

UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM SANEAMENTO,
MEIO AMBIENTE E RECURSOS HÍDRICOS

AVALIAÇÃO E PROPOSIÇÃO DE CRITÉRIOS DE
OUTORGA PARA LANÇAMENTO DE EFLUENTES EM
CORPOS D'ÁGUA

Marília Carvalho de Melo

Belo Horizonte

2006

**AVALIAÇÃO E PROPOSIÇÃO DE CRITÉRIOS DE
OUTORGA PARA LANÇAMENTO DE EFLUENTES EM
CORPOS D'ÁGUA**

Marília Carvalho de Melo

AVALIAÇÃO E PROPOSIÇÃO DE CRITÉRIOS DE OUTORGA PARA LANÇAMENTO DE EFLUENTES EM CORPOS D'ÁGUA

Marília Carvalho de Melo

Dissertação apresentada ao programa de Pós-graduação em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos da Universidade Federal de Minas Gerais, como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos.

Área de concentração: Meio Ambiente.

Linha de pesquisa: Caracterização, modelagem, prevenção e recuperação de ambientes aquáticos.

Orientador: Marcos von Sperling.

Belo Horizonte

2006

M528a

Melo, Marília Carvalho de
Avaliação e proposição de critérios de outorga para lançamento de efluentes em corpos d'água [manuscrito] / Marília Carvalho de Melo. – 2006.

XI, 120 f., enc. : il.

Orientador: Marcos von Sperling

Dissertação (mestrado) -- Universidade Federal de Minas Gerais, Escola de Engenharia.

Inclui bibliografia

1. Água - Qualidade – Teses 2. Meio Ambiente – Teses 3. Recursos Hídricos - Teses 4. Gestão Ambiental – Teses I. Sperling, Marcos von II. Universidade Federal de Minas Gerais, Escola de Engenharia III. Título.

CDU: 628(043)

AGRADECIMENTOS

Ao Prof. Marcos von Sperling pela orientação e exemplo.

Aos amigos do IGAM pelos momentos juntos durante o desenvolvimento deste trabalho que, com certeza, foram motivos de inspiração e incentivo.

À Célia Fróes pelo apoio e confiança para o desenvolvimento deste trabalho.

Aos colegas da ANA pela oportunidade de troca de experiência e idéias.

À Ione pela ajuda na revisão do texto.

À minha mãe pelo exemplo profissional e apoio incondicional.

Ao meu pai pelas conversas que tanto fortalecem meu senso profissional.

Ao Jorge pela orientação constante em todos os momentos da minha vida.

Aos meus irmãos, especialmente ao Ulisses, que é uma fonte de inspiração constante.

À Joana, amiga de todos os momentos.

Ao Gustavo pelo amor, incentivo e companheirismo sempre.

RESUMO

O objetivo deste trabalho foi a avaliação da Equação da Mistura e do Modelo de Streeter-Phelps, normalmente empregados para a quantificação do efeito do lançamento de esgotos em um corpo d'água, para a definição de critérios de outorga de lançamento de efluentes. A avaliação dos modelos foi efetuada pelo teste de fatores que os influenciam. O estudo foi dividido em duas fases. Na primeira, foram simulados 12 cenários em uma bacia hipotética, nos quais, para os modelos avaliados, fizeram-se variar as vazões de referência e o estado anterior do corpo d'água em termos da concentração de DBO. Nessa fase foram ainda testados: (i) a influência da localização do usuário no valor mínimo da vazão de diluição para atender às condições aceitáveis de lançamento; (ii) o comportamento dos modelos e seus dados de entrada em duas regiões com condições extremas do Estado de Minas Gerais, em termos da disponibilidade hídrica; e (iii) o impacto de lançamentos com o valor máximo permitido e de lançamentos para manterem-se os padrões de corpo d'água, tal como estabelecido pela legislação ambiental. Na segunda fase, os cenários foram aplicados a uma bacia real, a do Ribeirão Marmelada, situada nos municípios de Abaeté, Cedro do Abaeté e Quartel Geral, em Minas Gerais. Os resultados evidenciaram que o Modelo de Streeter-Phelps, apesar de sua maior complexidade, deve ser utilizado como critério para análise de outorga para lançamento, porque leva em conta a capacidade de autodepuração e, assim, aproxima-se mais da real condição do corpo d'água. Foi também possível concluir que os lançamentos anteriores devem ser considerados nos cálculos da vazão de diluição necessária para autorizar um determinado lançamento. Por fim, é recomendado que a escolha da vazão de referência adequada, assim como o seu percentual máximo reservado para diluição do efluente, deva ser precedida de uma análise detalhada das condições climáticas e geomorfológicas da região considerada.

