

IV-165 – SIMULAÇÃO DA QUALIDADE DA ÁGUA DO RIACHO FUNDO NO DISTRITO FEDERAL, UTILIZANDO O MODELO QUAL2Kw

Jéssica Sousa da Silva⁽¹⁾

Engenheira Civil pelo Centro Universitário do Distrito Federal.

Amanda do Nascimento Ferreira⁽²⁾

Engenheira Civil pelo Centro Universitário do Distrito Federal.

Carlo Renan Cáceres de Brites⁽³⁾

Engenheiro Ambiental pela Universidade Federal de Mato Grosso do Sul. Mestre em Tecnologia Ambiental e Recursos Hídricos pela Universidade de Brasília. Engenheiro da Assessoria de Meio Ambiente e Recursos Hídricos da Companhia de Saneamento Ambiental do Distrito Federal – CAESB. Professor do curso de Engenharia Civil do UDF Centro Universitário.

Sara Ferrigo⁽⁴⁾

Engenheira Agrônoma pela Universidade Federal de Santa Catarina. Mestre em Tecnologia Ambiental e Recursos Hídricos pelo Departamento de Engenharia Civil e Ambiental pela Universidade de Brasília. Doutoranda em Tecnologia Ambiental e Recursos Hídricos pela Universidade de Brasília.

Endereço⁽¹⁾: Quadra 102 Conjunto 7 Casa 8 – Residencial Oeste – São Sebastião – Brasília – DF – CEP: 71692-119 – Brasil – Tel: (61) 3335-4217 – eng.jessicasilva@gmail.com

RESUMO

O foco desta pesquisa foi contribuir na gestão dos recursos hídricos e para o conhecimento da bacia hidrográfica e qualidade da água do Riacho Fundo, um dos afluentes do lago Paranoá, que recebe efluente tratado da Estação de Tratamento de Esgoto do Riacho Fundo. Para o estudo de qualidade da água na bacia hidrográfica foi utilizado no trabalho o modelo matemático QUAL2Kw, que considerou os parâmetros Oxigênio Dissolvido (OD), Demanda Bioquímica de Oxigênio rápida e lenta (DBO_f e DBO_s, respectivamente) no período seco. Para a calibração deles foram utilizados os coeficientes de desoxigenação (K₁), reaeração (K₂) e de decomposição (K_d). O parâmetro que se mostrou melhor calibrado foi OD com concentração média de 6,74 mg/l nos pontos de monitoramento. O valor de DBO rápida média simulada foi 4,69 mg/l. Quanto a DBO lenta, o valor médio simulado foi igual a 2,14 mg/l. Estes valores foram obtidos por meio da vazão regionalizada que, quando comparados com as concentrações encontradas utilizando vazões obtidas com base nos resultados de um modelo hidrológico mostraram-se inferiores para OD, 6,61 mg/l e superiores para DBO_f e DBO_s, 4,72 mg/l e 2,15 mg/l respectivamente. A partir destes valores constatou-se que o Riacho Fundo atende aos requisitos para um corpo d'água Classe 2 segundo a Resolução CONAMA 357/2005.

PALAVRAS-CHAVE: QUAL2Kw, Qualidade da água, Simulação, Modelagem matemática.

INTRODUÇÃO

O crescimento populacional, a industrialização, a expansão da agricultura e as mudanças climáticas, fenômenos inerentes ao desenvolvimento do país, vêm, constante e inevitavelmente contribuindo para o processo de degradação e escassez dos recursos hídricos. Dessa forma, a atual crise hídrica brasileira encara, fundamentalmente, dois obstáculos: a escassez e a qualidade do recurso hídrico.

A fim de compreender melhor o sistema que gerencia os recursos hídricos existem ferramentas que permitem representar de forma simplificada o comportamento de um determinado sistema, fornecendo respostas as diferentes entradas e condições de contorno que possam ocorrer. Essas ferramentas são conhecidas por modelos computacionais.

O QUAL2Kw consiste em uma ferramenta que, através da utilização de modelos matemáticos e dados medidos em laboratório ou obtidos da literatura, permite simular condições reais de fontes poluidoras e a interação dos sistemas ambientais com as mesmas (Tosta e Mendonça, 1997). Este tipo de modelo permite compreender a dinâmica dos cursos d'água, determinar pontualmente os parâmetros de qualidade de água e a sua variação em função das fontes poluidoras.

OBJETIVOS

- Simular cenário calibrado no QUAL2Kw utilizando dados secundários e vazão regionalizada;
- Simular cenário utilizando os dados de vazão gerados por modelo hidrológico com a estação de tratamento de esgoto Riacho Fundo operando na bacia;
- Simular cenário utilizando os dados de vazão gerados por modelo hidrológico desconsiderando o lançamento de esgoto no corpo d'água.

DESCRIÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO

A área de estudo desse trabalho foi a Bacia Hidrográfica do Riacho Fundo cobre uma área de aproximadamente 200 km² e está completamente situada dentro do Distrito Federal, compreendendo as regiões administrativas do Riacho Fundo, Núcleo Bandeirantes, Guará, Candangolândia, Mansões Park Way e Águas Claras, além do Setor de Indústria e de Abastecimento e áreas de atividade agrícola.

A bacia do Riacho Fundo apresenta uma área predominantemente ocupada por atividades antrópicas, sendo cerca de 5% desta correspondem ao uso agrícola. A maior parte corresponde à áreas urbanas, ocupando mais de 60% do território. Dentro da bacia encontram-se também porções de áreas verdes, que incluem: cerrado, formação florestal e campestre e reflorestamento, as quais recobrem cerca de 20% da bacia. A figura 1 mostra a distribuição de usos do solo na bacia em estudo.

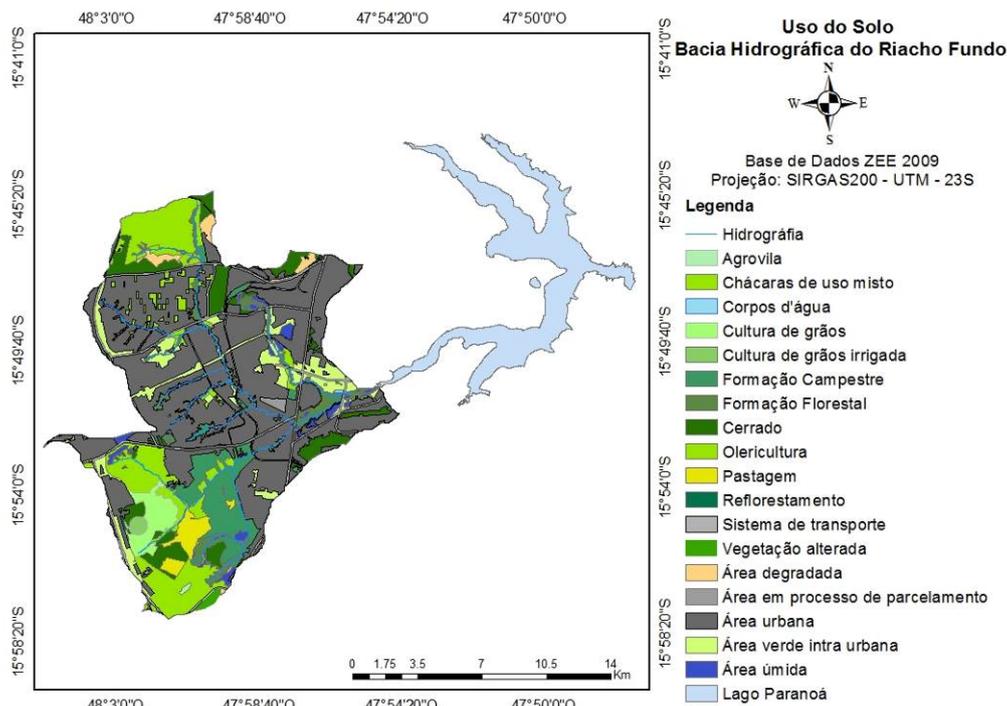


Figura 1- Mapa de uso e ocupação do solo na bacia hidrográfica Riacho Fundo.

Para a análise dos dados de qualidade da água optou-se por trabalhar com o corpo d'água do Riacho Fundo devido a sua contribuição para diluir efluentes provenientes da ETE do Riacho Fundo e águas pluviais. Além destas contribuições diretas deve-se lembrar de que ele é um afluente direto do Lago Paranoá, que é previsto por parte da CAESB como fonte de captação de água com finalidade de abastecimento público.

O Riacho Fundo possui quatro afluentes principais: Açudinho, Coqueiros, Vicente Pires e Guará. Segundo dados do PGRH/DF de 2012, a vazão média do corpo d'água é de 3,17m³/s, a vazão Q90 1,79m³/s e a vazão mínima Q7,10 verificada foi 0,93m³/s.

A ETE presente do corpo d'água do Riacho Fundo foi projetada para tratar os esgotos domésticos da localidade Riacho Fundo I, com uma capacidade de 94 l/s para atender a uma população de 40.000 habitantes, aproximadamente.

ORGANIZAÇÃO DOS DADOS DE ENTRADA

Os dados de entrada para o QUAL2Kw foram obtidos por meio de referências bibliográficas, bancos de dados da CAESB e ainda utilizou-se do ambiente de geoprocessamento fornecidos pelo ZEE para confecção dos mapas.

Para auxiliar no processo de calibração dos modelos e interpretação de resultados, utilizaram-se os pontos de monitoramento da CAESB no Riacho Fundo como referência, pois eles já levam em consideração as confluências, contribuições, captações e despejos ao longo do curso d'água.

