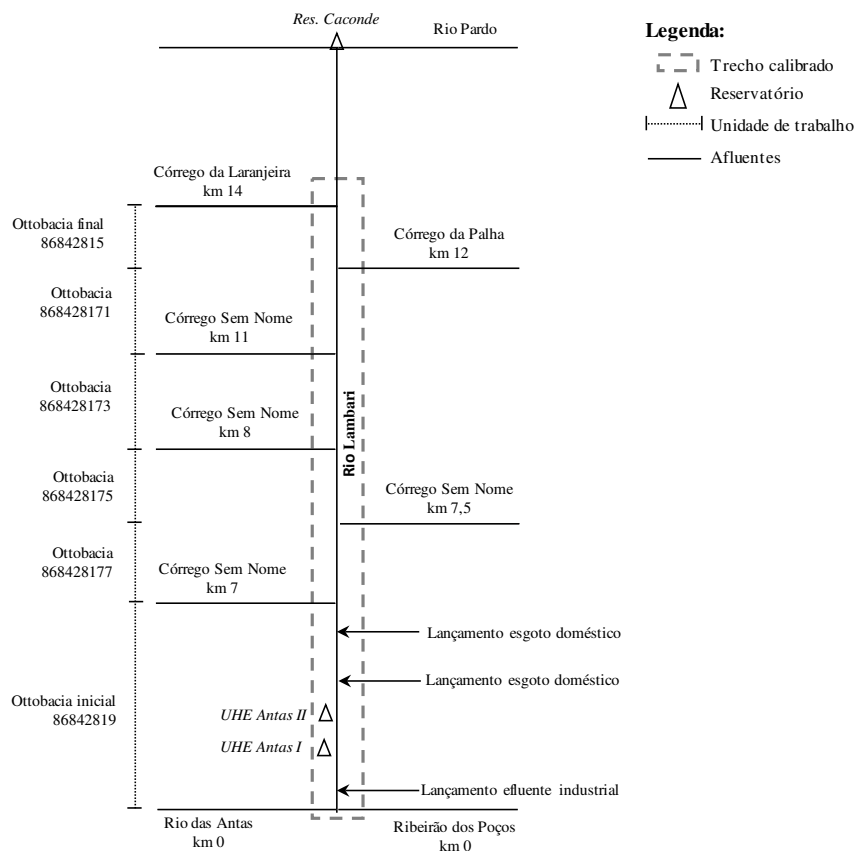


Figura 3: Diagrama unifilar do trecho calibrado do Rio Lambari

Coeficientes adotados para o balanço hídrico

Os coeficientes relativos aos parâmetros DBO, OD, fósforo e nitrogênio foram, inicialmente, adotados fixos, conforme a faixa de valores apresentados na literatura da área, tais como Bowie *et al* (1985), Brown *et al* (1987), von Sperling (2007), entre outros. Na Tabela 1 estão apresentados os valores iniciais adotados dos coeficientes para a obtenção do balanço hídrico quali-quantitativo.

Tabela 1: Valores dos parâmetros adotados inicialmente no modelo (base a 20°C)

PARÂMETRO	COEFICIENTE (unidade)	DESCRIÇÃO DO COEFICIENTE	VALOR
DBO	$k_{DBO,d}$ (dia ⁻¹)	Coeficiente de desoxigenação devido a DBO carbonácea	0,20
	$k_{DBO,f}$ (dia ⁻¹)	Coeficiente de redução da DBO carbonácea devido à sedimentação	0,05
Nitrogênio	$k_{N,ao}$ (dia ⁻¹)	Coeficiente de hidrólise de nitrogênio orgânico para amônia	0,00
	$k_{N,ai}$ (dia ⁻¹)	Coeficiente de oxidação biológica de amônia para nitrito	0,00
	$k_{N,in}$ (dia ⁻¹)	Coeficiente de oxidação biológica de nitrito para nitrato	0,00
	$k_{N,f}$ (dia ⁻¹)	Coeficiente de sedimentação de nitrogênio orgânico	0,01
Fósforo	$k_{P,oi}$ (dia ⁻¹)	Coeficiente de decaimento de fósforo orgânico para inorgânico	0,00
	$k_{P,f}$ (dia ⁻¹)	Coeficiente de sedimentação de fósforo orgânico	0,02
OD	k_d (g/m ² /d)	Coeficiente de demanda de oxigênio pelo sedimento	0,00
	k_a (dia ⁻¹)	Coeficiente de reaeração ⁽¹⁾	----

Nota: ⁽¹⁾ A taxa de reaeração pode ser calculada de cinco maneiras distintas, através: da inserção de um valor fixo; da escolha de equações proposta por O'Connor e Dobbins (1958), Churchill, Elmore e Buckingham (1962) e Owens, Edward e Gibbs (1964); ou automaticamente, com seleção realizada pelo modelo por uma das equações mencionadas, em função da velocidade e profundidade do trecho simulado.