ABSTRACT

The purpose of this work was to evaluate the Mixing Equation and the Streeter-Phelps model as tools for the definition of entitlement criteria. These models are normally used for the quantitative appraisal of the effect of a discharge into a water body. Model evaluation was performed by testing its influencing factors. This work was divided in two parts. In the first part, 12 scenarios were simulated in a hypothetical basin, in which the reference flow and BOD content, previous to the assigned discharges, were made to vary. In this first part it was also tested: (i) the influence of user location on the value of the minimum dilution flow to configure acceptable discharge conditions; (ii) model behaviour under real conditions of two regions of the State of Minas Gerais, Brazil: one with deficiency and the other with abundance of water; and (iii) the impact on the basin of limit-condition discharges and of discharges just to keep standard water body BOD values, as defined by the Brazilian environmental legislation. In the second part, the same scenarios were applied to a real basin, that is, the Ribeirão Marmelada Basin, situated in the municipalities of Abaeté, Cedro do Abaeté and Quartel Geral, in the State of Minas Gerais, Brazil. Results have shown that both models can be used for the definition of discharge entitlement criteria. However, Streeter-Phelps model may be considered as the one which better represents real discharge conditions because it takes into consideration the self-purification capacity of the water body. It was also possible to conclude that previous discharges must be considered in the calculation of the minimum dilution flow rate for an entitlement. Finally, it is recommended that the choice of the reference flow rate and its available portion be preceded by a careful analysis of the climatic and geo-morphological conditions.

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS.....	VI
LISTA DE TABELAS.....	VIII
LISTA DE QUADROS.....	IX
LISTA DE ABREVIATURAS, SIGLAS E SÍMBOLOS	X
1 INTRODUÇÃO.....	1
2 OBJETIVOS.....	8
2.1 OBJETIVO GERAL.....	8
2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	8
3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	9
3.1 LEGISLAÇÃO APLICADA À GESTÃO DE RECURSOS HÍDRICOS E À GESTÃO AMBIENTAL.....	9
3.1.1 <i>Legislação Federal.....</i>	9
3.1.1.1 <i>Lei 9433/97 de 8 de Janeiro de 1997.....</i>	9
3.1.1.2 <i>Resolução do Conselho Nacional de Recursos Hídricos-CNRH N° 12, de 19 de julho de 2000.....</i>	10
3.1.1.3 <i>Resolução CNRH N°16, de 8 de maio de 2001.....</i>	11
3.1.1.4 <i>Resolução da Agência Nacional das Águas - ANA N° 219, de 06 de junho de 2005.....</i>	12
3.1.1.5 <i>Resolução do Conselho Nacional de Meio Ambiente – CONAMA N° 357, de 18 de março de 2005.....</i>	12
3.1.2 <i>Legislação do Estado de Minas Gerais.....</i>	15
3.1.2.1 <i>Lei N° 13.199, de 29 de Janeiro de 1999.....</i>	15
3.1.2.2 <i>Decreto N° 41.578, de 08 de Março de 2001.....</i>	15
3.1.2.3 <i>Portaria do Instituto Mineiro de Gestão das Águas – IGAM N° 010, de 30 de dezembro de 1998.....</i>	16
3.1.2.4 <i>Deliberação Normativa - DN do Conselho de Política Ambiental - COPAM N° 10, de 16 de dezembro de 1986.....</i>	17
3.2 METODOLOGIAS DE CONCESSÃO DE OUTORGA PARA LANÇAMENTO NO BRASIL.....	21
3.2.1 <i>Agência Nacional das Águas.....</i>	21
3.2.2 <i>Superintendência de Recursos Hídricos do Estado da Bahia – SRH-BA.....</i>	25
3.2.3 <i>Instituto Estadual de Meio Ambiente do Estado do Espírito Santo – IEMA-ES.....</i>	26
3.2.4 <i>Departamento de Águas e Energia Elétrica do Estado de São Paulo – DAEE-SP.....</i>	27
3.2.5 <i>Fundação Estadual de Proteção Ambiental do Rio Grande do Sul – FEPAM-RS.....</i>	27
3.2.6 <i>Superintendência de Desenvolvimento de Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental – SUDERHSA-PR.....</i>	27
3.2.7 <i>Órgãos gestores de recursos hídricos de outros estados da Federação.....</i>	27
3.2.8 <i>Outras metodologias.....</i>	27
3.3 CRITÉRIOS INTERNACIONAIS PARA LANÇAMENTO DE EFLUENTES	30
3.3.1 <i>Estados Unidos da América do Norte.....</i>	30
3.3.2 <i>União Européia.....</i>	31
3.4 MODELOS MATEMÁTICOS DE QUALIDADE DAS ÁGUAS	34
3.4.1 <i>A equação da mistura.....</i>	34
3.4.2 <i>Modelo de Streeter-Phelps.....</i>	36
3.4.2.1 <i>Coefficiente de desoxigenação K_1.....</i>	36
3.4.2.2 <i>O coeficiente de reaeração K_2.....</i>	38
3.4.2.3 <i>Cálculo do perfil de oxigênio dissolvido em função do tempo.....</i>	40
3.4.2.4 <i>Outros dados de entrada nos modelos da Equação da Mistura e de Streeter-Phelps.....</i>	41
3.5 CARACTERÍSTICAS HIDROLÓGICAS DO CORPO D'ÁGUA E VAZÃO DE REFERÊNCIA	42
4 METODOLOGIA.....	49
4.1 INTRODUÇÃO.....	49
4.1.1 <i>Revisão bibliográfica.....</i>	49
4.1.2 <i>Escolha dos modelos matemáticos.....</i>	49