O monitoramento da qualidade das águas superficiais da região é feito pela CAESB e ADASA, sendo responsáveis por 43 pontos de amostragem com o monitoramento de 19 parâmetros em corpos receptores. A CAESB possui cinco pontos de monitoramento ao longo do Riacho Fundo, descritos na Tabela 1. A Figura 2 apresenta a localização dos pontos ao longo do corpo hídrico.

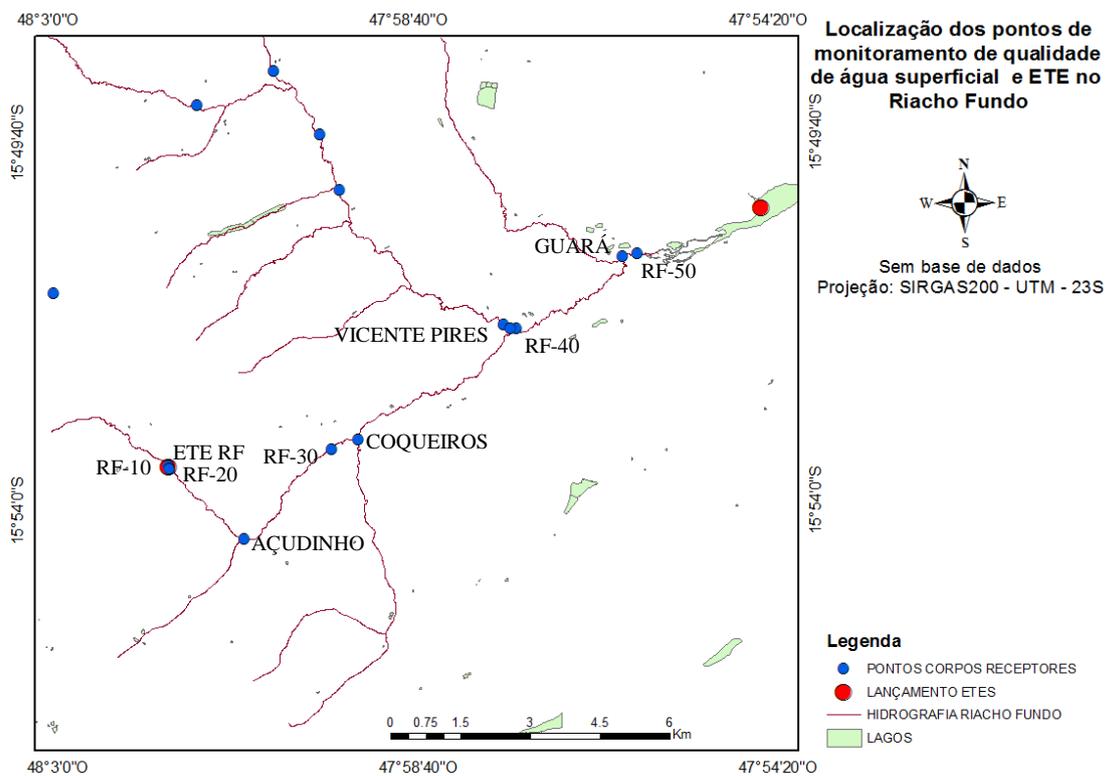


Figura 2- Mapa de localização dos pontos de monitoramento de qualidade de água superficial no Riacho Fundo.

Tabela 1 - Pontos de monitoramento da CAESB no Riacho Fundo (PGIRH/DF, 2012)

PONTOS DE MONITORAMENTO	POSIÇÃO (km)	LOCALIZAÇÃO DOS PONTOS
RF10	3.25	Montante da GAP do Riacho Fundo I e jusante da GAP do setor CSG de Taguatinga próximo a ETE Riacho Fundo
ETE	3.29	Entre os pontos RF-10 e RF-20, distante aproximadamente 40 metros de cada.
RF20	3.33	Jusante da ETE Riacho Fundo
RF30	8.93	Montante da confluência do Córrego Coqueiro
RF40	16.47	Após a confluência do Riacho Fundo com o Córrego Vicente Pires (antigo RF02)
RF50	20.89	Jusante da confluência do Riacho Fundo com o Córrego Guará; próximo à sua foz no Lago Paranoá (antigo RF03)

O ponto RF-10 definiu as características de qualidade da água para a cabeceira do Riacho Fundo, visto que não foi relatada nenhuma fonte poluente significativa a montante deste ponto. Os demais pontos foram usados para calibração do QUAL2Kw.

O comprimento total do Riacho Fundo é aproximadamente 21 quilômetros. O trecho simulado no QUAL2Kw possui 17,64 km de extensão, sendo que os primeiros 3,25 km correspondem a área de cabeceira a montante do ponto RF-10.

Buscando melhorar a representação nos gráficos gerados pelo programa, optou-se por dividir o Riacho Fundo em trechos de aproximadamente 100 metros, gerando um total de 159 trechos. Alguns trechos, como a montante e a jusante da ETE ficaram com 40 metros, devido a presença dos pontos RF-10 e RF-20. Os trechos foram particionados usando o software ArcMap a fim de facilitar a identificação das características do terreno como: distância do trecho em relação ao comprimento total simulado, elevação do trecho, latitude, longitude e declividade do canal.

ESTAÇÃO DE TRATAMENTO DE ESGOTO DO RIACHO FUNDO

A Estação de Tratamento de Esgoto do Riacho Fundo localiza-se aproximadamente no quilômetro 3,29 do Riacho Fundo. Foi projetada para a vazão de 94l/s, mas atualmente opera com a média anual de 47l/s. Contudo para a simulação de qualidade da água, a vazão utilizada foi a média para os períodos da seca, 43,20l/s.

Os dados de monitoramento da ETE Riacho Fundo que foram utilizados como dados de entrada do modelo são apresentados na Tabela 2 são: vazão, DBO5, nitrogênio de Kjeldahl (NTK), fósforo total (PT) e coliformes termotolerantes (CT).

Tabela 2- Valores referentes à eficiência do tratamento na ETE Riacho Fundo.

	Vazão (m³/s)	DBO5 (mg/L)	NTK (mg/L)	PT (mg/L)	CT (NMP/100ml)
Efluente	0.0432	20.1223	19.2171	0.8123	391272.6496
Afluente			60.0147	8.1522	

A tabela 2 apresenta valores de NTK e PT para o afluente da ETE, pois foi necessário fazer estimativas de valores para nitrogênio orgânico (Norg), amônia, fósforo orgânico e inorgânico (Porg e Pinorg, respectivamente) partindo das concentrações destes e aplicando a eficiência de remoção média da ETE no

período da seca para estes nutrientes, já que os dois softwares utilizam suas formas particionadas nas simulações.

Os valores apresentados na Tabela 3 foram calculados com base em proporção sugerida por Sperling (2007), que indica que 60% da concentração de nitrogênio total correspondem a NH₃ e 40% são de Norg. Nitrito e nitrato não são encontrados em quantidades significativas de esgoto bruto. Sperling trás ainda a eficiência de remoção de amônia no sistema de tratamento por lodos ativados – batelada que é >80%, o que tornou possível o cálculo da concentração de Norg no efluente da ETE.

Para o nutriente fósforo orgânico considerou-se a concentração igual a 0 mg/l pois no ciclo de processos do fósforo o Porg particulado sedimenta, converte-se a Pinorg dissolvido e o sedimento de fundo libera fósforo inorgânico.

Tabela 3- Concentração final de nutrientes do efluente tratado.

Nutriente	Eficiência de remoção (%)	Concentração final (mg/l)
Amônia	>80	7.20
Norg	-	13.20
NTK	66	20.40
Pinorg	-	0.81
Porg	-	0.00
Ptotal	90.18	0.81

CARACTERÍSTICAS HIDRÁULICAS

O modelo QUAL2Kw necessita das características hidráulicas como as dimensões da seção transversal dos trechos, além da velocidade e vazão. As condições de escoamento do ambiente modelado foram calculadas através de dados disponibilizados pelo software HIDRO utilizando o banco de dados da ANA para as estações fluviométricas 60478200 e 60478400 e introduzidas no modelo.

Tabela 4- Resumo de valores médios para as características hidráulicas.

Estação	Largura (m)	Profundidade (m)	Vazão Q90 (m ³ /s)	Área molhada (m ²)	Velocidade (m/s)	Declividade lateral (m/m)
60478200	8.457	0.668	1.470	5.440	0.417	-0.587
60478400	14.691	0.583	1.390	8.560	0.319	

Devido à falta de dados para caracterização de todos os trechos, fez-se a seguinte consideração: para trechos a montante do ponto RF-40 utilizou-se as características da estação 60478200, já para os trechos a jusante deste ponto a caracterização foi feita baseada nos dados da estação 60478400.

Para utilizar os valores disponibilizados foi calculada a média para o período seco da largura, da profundidade, da área molhada e da velocidade. Para a vazão utilizou-se a vazão de referência Q90 por ser muito utilizada por órgãos ambientais em avaliação de impacto ambiental e atendimento a legislação.

Para simulação com o QUAL2Kw é necessário quantificar a vazão dos tributários do curso d'água e vazão de cabeceira. Na Tabela 6 seguem as informações de localização das confluências com os quatro afluentes do Riacho Fundo: Açudinho, Coqueiros, Vicente Pires e Guará.

Tabela 5 - Vazão regionalizada para cabeceira e tributários.

Ponto	Localização (km)	Vazão (m ³ /s)
Cabeceira (RF-10)	3.25	0.0996
Açudinho	5.74	0.1288
Coqueiros	9.67	0.7521
Vicente Pires	16.34	0.1846
Guará	20.50	0.1685

Como não existem dados de vazão para estes pontos, os valores especificados na Tabela 6 foram calculados de forma regionalizada utilizando os dados da estação fluviométrica 60477700 localizada na bacia do Vicente Pires, eles será utilizados no cenário 1 deste trabalho. Ela foi escolhida por ser a estação mais próxima de uma cabeceira na região estudada.