Calibração do modelo matemático

Para a consecução da calibração, foram realizadas campanhas de campo na Bacia Hidrográfica do Rio Pardo a fim de se obter o melhor ajuste entre os valores estimados e observados. As campanhas ocorreram nos formadores do Rio Lambari (P1 e P2) e em seu trecho crítico (P3, P4 e P5), em dois períodos hidrológicos, seco e chuvoso, totalizando sete campanhas (cinco no período seco e duas no período chuvoso) e 35 análises de qualidade da água, em cinco pontos de amostragem. Em campo, foram analisados os parâmetros OD, pH e temperatura e, em laboratório, os parâmetros DBO, fósforo total, ortofosfato, nitrato, nitrogênio amoniacal e nitrogênio total. As amostragens foram realizadas conforme as recomendações da ANA/CETESB (2011) e RICE *et al* (2012).

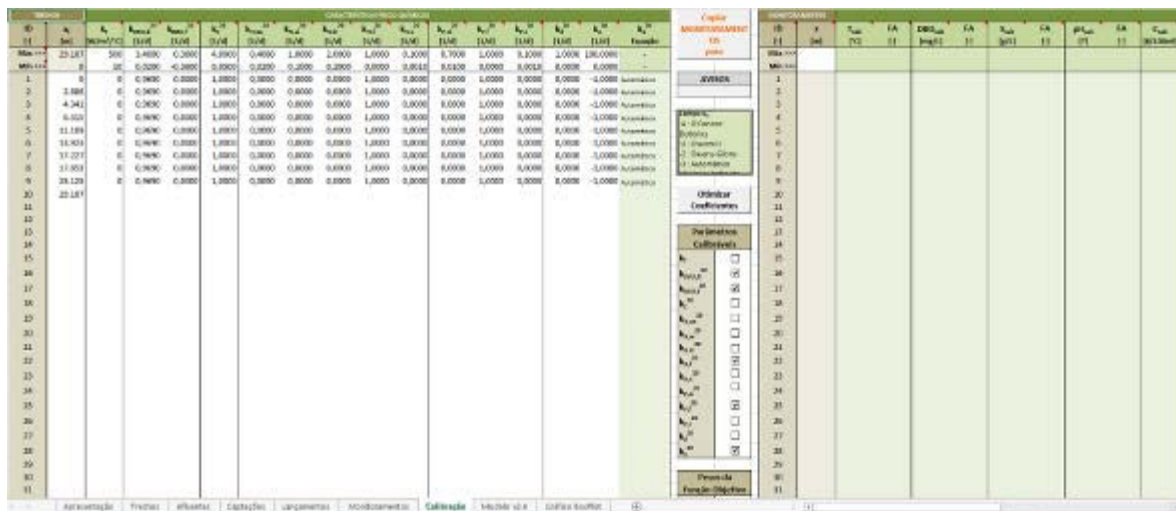
A próxima etapa realizada foi calcular os balanços hídricos quantitativo e qualitativo da bacia em estudo, utilizando como ferramenta de apoio o modelo ABaCO. A simulação para obtenção do balanço hídrico qualitativo considerou condições descritas na sequência: (i) série de vazões correspondentes à média das campanhas no período seco; (ii) aporte de cargas pontuais e difusas provenientes de efluentes doméstico e industrial; (iii) valores dos coeficientes dos parâmetros baseados na literatura; e (iv) concentrações naturais da bacia, obtidos a partir do monitoramento realizado pela instituição ambiental estadual, no caso o IGAM, com a seleção do pontos de monitoramento com pouca influência da atividade antrópica.

Concluídas as campanhas de campo e obtidos os balanços hídricos qualitativo e quantitativo da bacia em estudo, procedeu-se a calibração do modelo matemático. A calibração foi efetuada em uma planilha Excel, gerada a partir do módulo de qualidade da água do modelo ABaCO, de forma manual ou automatizada. Para a automatização empregou-se o *Solver*, através da função objetivo, que é um método de otimização para minimizar a diferença quadrática ponderada entre o valor observado nas campanhas de campo e o valor estimado na simulação.

A planilha de calibração permite calibrar e simular 13 parâmetros físicos, químicos e biológico, sendo eles: DBO₅, OD, série de nitrogênio (nitrogênio orgânico, nitrogênio amoniacal, nitrito, nitrato e nitrogênio total), série de fósforo (fósforo orgânico, fósforo inorgânico e fósforo total), temperatura, salinidade e coliformes. Esta planilha é composta por oito abas, que contêm informações sobre o trecho a ser calibrado, os seus afluentes, as captações e lançamentos existentes, dados das campanhas de monitoramento, a calibração e os resultados em gráficos *boxplots*.