4.1.3	<i>Desenvolvimento dos modelos em planilha MS-Excel®</i>	50
4.1.4	<i>Testes dos modelos em cenários simulados</i>	50
4.1.5	<i>Estudo de caso</i>	51
4.2	CENÁRIOS SIMULADOS.....	51
4.3	SIMULAÇÕES EM UMA BACIA HIPOTÉTICA.....	53
5	DESCRIÇÃO DO ESTUDO DE CASO – BACIA DO RIBEIRÃO MARMELADA	55
5.1	CARACTERIZAÇÃO GERAL DA BACIA DO RIBEIRÃO MARMELADA.....	55
5.2	MONITORAMENTO DAS ÁGUAS DA BACIA DO RIBEIRÃO MARMELADA.....	57
5.3	OUTORGAS PARA CAPTAÇÃO CONCEDIDAS NA BACIA DO RIBEIRÃO MARMELADA.....	58
5.4	COLETA DE DADOS NA BACIA DO RIBEIRÃO MARMELADA.....	58
5.4.1	<i>Empreendimento 1</i>	62
5.4.2	<i>Empreendimento 2</i>	63
5.4.3	<i>Empreendimento 3</i>	65
5.4.4	<i>Empreendimento 4</i>	57
5.4.5	<i>Empreendimento 5</i>	73
5.5	DIAGRAMA UNIFILAR.....	73
6	RESULTADOS E DISCUSSÃO	75
6.1	SIMULAÇÕES EM UMA BACIA HIPOTÉTICA.....	75
6.1.1	<i>Primeira etapa das simulações em bacia hipotética</i>	76
6.1.1.1	<i>Avaliação dos cenários hipotéticos - Equação da Mistura</i>	78
6.1.1.2	<i>Avaliação dos cenários hipotéticos – Modelo de Streeter-Phelps</i>	81
6.1.2	<i>Segunda etapa das simulações em bacia hipotética</i>	84
6.1.2.1	<i>Avaliação da influência da localização do lançamento nos critérios testados</i>	84
6.1.2.2	<i>Avaliação dos cenários em uma região de grande e outra de pequena disponibilidade hídrica no Estado de Minas Gerais</i>	88
6.1.2.3	<i>Avaliação dos cenários com atendimento obrigatório ao padrão de lançamento</i>	94
6.1.2.4	<i>Avaliação dos cenários com atendimento obrigatório ao padrão do corpo receptor</i>	95
6.2	ESTUDO DE CASO: SIMULAÇÕES NA BACIA DO RIBEIRÃO MARMELADA.....	98
6.2.1	<i>Obtenção de dados de entrada</i>	98
6.2.1.1	<i>Medições hidrológicas no ribeirão Marmelada</i>	98
6.2.1.2	<i>Monitoramento de qualidade das águas no ribeirão Marmelada</i>	103
6.2.1.3	<i>Coefficientes do modelo de Streeter-Phelps</i>	106
6.2.1.4	<i>DBO no rio - Qualidade atual do corpo d'água</i>	107
6.2.1.5	<i>Dados dos lançamentos</i>	107
6.2.2	<i>Análise das simulações na bacia do ribeirão Marmelada</i>	108
6.2.2.1	<i>Simulação com a Equação da Mistura</i>	108
6.2.2.2	<i>Simulação com o Modelo de Streeter- Phelps</i>	111
7	CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES	113
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	116