A vazão de referência Q90 medida na estação é 0.243 m³/s, a fim de medir a vazão específica dividiu-se por 27,83 km², que representa a área drenada pelo trecho a montante da estação. A vazão específica calculada foi 0,0087 m³/s/km² e partir dela foram calculados os valores da Tabela 5.

Para os cenários 2 e 3 foram utilizadas as vazões obtidas com o modelo hidrológico SWAT, simuladas por Ferreira e Silva (2016). Estes valores são apresentados na tabela 6.

Tabela 6 - Diferença entre vazão (m³/s) regionalizada e simulada pelo SWAT.

Ponto	Vazão SWAT (m ³ /s)
Cabeceira (RF-10)	0.0948
Açudinho	0.1328
Coqueiros	0.3135
Vicente Pires	0.4455
Guará	0.1441

O QUAL2Kw é um modelo matemático que não incrementa automaticamente a vazão ao longo do curso d'água. Para incrementar manualmente a vazão utilizou-se a aba de cargas difusas do modelo, que possui o limite de 50 trechos para esses dados. A área de drenagem foi calculada utilizando o trecho a montante dos pontos indicados na Tabela 7.

Tabela 7. - Vazão incrementada manualmente

Ponto	Área de drenagem (km ²)	Vazão específica (m ³ /s/km ²)	Vazão regionalizada (m ³ /s)	Comprimento trecho (km)	Número de trechos	Vazão por trecho (m ³ /s)
ETE	0.69	0.0087	0.0060	0.04	1.00	0.0060
RF20	0.69		0.0060	0.04	1.00	0.0060
Açudinho	8.62		0.0750	2.41	7.00	0.0107
RF30	7.82		0.0680	3.10	9.00	0.0076
Coqueiros	0.83		0.0072	0.74	3.00	0.0024
Vicente Pires	11.96		0.1041	4.87	14.00	0.0074
RF40	0.07		0.0006	0.13	1.00	0.0006
Guará	12.49		0.1087	4.02	12.00	0.0091
RF50	2.10		0.0183	0.39	2.00	0.0091

CARACTERÍSTICAS FÍSICO-QUÍMICAS

O QUAL2Kw foi elaborado baseado nos dados de qualidade que são monitorados em outros países, logo, alguns destes parâmetros não fazem parte da rotina de monitoramento do Brasil, então foram deixados em branco os dados: sólidos inorgânicos, nitrogênio orgânico, íon amônio, fósforo orgânico e inorgânico, fitoplâncton e matéria orgânica particulada. Neste trabalho foram utilizados para a modelagem os seguintes parâmetros: temperatura, condutividade, oxigênio dissolvido, DBO5, DBOu, nitrato (NO₃) e coliformes totais. Os valores referentes a alcalinidade não são monitorados, contudo o programa automaticamente insere 100mgCaCO₃/l para os pontos de estudo.

Para obter valores referentes aos parâmetros físico-químicos utilizados pelo QUAL2Kw, utilizou-se a média dos dados disponibilizados pela CAESB no período da seca para os pontos de monitoramento RF-10, RF-20, RF-30, RF-40 e RF-50, apresentados na tabela 8.

Tabela 8- Valores referentes ao monitoramento da CAESB no Riacho Fundo.

Estação	Temperatura água (°C)	Temperatura ar (°C)	pH	Condutividade (us/cm)	OD (mg/L)	DBO5 (mg/L)	NO ₃ (mg/L)	E. Coli (NMP/100mL)
RF-10	18.52	21.62	6.74	49.18	7.11	3.63	0.62	609.33
RF-20	18.98	21.32	7.00	234.49	6.62	17.27	1.17	21274.67
RF-30	18.49	22.00	7.10	88.23	6.95	10.80	0.84	3245.08
RF-40	18.88	23.76	7.30	93.18	7.40	3.70	1.10	27970.71
RF-50	18.93	22.73	7.38	94.11	7.29	3.36	1.16	20583.58

Quanto aos afluentes, que não são monitorados, foi necessário considerar para eles os limites estabelecidos pela resolução 357/2005 do CONAMA para corpos d'água Classe 2.

SIMULAÇÃO

Neste trabalho o QUAL2Kw foi utilizado para avaliar a qualidade da água do Riacho Fundo a partir dos parâmetros medidos pela CAESB e simulações de cenários utilizando dados de vazão provenientes do SWAT apresentados no trabalho de Ferreira e Silva (2016).

O primeiro cenário gerado com o QUAL2Kw neste trabalho apresenta as condições de qualidade da água utilizando como dado de entrada as vazões regionalizadas a partir de uma estação fluviométrica.

A partir dos dados calibrados no cenário 1 e vazões obtidas pelo SWAT por Ferreira e Silva (2016) foram gerados os cenários 2 e 3 no QUAL2Kw.

O cenário 2 possui como principais características os dados de vazão para cabeceira e tributários simulados pelo SWAT e além de manter a vazão da ETE.

No cenário 5 foram simuladas as condições de qualidade da água para o Riacho Fundo ainda com as vazões fornecidas pelo SWAT, porém com o diferencial de considerar a ETE desativada, logo, não há mais descarga de esgoto no corpo d'água.

O QUAL2Kw exigiu condições de contorno essenciais para a modelagem, sendo elas:

- O modelo considera uma mistura completa no rio vertical e lateralmente e o escoamento unidimensional;
- Além dos parâmetros mensurados, o modelo possui outros necessários para apresentação de resultados. Devido a impossibilidade de obtenção desses parâmetros, foram usados os manuais teóricos e do usuário do QUAL2Kw para aquisição de valores recomendados;
- Não foi possível fazer a caracterização da seção transversal no corpo d'água, então foi necessário considerar que o rio era composto de uma seção trapezoidal com dimensões fixas calculadas a partir de dados disponibilizados nas estações fluviométricas supracitadas;
- Os compostos de fósforo e nitrogênio não são monitorados, logo, foi necessário fazer uma estimativa baseada na eficiência de remoção de uma ETE de lodos ativados por batelada;
- Como nem todos os afluentes possuem monitoramento foi necessário regionalizar a vazão destes a partir do que foi medido na estação fluviométrica Vicente Pires montante e para os dados de qualidade da água, utilizou-se os valores limites estabelecidos pela Resolução 357/2005 do CONAMA para corpos d'água de classe dois;
- Não foi possível encontrar valores para a declividade do canal, logo, esta foi estimada baseada na diferença de cotas, calculadas usando as curvas de nível.

A fim de melhor compreender o processo de funcionamento do QUAL2Kw neste trabalho, na figura 3 encontra-se o fluxograma dos processos executados.

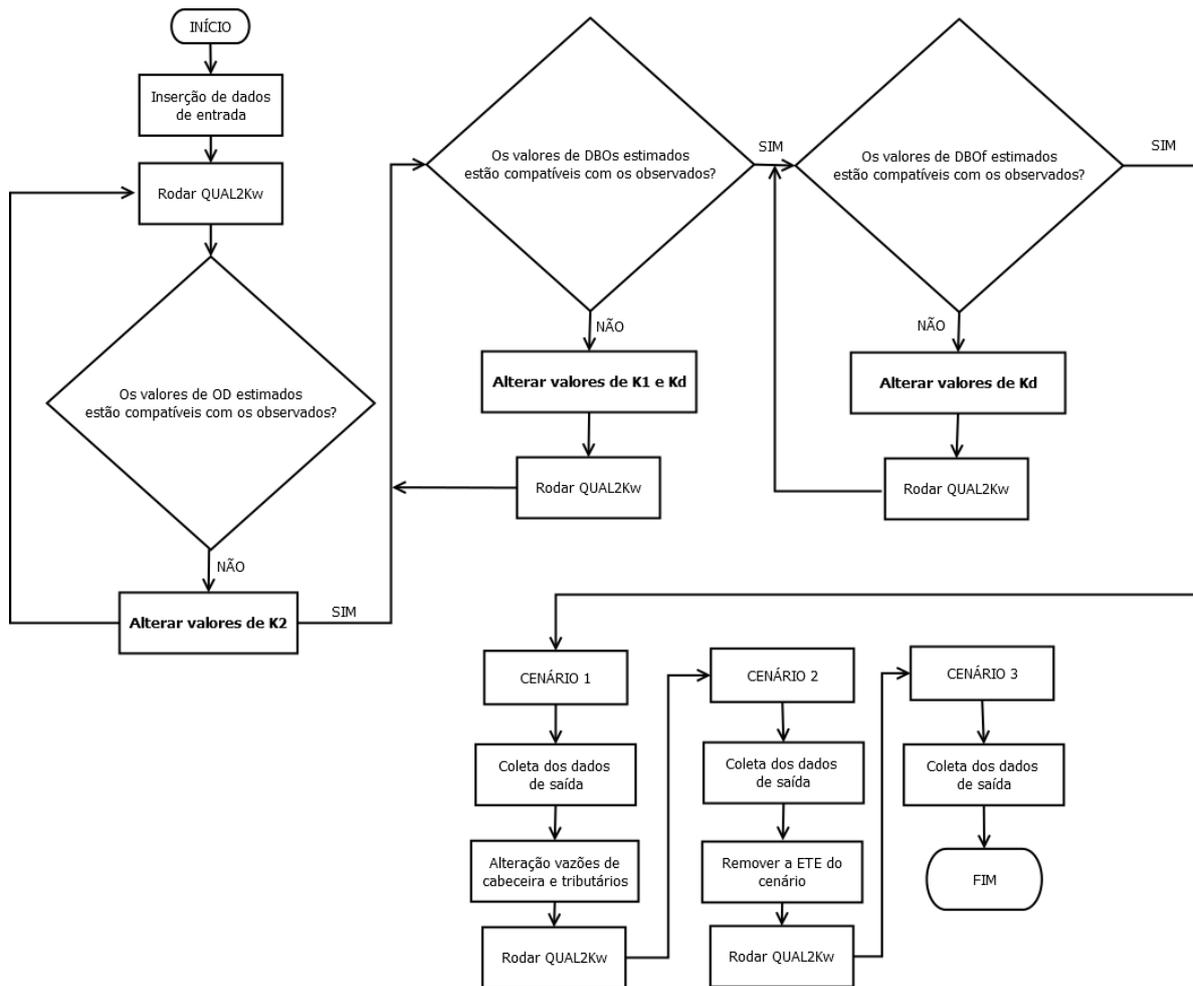


Figura 3 - Fluxograma do processo de simulação no QUAL2Kw.