Na Figura 4 está apresentada a aba Calibração, onde é realizada a calibração dos trechos de rios monitorados dos parâmetros desejados, através da função objetivo ou manualmente.

A aba Calibração permite copiar a distância entre dois pontos monitorados nas campanhas de campo a partir da aba Monitoramento, e selecionar o parâmetro de qualidade da água a ser calibrado. Apresenta também as faixas mais usuais dos coeficientes dos parâmetros calibráveis, que serve como parâmetro para otimização dos coeficientes. É importante mencionar que a calibração ocorre por trechos de rio, considerando a distância entre dois pontos monitorados.



The image shows a screenshot of an Excel spreadsheet titled 'Calibração'. The spreadsheet is organized into columns for different parameters and their coefficients. The columns are labeled with parameter names and their corresponding coefficients (e.g., K₁, K₂, K₃, etc.). The rows represent different river reaches or points of monitoring. The spreadsheet is used for calibrating the model parameters based on field data.

Figura 4: Aba Calibração da planilha Excel

Os parâmetros selecionados inicialmente para a calibração foram DBO₅, OD, fósforo total e nitrogênio total, utilizando-se os resultados de vazão e qualidade da água monitorados do período seco, por representar as condições mais críticas no corpo d'água.

Anteriormente ao processo de calibração, é possível observar na ferramenta ABaCO os perfis de vazão juntamente com os perfis simulados dos diversos parâmetros de qualidade da água ao longo do curso d'água, além dos respectivos valores medidos em campo, que estão apresentados no formato de *boxplots*. Os *boxplots* agrupam os dados de campo na forma de quartis, representando cinco medidas estatísticas (valores mínimo, máximo, mediana, 1º e 3º quartis) capazes de fornecer evidências acerca da posição, dispersão, assimetria, caudas e valores atípicos (KNAPIK, 2008). Na Figura 5 estão apresentadas as relações para o parâmetro DBO₅ e os dados de campo, evidenciando a necessidade de calibração dos coeficientes deste parâmetro.

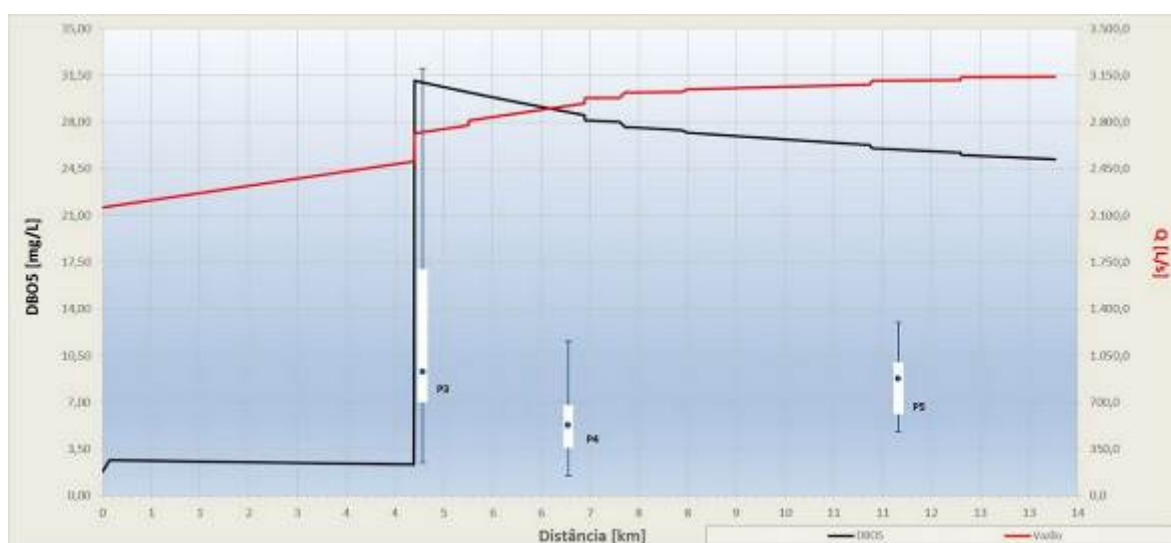


Figura 5: Perfis de vazão e de DBO₅ obtido no balanço hídrico, com os *boxplots* dos dados de campo, no trecho Rio Lambari

RESULTADOS PRELIMINARES E DISCUSSÃO

Na otimização dos coeficientes dos parâmetros selecionados, realizada através da função *Solver* do Excel, foi possível obter valores de coeficientes que conduzem as concentrações estimadas pelo modelo mais próximas às concentrações observadas em campo, considerando a distância entre dois pontos monitorados.