As fases destacadas em negrito evidenciam as etapas que envolveram a calibração do modelo, onde os coeficientes foram alterados manualmente um por vez a fim de verificar a sensibilidade do modelo a cada um deles até que os parâmetros analisados estivessem próximos aos valores medidos. Esta etapa foi detalhada em **CALIBRAÇÃO**.

Os dados de saída coletados citados no fluxograma são apresentados no item RESULTADOS. Foi possível calibrar para este trabalho os parâmetros oxigênio dissolvido, DBO rápida e DBO lenta.

ANÁLISE DE SENSIBILIDADE E CALIBRAÇÃO

Em geral, os modelos numéricos apresentam um número muito elevado de taxas, coeficientes e variáveis, porém, muitos não apresentam uma influência significativa nos resultados. Através da análise de sensibilidade, podem-se identificar as variáveis mais sensíveis, permitindo assim reduzir o número dos coeficientes de calibração para apenas os que realmente influenciam nos resultados do modelo.

Para este estudo foram levados em consideração os seguintes coeficientes: desoxigenação, decomposição e reaeração, que foram alterados manualmente a partir da avaliação da mudança nos resultados de OD, DBOs e DBOF em decorrência da alteração de K2, K1 e Kd.

No que se refere ao coeficiente de reaeração, K2, foram gerados gráficos de dispersão vazão x velocidade e vazão x profundidade, que através da linha de tendência forneceram equações para permitir o cálculo do coeficiente usando a fórmula de O'Connor e Dobbins apud Sperling (2007).

Os valores obtidos através da fórmula facilitaram a calibração por fornecerem um ponto de partida muito próximo ao real, minimizando os esforços na calibração.

O modelo não se mostrou sensível aos diferentes valores do coeficiente de desoxigenação, K1, então adotou-se um valor de referência baseado na bibliografia.

Quanto aos valores de Kd o programa dispõe de espaço para o coeficiente na DBO rápida e na lenta. A primeira a ser calibrada foi a DBO lenta (DBOs). Os valores iniciais foram estimados baseados em intervalos propostos por Sperling (2007), contudo, estes se mostraram baixos, então os valores foram aumentados em 0,1/dia até encontrar valores satisfatórios dos parâmetros nos pontos de referência.

APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS OBTIDOS

CALIBRAÇÃO

Baseados nos dados das estações fluviométricas do Riacho Fundo foram encontrados valores de K2 calibrados, apresentados na tabela 9.

Tabela 9 - Valores de K2 para diferentes trechos.

Trecho	K2/dia
1 - 27	7
28 - 59	5.5
59 - 129	7
129 - 159	2

No trecho 1, imediatamente após a ETE, nenhum valor de K2 foi suficientemente para causar mudanças nos valores de OD do trecho, logo, adotou-se o mesmo valor adotado dos trechos 2 a 27.

O modelo não se mostrou sensível aos diferentes valores do coeficiente de desoxigenação, K1, então se adotou o valor 0.19/dia, valor médio do intervalo 0.12 – 0.24 /dia proposto por Sperling (2007).

Na calibração da DBO lenta (DBOs) notou-se que os pontos RF-20 e RF-30 não respondiam às mudanças nos valores de Kd, o que impossibilitou uma boa representatividade do modelo para este parâmetro.

Ao fim da calibração de DBOs notou-se que os valores de DBO rápida (DBOf) estavam próximos aos reais, logo, não demandaram grandes esforços na obtenção dos valores. A tabela 10 apresenta os valores de Kd para os trechos simulados.

Tabela 10- Valores de Kd para DBOs e DBOf.

Trecho	Kd/dia DBOs	Kd/dia DBOf
1 - 58	0.3	0.5
59 - 117	0.25	0.5
118 - 159	0.2	0.5

Para análise dos erros de calibração utilizou-se três métodos estatísticos: Nash, o coeficiente de determinação R^2 e erro padrão (EP). Eles auxiliaram na avaliação da representatividade do modelo calibrado em relação à situação real da bacia. A Tabela 11 apresenta os valores de cada método estatístico para calibração de OD, DBOs e DBOf.

Tabela 11 - Parâmetros e seus respectivos coeficientes estatísticos.

Parâmetro	Nash	R^2	EP
Valores ideais	>0	$\cong 1$	$\cong 0$
OD	-2.82	0.84	0.6
DBOs	-0.05	0.79	5.86
DBOf	-0.06	0.77	2.71

É possível notar que o coeficiente de Nash não se mostrou adequado na calibração do modelo QUAL2Kw para o Riacho Fundo, visto que a série de dados é espacial e não temporal e uma diferença muito grande entre valores observados e simulados em apenas um ponto, como no caso de OD, é o suficiente para retorno de valores negativos.

O coeficiente de determinação R^2 reflete um comportamento satisfatório da série simulada em comparação à observada, pois valores aceitáveis para este coeficiente estão acima de 0,5, que é o caso deste trabalho.

O erro padrão também se mostrou adequado para o presente estudo, visto que os valores mais altos foram causados por problemas na simulação, que não retornava resposta em dois pontos de calibração de DBOs e DBOf.

A fim de mostrar os resultados da calibração nos pontos que o modelo respondeu às alterações dos coeficientes, na Tabela 12 estão indicados os outros valores de Nash, R^2 e EP se desconsiderados os valores do ponto RF-20 da calibração de OD e os pontos RF-20 e RF-30 da calibração da DBO.

Tabela 12 - Parâmetros e seus respectivos coeficientes estatísticos considerando apenas os pontos efetivamente calibrados.

Parâmetro	Nash	R^2	EP
Valores ideais	>0	$\cong 1$	$\cong 0$
OD	0.93	1	0.06
DBOs	1	1	0.01
DBOf	1	1	0.03

OXIGÊNIO DISSOLVIDO

CENÁRIO 1

Após a calibração dos dados de saída do modelo foi possível gerar gráficos que representam aproximadamente a situação do cenário atual da bacia e com os resultados obtidos notou-se que o ponto RF-20 encontra-se pouco representativo da realidade, como pode ser visto na tabela 13. Tal característica foi atribuída à proximidade entre ele e o lançamento da ETE (0.04km) e ainda ao curto trecho simulado a jusante deste ponto, que corresponde a apenas 0.08 km.

Tabela 13 - Comparação entre concentrações de OD observadas e simuladas.

Ponto	k2/d	ODobs(mgO2/L)	ODest(mgO2/L)
RF20	7.0	6.62	5.43
RF30	5.5	6.95	6.98
RF40	7.0	7.40	7.31
RF50	2.0	7.29	7.24

As regiões onde há o decréscimo da concentração de OD no gráfico da figura 4 indicam os pontos onde ocorrem as confluências com os tributários do Riacho Fundo.

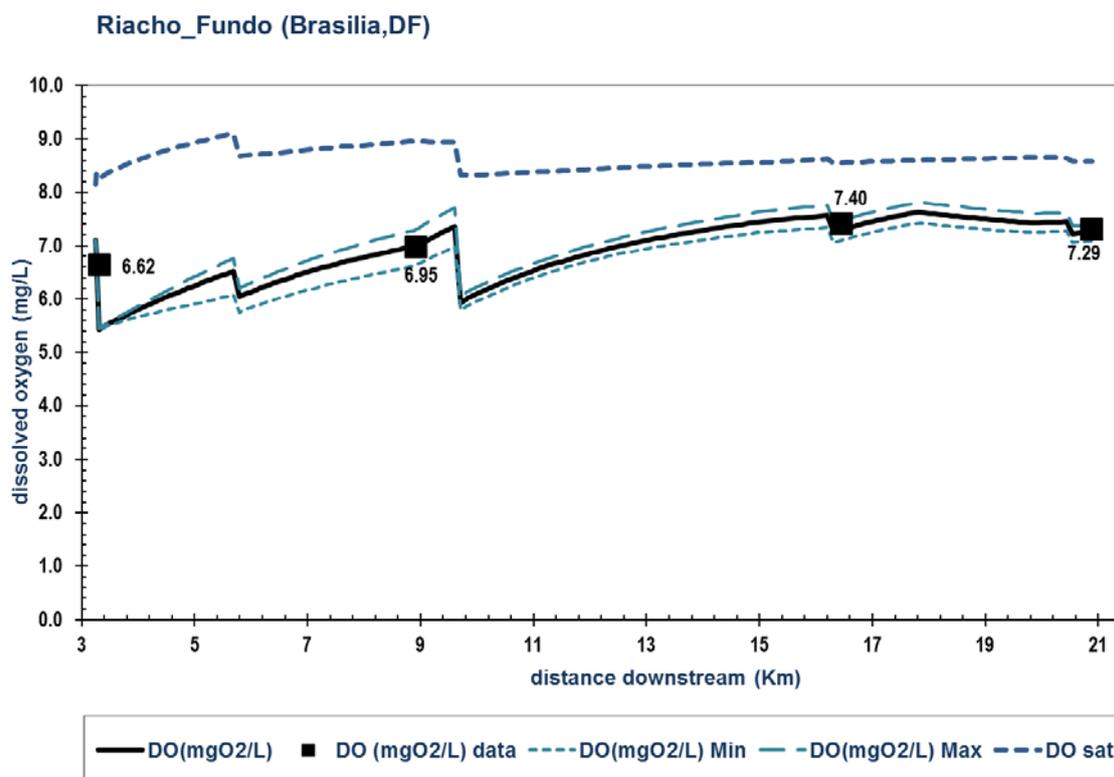


Figura 4 - Gráfico das concentrações de Oxigênio Dissolvido (OD) no cenário 3.