Na Tabela 2 são apresentados os primeiros valores dos parâmetros obtidos no processo de otimização. Observa-se que os parâmetros calibrados $k_{DBO,d}$, $k_{DBO,f}$, $k_{N,in}$ e $k_{N,f}$ estiveram superiores aos coeficientes teóricos adotados, atingindo os valores máximos da faixa apresentada por Brown *et al* (1987) para $k_{DBO,f}$ e $k_{N,in}$ (0,36 dia⁻¹, 2,00 dia⁻¹, respectivamente), em todo o trecho simulado. Mesmo sendo superior ao valor adotado, $k_{DBO,d}$ manteve-se na faixa dos dados de literatura, assim como $k_{P,f}$. Os demais parâmetros, com exceção de $k_{P,oi}$, apresentaram os valores mínimos da faixa da literatura.

Comparando os dados da Tabela 2 com outros estudos, verifica-se que Salla *et al* (2013), que realizou a calibração do modelo QUAL-UFMG no Rio Jordão, localizado na Bacia Hidrográfica do Rio Dourados, em Minas Gerais, obteve coeficientes calibrados próximos aos valores deste trabalho para os parâmetros $k_{DBO,f}$, $k_{N,ai}$ e $k_{N,in}$ (0,22 dia⁻¹, 0,10 dia⁻¹ e 1,00 dia⁻¹, respectivamente), mesmo com uma vazão média observada pelos autores sendo maior (5,68 m³/s) do que a observada no presente trabalho (2,64 m³/s). Já os parâmetros $k_{P,oi}$ e $k_{N,oa}$ apresentaram valores elevados, ambos iguais a 0,40 dia⁻¹, enquanto que $k_{DBO,d}$, $k_{N,f}$ e $k_{P,f}$ estiveram menores aos resultados deste trabalho.

No estudo desenvolvido por Knapik (2009), que calibrou o modelo QUAL2E nos rios Iraí e Iguçu, na Bacia Hidrográfica do Alto Iguçu, no Paraná, os resultados obtidos pela autora indicaram que, para uma vazão mediana de campo igual a 29,0 m³/s, somente o parâmetro $k_{N,ai}$ apresentou valor igual a este trabalho (0,10 dia⁻¹), enquanto que $k_{DBO,f}$, $k_{N,oa}$, $k_{P,oi}$ e $k_{P,f}$ foram superiores (1,20 dia⁻¹, 0,10 dia⁻¹, 0,35 dia⁻¹ e 0,20 dia⁻¹, respectivamente), e $k_{DBO,d}$, $k_{N,in}$, $k_{N,f}$ foram inferiores (0,10 dia⁻¹, 0,80 dia⁻¹ e 0,08 dia⁻¹, respectivamente).

Já em outro estudo desenvolvido por Salla *et al* (2016) no Rio Uberabinha, em Minas Gerais, na vazão média observada semelhante a vazão do presente trabalho ($2,64 \text{ m}^3/\text{s}$), verifica-se que os autores obtiveram coeficientes calibrados similares para $k_{N,ai}$, $k_{N,in}$ e $k_{P,oi}$, onde os valores foram de $k_{N,ai} = 0,40$ a $0,90 \text{ dia}^{-1}$; $k_{N,in} = 0,00$ a $0,05 \text{ dia}^{-1}$ e $k_{P,oi} = 0,00$ a $0,80 \text{ dia}^{-1}$.

Tabela 2: Parâmetros calibrados

DISTÂNCIA [km]	$k_{DBO,d}$ [dia^{-1}]	$k_{DBO,f}$ [dia^{-1}]	$k_{N,oa}$ [dia^{-1}]	$k_{N,ai}$ [dia^{-1}]	$k_{N,in}$ [dia^{-1}]	$k_{N,f}$ [dia^{-1}]	$k_{P,oi}$ [dia^{-1}]	$k_{P,f}$ [dia^{-1}]
0	3,00	0,36	0,02	0,10	2,00	1,00	0,01	0,02
4,6	3,00	0,36	0,02	0,10	2,00	1,00	0,01	1,00
6,7	2,00	0,36	0,02	0,10	2,00	1,00	0,01	0,00