O gráfico indica ainda que a reaeração no Riacho Fundo é muito boa, visto que mesmo após o lançamento do efluente da ETE ele mantém quase estável a concentração de oxigênio dissolvido. Destaca-se ainda que em nenhum ponto a concentração ultrapassa o limite mínimo de OD estabelecido pela Resolução 357/2005 do CONAMA, 5mg/l.

CENÁRIO 2

No cenário utilizando as vazões simuladas no SWAT obtidos por Ferreira e Silva (2016), as concentrações de OD mostraram-se inferiores às simuladas no cenário 1, como indica a figura 5.

Tal resultado se justifica pelo fato que não foram alterados os padrões de qualidade da cabeceira nem dos tributários, mas houve queda nas vazões de três pontos que pode ter piorado a situação da qualidade da água do corpo d'água como um todo.

Riacho_Fundo(Brasilia,DF) (11/8/2016)

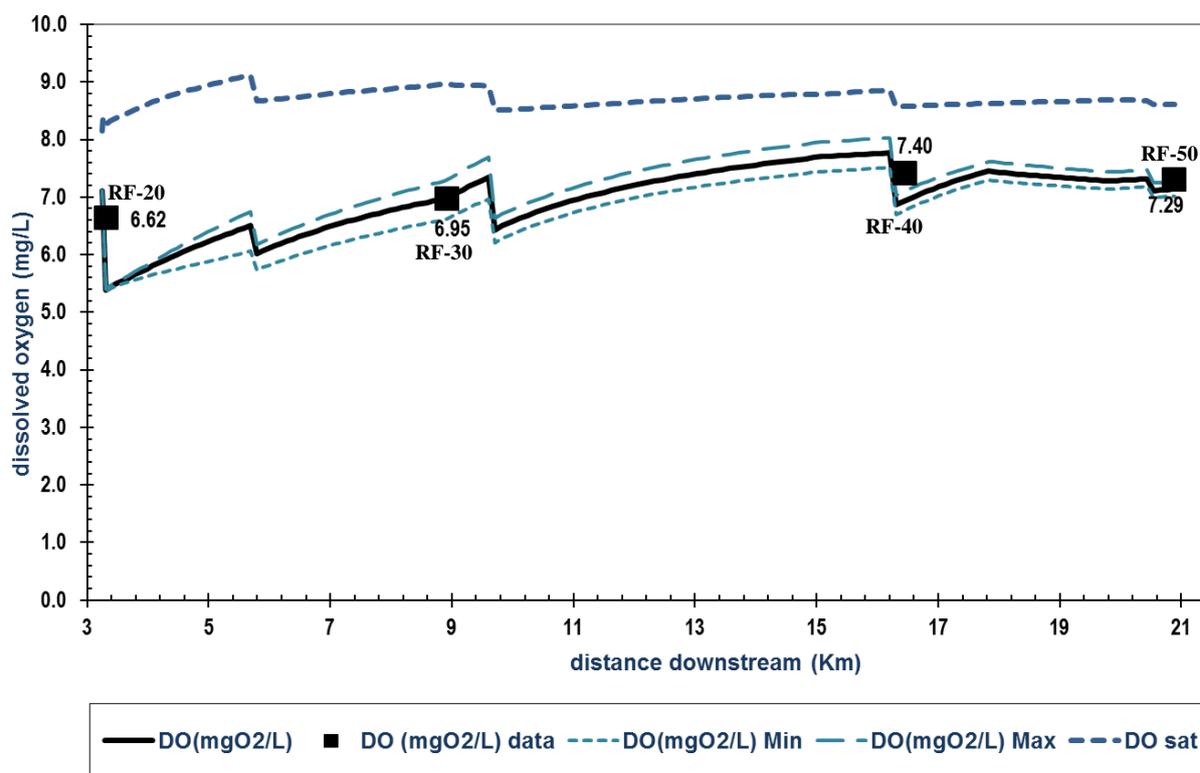


Figura 5- Concentrações de OD utilizando dados de vazão simulados pelo SWAT.

O aumento da vazão do Vicente Pires, mostrado na Tabela 14, foi o que mais contribuiu para a diferença na comparação entre OD observado e OD simulado da Tabela 15.

Tabela 14 - Diferença entre vazão (m³/s) regionalizada e simulada pelo SWAT.

Ponto	Vazão regionalizada (m ³ /s)	Vazão SWAT (m ³ /s)	Diferença entre vazões
Cabeceira (RF-10)	0.0996	0.0948	-0.0048
Açudinho	0.1288	0.1328	0.0040
Coqueiros	0.7521	0.3135	-0.4386
Vicente Pires	0.1846	0.4455	0.2609
Guará	0.1685	0.1441	-0.0244

Tabela 15 - Comparação entre valores de OD medidos, simulados com a vazão do SWAT e simulados com a vazão regionalizada.

Ponto	DOobs(mgO ₂ /L)	DO est SWAT(mgO ₂ /L)	DO est Q2Kw(mgO ₂ /L)
RF20	6.62	5.38	5.43
RF30	6.95	6.97	6.98
RF40	7.4	6.97	7.31
RF50	7.29	7.13	7.24

CENÁRIO 3

Neste cenário a ETE foi considerada desativada, logo não há mais o aporte de seus nutrientes no curso d'água. Na Tabela 16 os dados foram comparados com o cenário 2 a fim de verificar quais as alterações na qualidade da água do Riacho Fundo em função da mudança.

Tabela 16 – Comparação de concentrações de OD simulado utilizando vazão do SWAT com a ETE e sem ETE.

Ponto	x(km)	ODest c. ETE (mgO ₂ /L)	ODest s. ETE (mgO ₂ /L)
RF20	3.33	5.38	6.65
RF30	8.93	6.97	7.12
RF40	16.47	6.97	6.97
RF50	20.89	7.13	7.16

Como era esperado, após a retirada da ETE houve mudanças nas concentrações de OD, que podem ser avaliadas também através da Figura 6. A maior delas no ponto RF-20, que não havia se alterado significativamente nas simulações anteriores. Nos pontos mais a jusante de onde anteriormente havia a ETE Riacho Fundo as alterações não se mostraram relevantes.

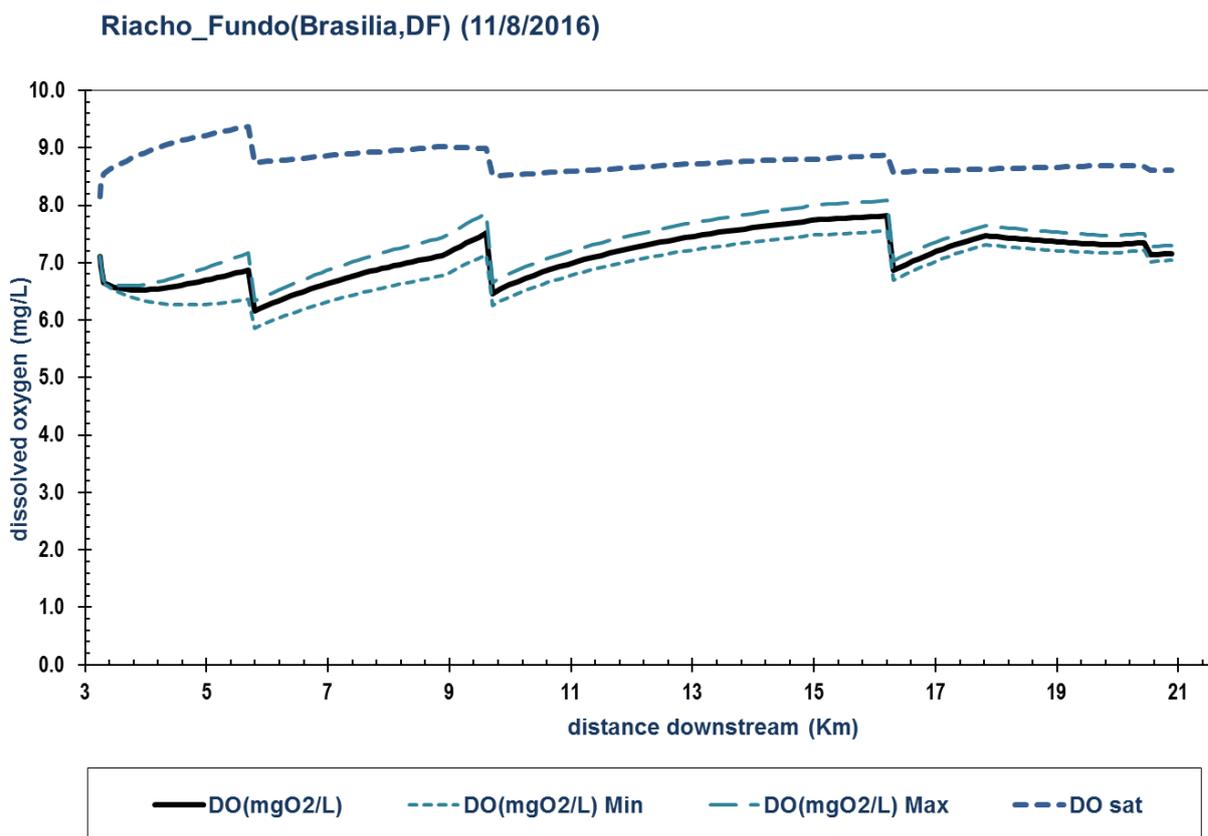


Figura 6 – Gráfico das concentrações de OD simulado utilizando vazão do SWAT com a ETE desativada.