Nas Figuras 6 e 7 são apresentadas as curvas teóricas e calibradas dos parâmetros DBO_5 , OD, nitrogênio total e fósforo total no trecho calibrado do Rio Lambari. De uma maneira geral, nota-se que as curvas calibradas estiveram bem ajustadas aos dados observados em campo, principalmente para nitrogênio total e fósforo total. Ambos os parâmetros respeitaram os limites de aceitação de 25 a 75% dos *boxplots* em pelo menos dois pontos de amostragem. Já DBO_5 e OD não apresentaram ajustes em somente um ponto de amostragem (P4 e P3, respectivamente), influenciado pelo despejo de esgoto doméstico lançado *in natura* no Rio Lambari na altura do km 4,4. Nos trechos em que houve compatibilidade com os dados de campo, verifica-se que os dois parâmetros apresentaram curvas nos limites de 25% a 75% dos *boxplots*. Vale mencionar que OD é calibrado automaticamente, ou seja, a curva é obtida em função da calibração de DBO_5 .

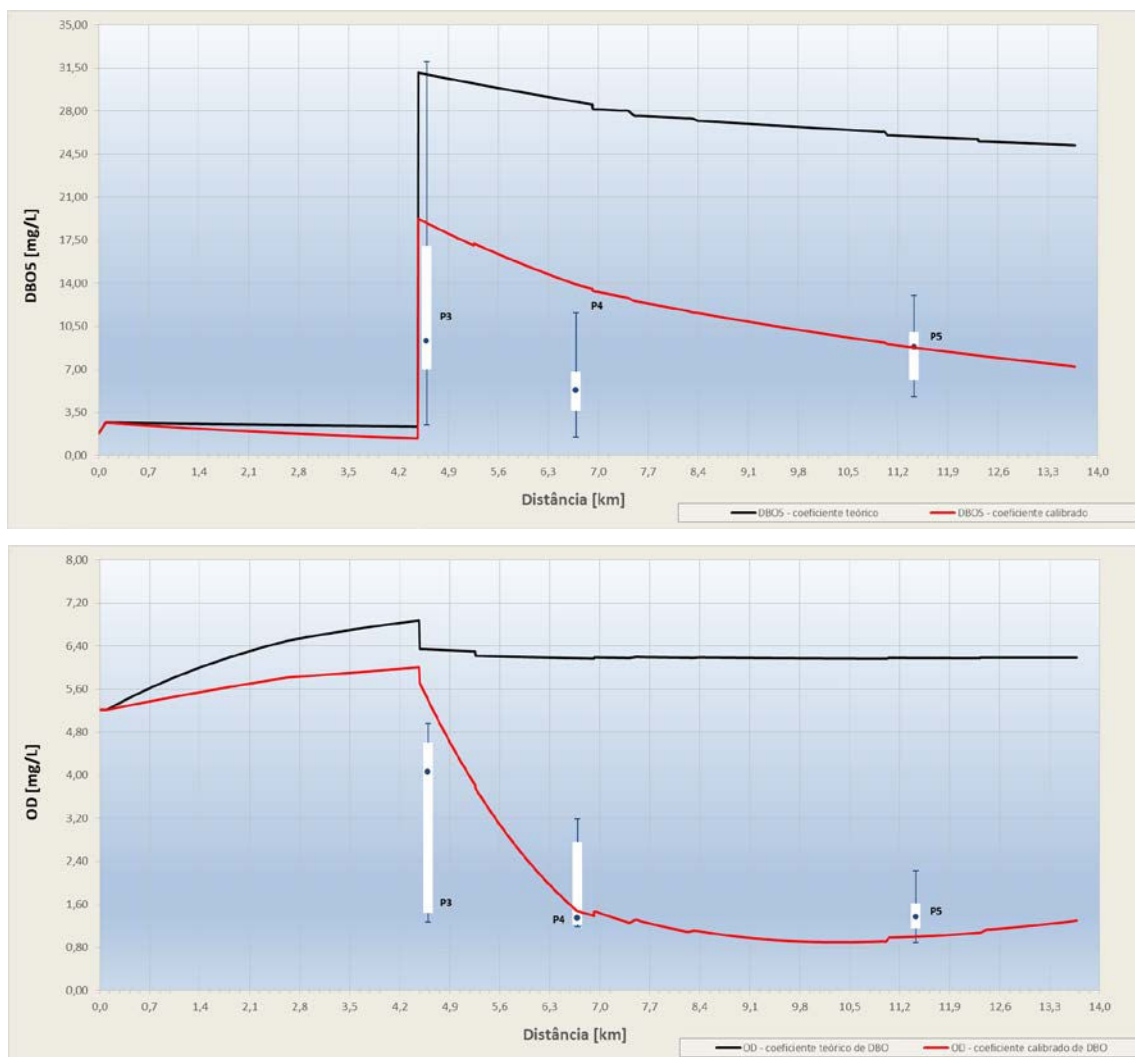


Figura 6: Perfis de concentração de DBO_5 e OD – coeficientes teórico e calibrado

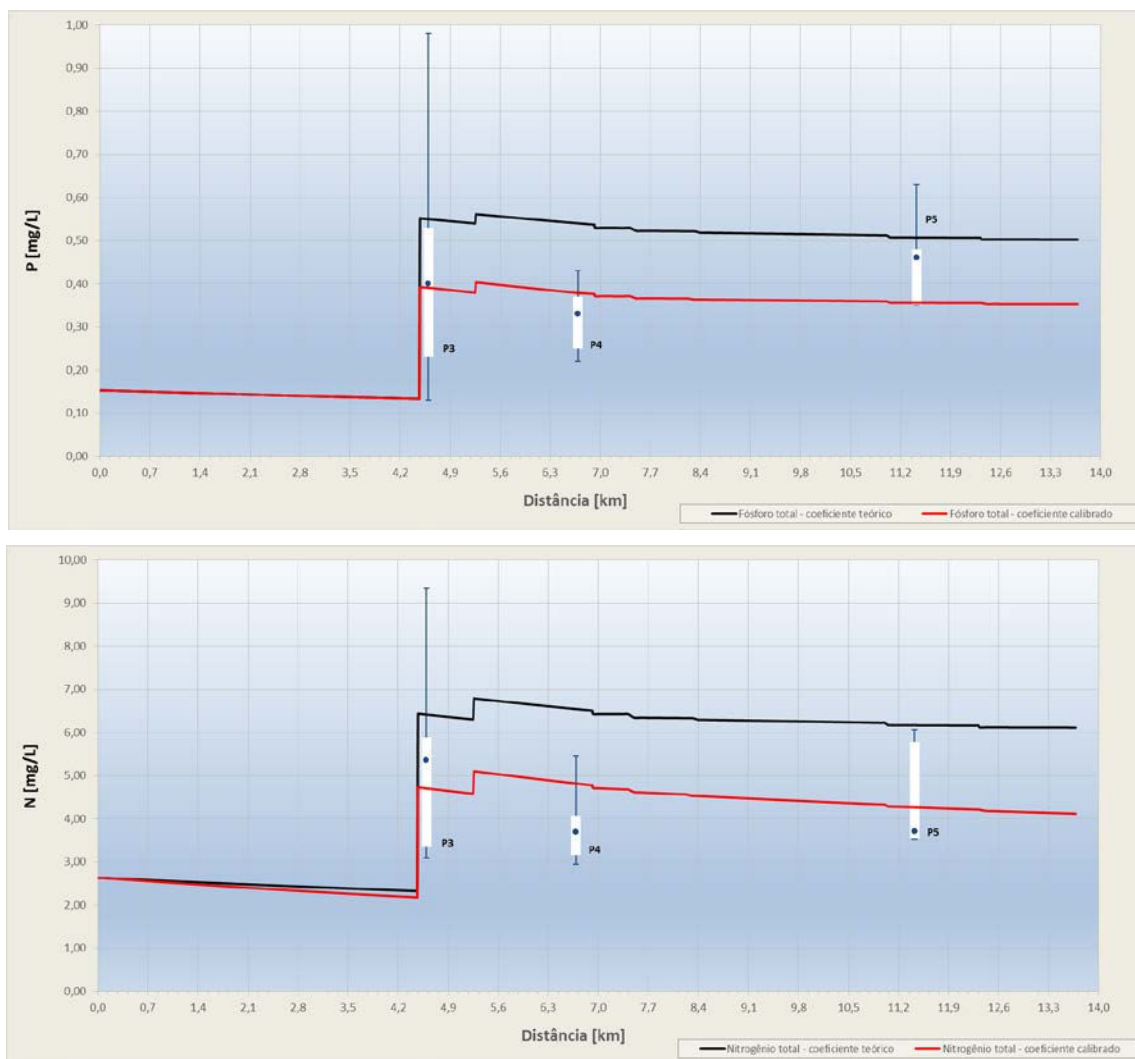


Figura 7: Perfis de concentração de fósforo total e nitrogênio total – coeficientes teórico e calibrado

CONCLUSÕES

A calibração dos parâmetros de qualidade da água, realizada automaticamente pela ferramenta *Solver* do Excel, atendeu os requisitos inicialmente propostos por este trabalho, ou seja, houve correspondência entre os dados simulados e observados em campo em, pelo menos, dois dos três pontos de amostragem existentes no Rio Lambari. Entretanto, o fósforo total e o nitrogênio total foram os que estiveram melhor ajustados aos dados de campo: o primeiro esteve no limite de 25% a 75% dos três *boxplots*, e o segundo esteve ajustado próximo à mediana em dois pontos de amostragem, e entre os limites de 75% e superior em um ponto.