DEMANDA BIOQUÍMICA DE OXIGÊNIO RÁPIDA E LENTA

CENÁRIO 1

A partir dos valores apresentados na Tabela 17 pode-se concluir que a calibração não foi bem sucedida nos trechos iniciais da simulação. Acredita-se que os valores mais elevados de DBO apresentados na Figura 7 possam estar ocorrendo devido à presença de fontes poluentes desconhecidas que elevam o aporte de matéria orgânica no corpo d'água.

Tabela 17 - Comparação entre concentrações de DBO_f observadas e simuladas com vazão de referência.

Ponto	kd/d	DBOf obs(mgO ₂ /L)	DBOf est(mgO ₂ /L)
RF20	0.5	17.27	7.84
RF30		10.8	3.84
RF40		3.7	3.74
RF50		3.36	3.35

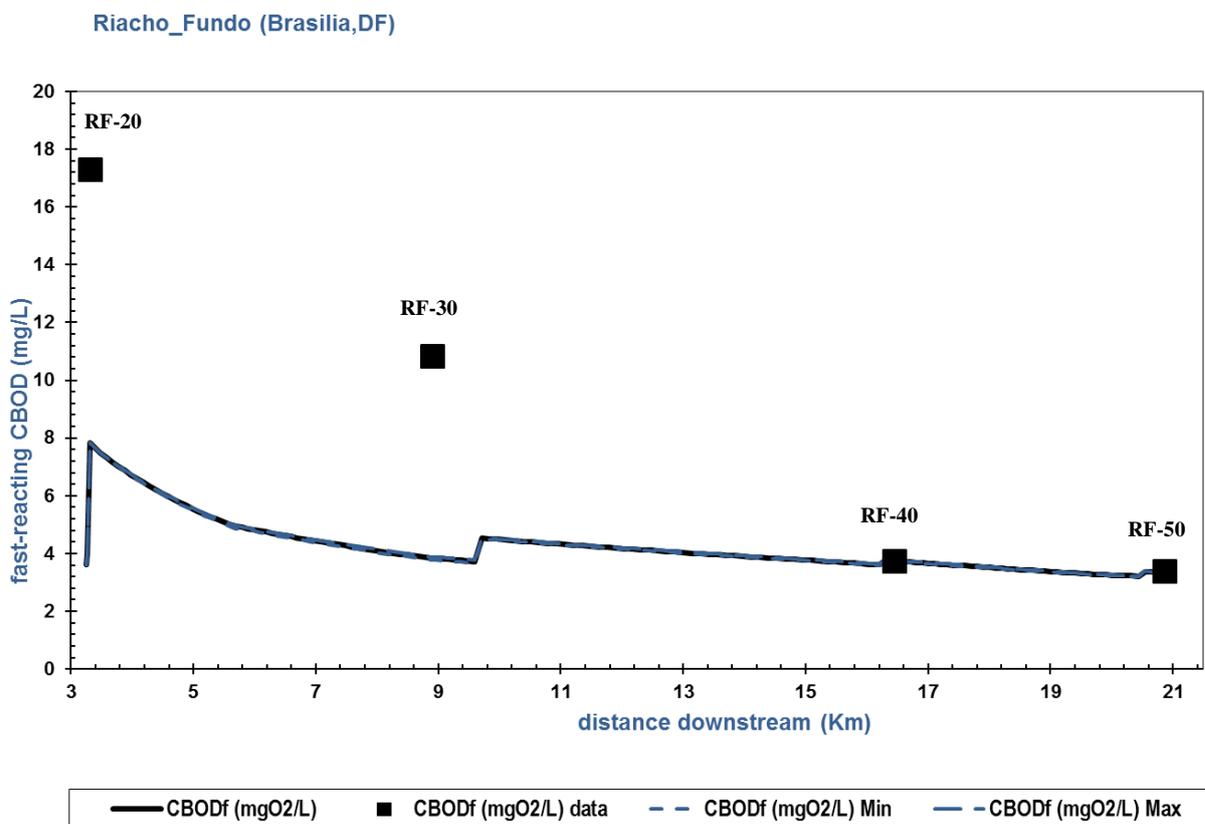


Figura 7- Gráfico da DBO_f ao longo do Riacho Fundo.

Além disso, o gráfico mostra que entre o quilômetro 3.33 e o 5.48 o Riacho Fundo ultrapassa os limites estabelecidos para corpos d'água classe 2, com a DBO_f acima de 5mg/l. Contudo, a Resolução CONAMA 357/05 dá a flexibilidade de que os limites em corpos d'água classes 2 e 3 poderão ser elevados, desde que o estudo da capacidade de autodepuração demonstre que as concentrações mínimas de OD previstas não serão desobedecidas, nas condições de vazão de referência.

Tal flexibilidade se aplica ao Riacho Fundo, pois como visto no item anterior, as concentrações de OD são satisfatórias ao longo de todo o trecho.

A DBO lenta do Riacho Fundo representada na Figura 8 possui o mesmo comportamento da DBO_f, inclusive na calibração, que não foi satisfatória nos dois primeiros pontos.

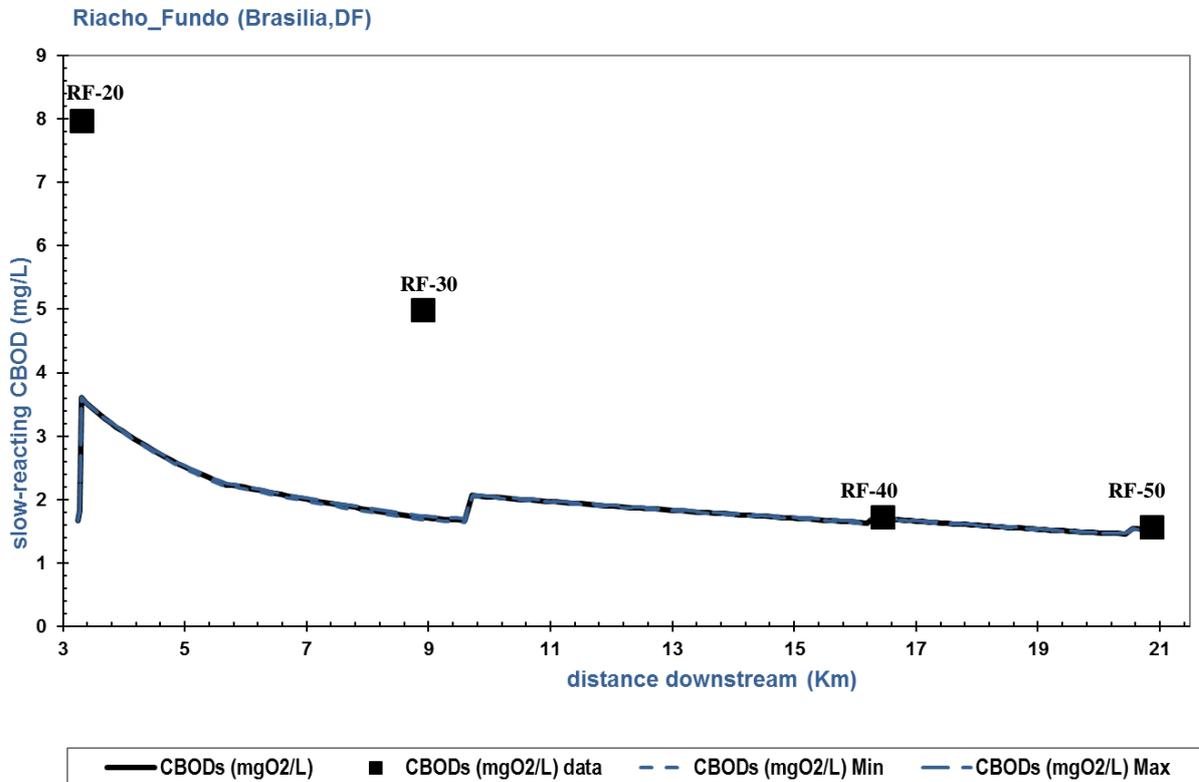


Figura 8- Gráfico dos valores para DBOs ao longo do curso d'água simulados com vazão de referência.

Como os valores da DBOs dependem diretamente dos valores da DBO_f a justificativa para concentrações mais elevadas no RF-10 e RF-20, apresentadas na tabela 18, é a mesma, atribuindo-as a existência de cargas poluentes desconhecidas.

Tabela 18- Comparação entre concentrações de DBOs observadas e simuladas com vazão de referência.

Ponto	kd/d	DBOs obs (mgO ₂ /L)	DBOs est (mgO ₂ /L)
RF20	0.3	7.94	3.61
RF30	0.25	4.97	1.72
RF40	0.25	1.7	1.7
RF50	0.2	1.55	1.53

CENÁRIO 2

A partir dos dados apresentados pelos gráficos nas figuras 9 e 10 e pelas tabelas 19 e 20 percebe-se que não houve alterações significativas na demanda por oxigênio com a mudança nas vazões. Isso pode indicar que os tributários pouco interferem na DBO, pois mesmo com o incremento significativo de vazão no Vicente Pires os valores DBOs e DBO_f nos pontos calibrados não sofreram grandes acréscimos.