Outra questão observada na calibração é quanto aos parâmetros DBO₅ e OD, reforçando que este último é obtido automaticamente através dos coeficientes calibrados de DBO₅. Os mesmos foram fortemente influenciados pela carga elevada de DBO₅ lançada no Rio Lambari (375,6 mg/L), proveniente de esgoto doméstico gerado na área urbana do município de Poços de Caldas e aportada sem tratamento no corpo hídrico.

No que se refere aos valores dos parâmetros obtidos na calibração, verificou-se que foram distintos aos adotados para obtenção do balanço hídrico quali-quantitativo, que estiveram baseados na faixa típica apresentada por Brown *et al* (1987) e von Sperling (2007). Entretanto, os parâmetros calibrados não excederam os valores da faixa típica apresentada pela literatura.

Através dos resultados preliminares, nota-se que é importante obter um melhor conhecimento do corpo hídrico estudado, uma vez que as informações relativas a ele são escassas. Para isso, sugere-se que ocorra a ampliação do monitoramento de qualidade da água e vazão, estudos relativos à carga difusa sobre o corpo hídrico, e o emprego da modelagem matemática como instrumento de análise da variação da qualidade da água do corpo hídrico, que mostra-se como uma metodologia adequada aos estudos que visam o planejamento e o controle e proteção dos recursos hídricos para o subsídio de tomada de decisões e favorecimento da realização de análises de intervenção de medidas de controle ambiental.

AGRADECIMENTOS

À COBRAPE (Cia. Brasileira de Projetos e Empreendimentos) por ter proporcionado e apoiado o desenvolvimento do presente trabalho e participação no Congresso ABES/FENASAN 2017, à ANA (Agência Nacional de Águas) por ter proporcionado e cedido dados, ao LabSid (Laboratório de Sistema de Suporte a Decisões em Engenharia Ambiental e de Recursos Hídricos), pelo desenvolvimento do modelo matemático, e à FAPEMIG (Fundação de Amparo à Pesquisa de Minas Gerais) pelo financiamento para a participação no Congresso ABES/FENASAN 2017.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS (ANA). Panorama da qualidade das águas superficiais do Brasil: 2012. Brasília: ANA, 2012.
2. AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS – ANA. Conjuntura dos recursos hídricos no Brasil 2013. Brasília: ANA, 2013.
3. AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS (ANA); COMPANHIA AMBIENTAL DE SÃO PAULO (CETESB). Guia nacional de coleta e preservação de amostras: água, sedimento, comunidades aquáticas e efluentes líquidos. Brasília: ANA; São Paulo: CETESB, 2011.
4. BOWIE, G.L., MILLS, W.B., PORCELLA, D.B., CAMPBELL, C.L., PAGENKOPF, J.R., RUPP, G.L., JOHNSON, K.M., CHAN, P.W.H., GHERINI, S.A. *Rates, constants and kinetics formulations in surface water quality modeling*. Athens, GA: USEPA, 1985.
5. BROWN, L.C., BARNWELL, T.O. *The enhanced stream water quality models QUAL2E and QUAL2E-UNCAS: documentation and user manual*. Athens, GA: USEPA, 1987.
6. BRAGA, B.; PORTO, M.; TUCCI, C. E. M. Monitoramento de quantidade e qualidade das águas. In: REBOUÇAS, A.C; BRAGA, B.; TUNDISI, J.G. (Orgs.). *Águas doces no Brasil: capital ecológico, uso e conservação*. 3. ed. São Paulo: Escrituras, 2006.
7. CHAPRA, S.C. *Surface water-quality modeling*. Long Grove, IL: Waveland Press Inc., 1997.
8. COSTA, P. C. G.; DELGADO, S. L.; CARMO, C. C. C. Projeto hidrogeoambiental das estâncias hidrominerais de Poços de Caldas. Belo Horizonte: COMIG, 2001. 69 p.
9. IGAM – INSTITUTO MINEIRO DE GESTÃO DAS ÁGUAS; CBH-MOGI/PARDO – COMITÊ DE BACIA HIDROGRÁFICA DOS AFLUENTES MINEIROS DOS RIOS MOGI-GUAÇU E PARDO. Plano diretor da bacia hidrográfica dos afluentes mineiros dos rios Mogi-Guaçu e Pardo (unidade de gestão GD06): fase II – prognóstico. Delfim Moreira, MG: Fundação Educacional de Ensino de Técnicas Agrícolas, Veterinárias e de Turismo Rural, 2010.
10. JESUS, J. A. O. Utilização de modelagem matemática 3D na gestão da qualidade da água em mananciais - aplicação no reservatório Billings. Tese de doutorado. Faculdade de Saúde Pública - Universidade de São Paulo, 2006.
11. JØRGENSEN, S.E. BENDORICCHIO, G. *Fundamentals of ecological modelling*. 3. ed. Oxford: Elsevier Science, 2001, 544 p.
12. KNAPIK, H. G.; FRANÇA, M. S.; FERNANDES, C. V. S.; MASINI, L. S.; MARIN, M. C. F. C.; PORTO, M. F. A. Análise crítica da calibração do modelo de qualidade da água QUAL2E – estudo de caso da bacia do Alto Iguaçu. *Revista de Gestão de Água da América Latina (REGA)*. v.5, n.2, p-25-37, jul./dez. 2008.
13. KNAPIK, H. G. Reflexão sobre monitoramento, modelagem e calibração na gestão de recursos hídricos: estudo de caso da qualidade da Bacia do Alto Iguaçu. Dissertação de mestrado. Universidade Federal do Paraná, 2009.
14. LABORATÓRIO DE SISTEMA DE SUPORTE A DECISÕES EM ENGENHARIA AMBIENTAL E DE RECURSOS HÍDRICOS (LABSID); CONSÓRCIO COBRAPE/CH2MHILL. ABaCO: Análise de