Riacho_Fundo(Brasilia,DF)

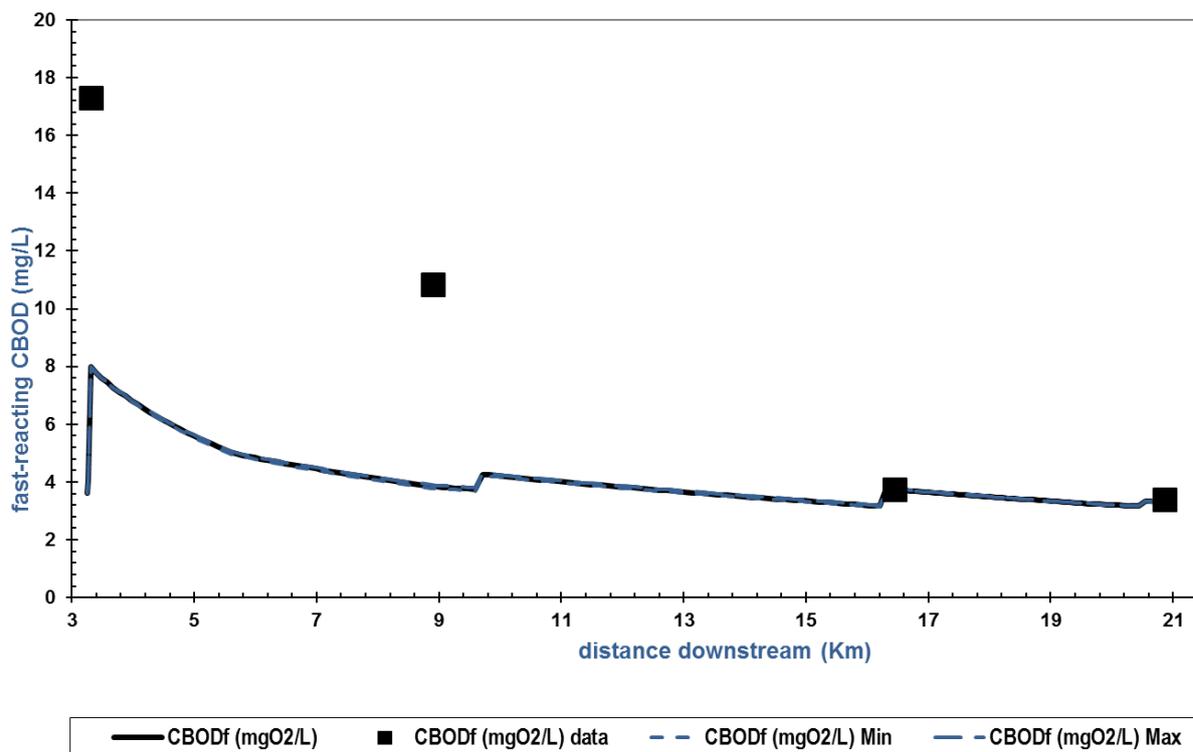


Figura 9 - Gráfico da DBO_f ao longo do Riacho Fundo com vazão do SWAT.

Tabela 19 - Comparação entre valores de DBO_f medidos, simulados com a vazão do SWAT e simulados com a vazão regionalizada.

Ponto	DBOf obs (mgO ₂ /L)	DBOf SWAT (mgO ₂ /L)	DBOf Q2Kw (mgO ₂ /L)
RF20	17.27	7.98	7.84
RF30	10.8	3.85	3.84
RF40	3.7	3.73	3.74
RF50	3.36	3.31	3.35

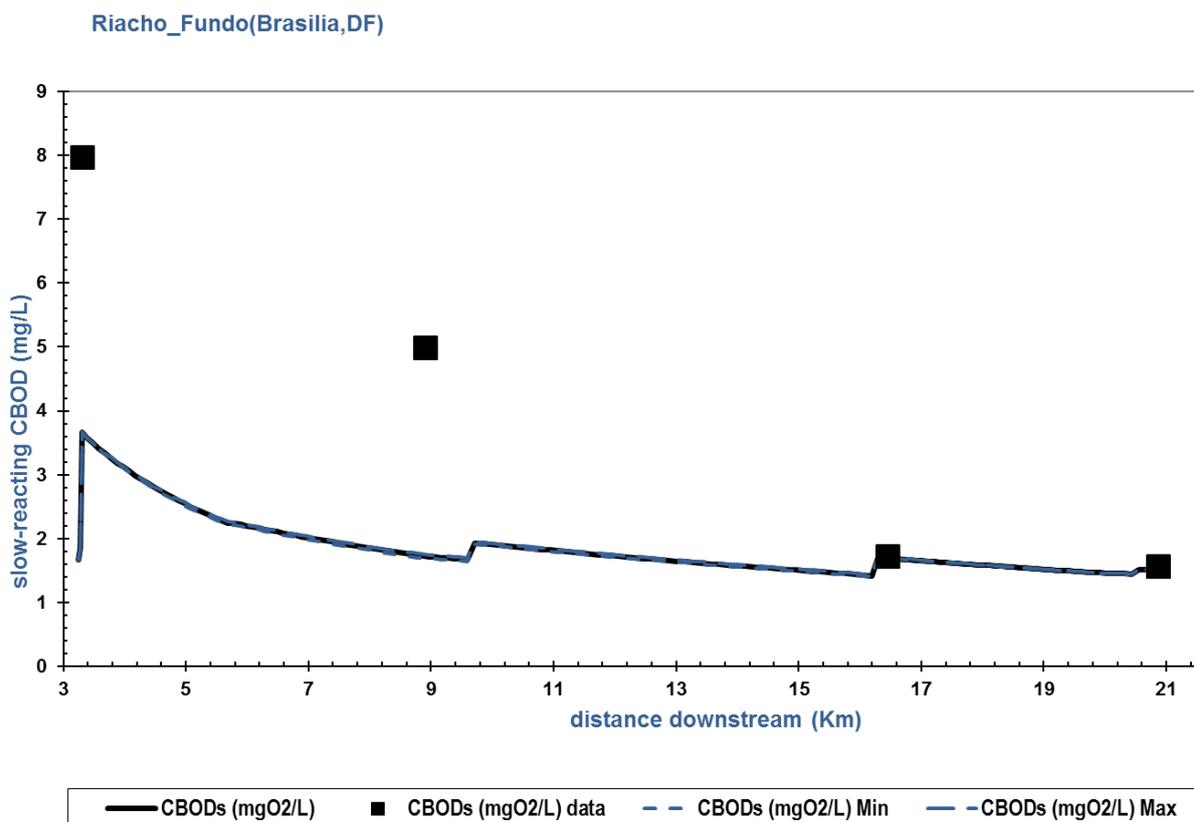


Figura 10 - Gráfico da DBOs ao longo do Riacho Fundo com vazão do SWAT.

Tabela 20 - Comparação entre valores de DBOs medidos, simulados com a vazão do SWAT e simulados com a vazão regionalizada.

Ponto	DBOs obs (mgO2/L)	DBOs SWAT (mgO2/L)	DBOs Q2Kw (mgO2/L)
RF20	7.94	3.67	3.61
RF30	4.97	1.73	1.72
RF40	1.7	1.69	1.7
RF50	1.55	1.51	1.53

Até este ponto a simulação utilizando vazão regionalizada e a vazão simulada pelo SWAT mostraram condições de qualidade da água bastante parecidas para OD, DBO_f e DBOs que indica que as diferenças entre as vazões não são significativas para estes parâmetros no período da seca.

Em nenhum ponto de monitoramento indicado nos cenários 1 e 2 os padrões estabelecidos para corpos d'água Classe 2 na Resolução CONAMA 357/05 ultrapassou os limites.

Analisando os valores medidos usados na calibração que indicam DBO_f maior que 5 mg/l considera-os normais, visto que é esperado um aumento na demanda por oxigênio após o lançamento do efluente da ETE.

CENÁRIO 3

Neste cenário as mudanças foram mais significativas no parâmetro DBO, com valores de DBO_f inferiores a 5mg/l, valor indicado na Resolução CONAMA 357/05 como máximo para águas doces Classe 2. A Figura 11 apresenta a demanda por oxigênio ao longo do comprimento do Riacho Fundo.

Riacho_Fundo (Brasilia,DF)

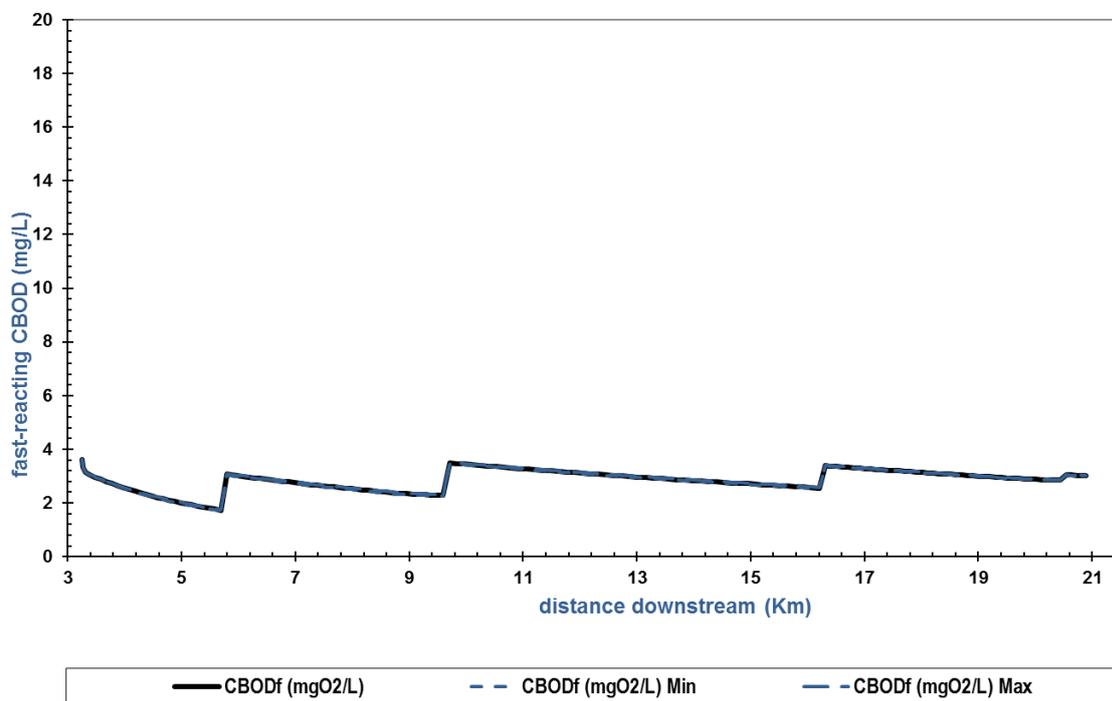


Figura 11 - Gráfico da DBO_f ao longo do Riacho Fundo com vazão do SWAT e com a ETE desativada.

Assim como a DBO_f, a DBO lenta reduz com a retirada da ETE (Figura 12) indicando uma melhora significativa da qualidade da água do Riacho Fundo no que se refere à demanda por oxigênio para estabilização da matéria orgânica, como apresentado na tabela 21.

Riacho_Fundo(Brasilia,DF) (11)

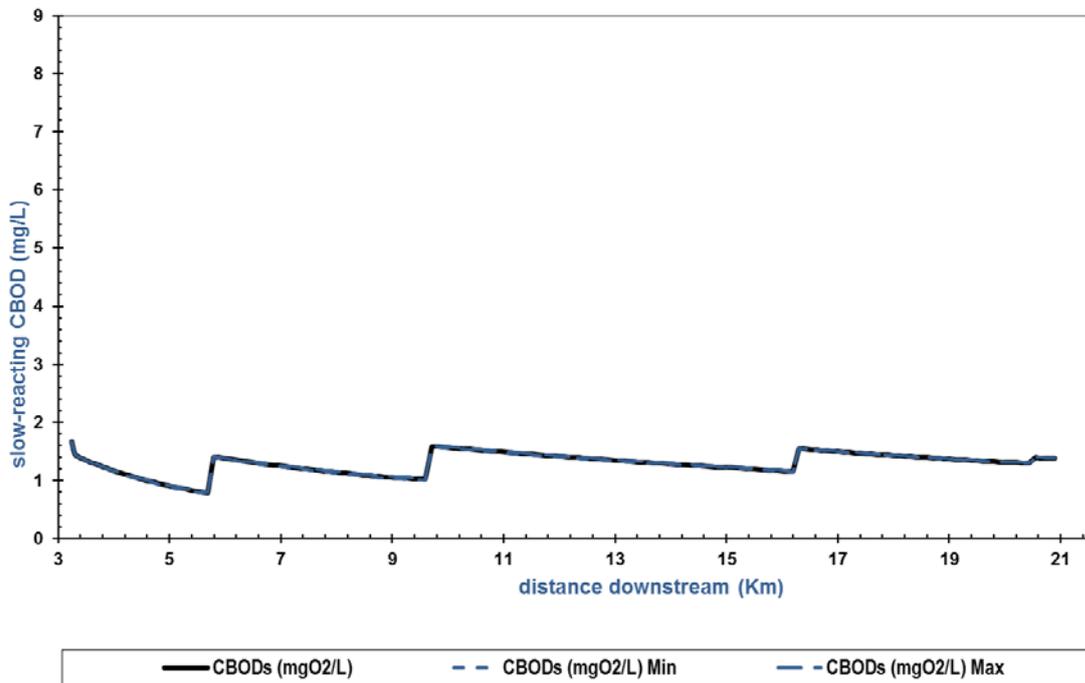


Figura 12 - Gráfico da DBOs ao longo do Riacho Fundo com vazão do SWAT e com a ETE desativada.

Tabela 21- Comparação entre valores de DBO_f ao longo do Riacho Fundo com vazão do SWAT com e sem a ETE.

Ponto	x(km)	DBOf est c. ETE (mgO ₂ /L)	DBOf est s. ETE (mgO ₂ /L)
RF20	3.33	7.98	3.15
RF30	8.93	3.85	2.35
RF40	16.47	3.73	3.36
RF50	20.89	3.31	3.02

Contudo, considerando que os pontos RF-20 e RF-30 não foram bem calibrados, as mudanças mais significativas nos valores das tabelas 21 e 22 podem não refletir a realidade de um cenário com a ETE desativada, principalmente se a hipótese da existência de cargas poluidoras desconhecidas no trecho for verdadeira.

O gráfico de DBOs apresenta comportamento igual ao de DBO_f, incluindo as mudanças mais significativas nos dois pontos menos calibrados.

Tabela 22 - Comparação entre valores de DBOs ao longo do Riacho Fundo com vazão do SWAT com e sem a ETE.

Ponto	x(km)	DBOs est c. ETE (mgO ₂ /L)	DBOs est s. ETE (mgO ₂ /L)
RF20	3.33	3.67	1.45
RF30	8.93	1.73	1.06
RF40	16.47	1.69	1.53
RF50	20.89	1.51	1.38

CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

A partir dos resultados da calibração do QUAL2Kw pode-se avaliar que o modelo é aplicável para simulação da qualidade da água no Riacho Fundo, apresentando, porém, algumas incertezas que podem ser corrigidas com mudanças nas condições das simulações.

A mudança mais considerável a ser feita no cenário para calibração do modelo é no que se refere ao ponto de início da simulação. Recomenda-se que seja iniciada na região de cabeceira do Riacho Fundo visto que para nenhum parâmetro calibrado houve resposta nos trechos iniciais e atribui-se isso a e mudanças drásticas nos padrões de qualidade em um curto espaço de simulação.

Contudo, para iniciar a simulação num ponto mais a montante do Riacho Fundo é necessário fazer a medição dos dados de qualidade da água em campo, visto que não há ponto de monitoramento de nenhum órgão nesta região da bacia.

Ainda no que se refere ao monitoramento da qualidade da água, uma potencial dificuldade na simulação utilizando o QUAL2Kw foi referente aos dados de nitrogênio, fósforo e suas frações. O modelo requer as concentrações particionada de cada nutriente, porém estes não são monitorados no efluente da ETE e foram necessárias muitas considerações e deduções baseadas na bibliografia para chegar aos dados de entrada apresentados no trabalho.

Além do monitoramento da qualidade, a caracterização da seção transversal nos trechos simulados aliada ao monitoramento das vazões tornariam melhores os valores estimados para o coeficiente de Manning, além de fornecer dados para calibração da vazão do modelo, que tornaria o modelo mais condizente com a realidade, pois seriam consideradas possíveis captações no corpo d'água.

No cenário 2, que considera a ETE Riacho Fundo ativa, os valores de OD mostraram-se pouco sensíveis às mudanças, indicando suaves quedas nos valores da concentração. Essas quedas são atribuídas aos tributários, que não possuem dados medidos, logo acredita-se que a concentração de OD deles pode estar sendo considerar menor que o real ou que a DBO esteja mais alta do que verdadeiramente é.

Como os tributários não tem dados de monitoramento da qualidade da água, não foi possível estimar neste trabalho valores para o nitrogênio, fósforo e suas frações, o que seria de bastante relevante considerando que o Riacho Fundo é tributário direto de um ambiente lêntico, o Lago Paranoá.

Se a medição para N, P e suas frações for efetuada é possível calibrar o modelo para fornecer previsões de cenário para a bacia, além de possibilitar o uso do software SWAT para simulação de nutrientes, utilizando o módulo de qualidade da água do primeiro para fornecer os dados de qualidade da água para o QUAL2Kw.

Quanto a DBO, esta mostrou-se sensível apenas no cenário 5, onde a ETE foi considerada desativada. Como se esperava, a demanda por oxigênio diminuiu. Entretanto a queda mais significativa nas concentrações nos trechos iniciais da simulação não é considerada confiável por ser nos pontos não calibrados da simulação.

Além da utilização das cargas pontuais de vazão da bacia feita neste trabalho é possível ainda utilizar os dados de vazão do SWAT para incrementar o fluxo ao longo do curso d'água, a fim de aprimorar os resultados obtidos com o QUAL2Kw.

Outra sugestão de continuidade para este trabalho é simular os dados de qualidade, exportá-los e simplificar a visualização dos dados de saída do QUAL2Kw através do ArcGIS, permitindo uma visualização rápida dos parâmetros medidos pelo modelo.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. FERREIRA, Amanda Nascimento; SILVA, Jéssica Sousa da. Integração entre SWAT e QUAL2Kw para estudo de qualidade da água na bacia hidrográfica do Riacho Fundo, Brasil. Brasília, Distrito Federal. 2016.
2. PGIRH-DF (2012). Plano de Gerenciamento Integrado de Recursos Hídricos do Distrito Federal-PGIRH. ADASA – DF. Brasília, Distrito Federal.

3. SPERLING, Marcos von. (2007) Estudos e modelagem da qualidade da água de rios. / Marcos von Sperling. – 2. Ed. – Belo Horizonte : Editora UFMG, 2014. 592p.: il. – (Princípios do tratamento biológico de águas residuárias, v. 7).
4. TOSTA, J. A. R. dos.; MENDONÇA, S. F. Teores limites para compostos amoniacais em efluentes e corpos receptores-conflitos e interrelações. 1997.