- bacias críticas otocodificadas – manual técnico. São Paulo: ANA, Consórcio Cobrape/CH2MHill, LabSid, 2015.
15. LABORATÓRIO DE SISTEMA DE SUPORTE A DECISÕES EM ENGENHARIA AMBIENTAL E DE RECURSOS HÍDRICOS (LABSID); CONSÓRCIO COBRAPE/CH2MHILL; AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS (ANA). ABaCO. Modelo ABaCO: versão beta 1.0.12.4. São Paulo: LabSid/Cobrape/CH2MHill, 2016.
 16. MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE (MMA). Água. Brasília: MMA, 2017. Disponível em: <<http://www.mma.gov.br/agua>>. Acesso em: 15 mai. 2017.
 17. NAKAMURA, C. H.; GRISOTTO, L. E. G.; JESUS, J. A. O.; GALLEGO, C. E. C.; PEREIRA, C. A. A. O.; BITTENCOURT, A. G.; TONSO, E. J. Avaliação dos impactos de ações integradas de saneamento ambiental sobre a qualidade das águas dos mananciais de abastecimento público da Região Metropolitana de São Paulo, Brasil. VI ENCONTRO NACIONAL DA ANPPAS. 2012. Anais. Belém, 2012.
 18. OLIVEIRA, T. A.; PEREIRA, A. A.; SANTOS, M. R.; SILVA, K. C. Mapeamento do uso e ocupação da terra na microbacia do rio Lambari, município de Poços de Caldas – MG. II SIMPÓSIO DE PÓS-GRADUAÇÃO DO IFSULDEMINAS. 2013. Anais. Inconfidentes, 2013.
 19. OPPA, L. F. Utilização de modelo matemático de qualidade da água para análise de alternativas de enquadramento do rio Vacacaí Mirim. Dissertação de mestrado. Universidade Federal de Santa Maria, 2007.
 20. RICE, E.W., BAIRD, R.B., EATON, A.D., CLESCERI, L.S. *Standard methods for examination of water and wastewater*. 2. ed. Denver, CO: AWWA, 2012.
 21. SALLA, M. R.; PEREIRA, C. E.; ALAMY FILHO, J. E.; DE PAULA, L. M.; PINHEIRO, A. M. Estudo da autodepuração do Rio Jordão, localizado na bacia hidrográfica do Rio Dourados. Revista Engenharia Sanitária e Ambiental, v.18, n.2, p.105-114, abr./jun. 2013.
 22. SALLA, M. R.; FERNANDES, L. E.; PEREIRA, C. E.; DA SILVA JHUNIOR, H. C.; DE LIMA, G. *Importance of calibration for mathematical modeling of self-purification of lotic environments*. *Acta Limnologica Brasiliensia*. v.28, 2016.
 23. TONON, K. Modelagem da qualidade da água utilizando os modelos Streeter-Phelps e QUAL-UFMG na bacia do rio Lambari – Poços de Caldas (MG). Dissertação de mestrado. Universidade Federal de Alfenas, 2014.
 24. TUCCI, C.E.M. Modelos hidrológicos. 2. ed. Porto Alegre: Editora da UFRGS, 2005.
 25. VON SPERLING, M. Estudos e modelagem da qualidade da água de rios. Belo Horizonte: Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental; Universidade Federal de Minas Gerais, 2007, 588 p.