LISTA DE FIGURAS

Figura 4.1 - Vista da tela do programa em Excel.	50
Figura 5.1 - Vista geral da bacia do ribeirão Marmelada.....	56
Figura 5.2 - Bacia do ribeirão Marmelada: Localização dos pontos de monitoramento.....	57
Figura 5.3 - Bacia do ribeirão Marmelada: Distribuição geográfica das outorgas concedidas pelo IGAM (Escala: 1:100.000).....	58
Figura 5.4 - Bacia do ribeirão Marmelada: Pontos cadastrados (Escala: 1:100.000).....	60
Figura 5.5 - Detalhe dos pontos cadastros no município de Abaeté (Escala: 1:100.000).....	61
Figura 5.6 - Efluente gerado e ponto de lançamento dos efluentes do empreendimento 1 no ribeirão Marmelada.....	63
Figura 5.7 - Tanque de aeração e filtro da estação de tratamento de efluentes do empreendimento 2.....	64
Figura 5.8 - Filtro e decantador da estação de tratamento de efluentes do empreendimento 2.....	64
Figura 5.9 - Detalhe do decantador e vista do lançamento no ribeirão Marmelada.....	65
Figura 5.10 - Filtro e tanque de equalização: Empreendimento 3.....	66
Figura 5.11 - Lagoas anaeróbias e lagoa facultativa.....	66
Figura 5.12 - Vista da ETE Primavera.....	68
Figura 5.13 - Ponto de lançamento da ETE Primavera.....	68
Figura 5.14 - Vista da ETE São Simão.....	69
Figura 5.15 - Lagoa Anaeróbia de ETE São Simão.....	70
Figura 5.16 - Lagoa facultativa da ETE São Simão.....	70
Figura 5.17 - Ponto de lançamento de esgoto in natura Abaeté-1.....	71
Figura 5.18 - Ponto de lançamento de esgoto in natura Abaeté-2.....	71
Figura 5.19 - Ponto de lançamento de esgoto in natura Abaeté-3.....	71
Figura 5.20 - Ponto de lançamento de esgoto in natura Abaeté-4.....	72
Figura 5.21 - Ponto de lançamento de esgoto in natura Abaeté-5.....	72
Figura 5.22 - Vista da ETE do empreendimento 5.....	73
Figura 5.23 - Diagrama unifilar da bacia do ribeirão Marmelada com os lançamentos utilizados no estudo de caso.....	74
Figura 6.1 - Diagrama unifilar dos lançamentos hipotéticos.....	77
Figura 6.2 - Perfil de DBO – Cenários 1, 3 e 5.....	79
Figura 6.3 - Perfil de DBO – Cenários 2, 4 e 6.....	79
Figura 6.4 - Vazão de diluição – Cenários 1 a 6 – Sem lançamentos anteriores.....	80
Figura 6.5 - Vazão de diluição – Cenários 1 a 6 – Com lançamentos anteriores.....	80
Figura 6.6 - Perfil de DBO – Cenários 7, 9 e 11.....	82
Figura 6.7 - Perfil de DBO – Cenários 8, 10 e 12.....	82
Figura 6.8 - Vazão de diluição – Cenários 7 a 12 – Sem lançamentos anteriores.....	83
Figura 6.9 - Vazão de diluição – Cenários 7 a 12 – Com lançamentos anteriores.....	83
Figura 6.10 - Esquema dos lançamentos.....	85
Figura 6.11 - Perfil de DBO – Cenários 7 e 7a.....	86
Figura 6.12 - Perfil de DBO – Cenários 8 e 8a.....	86
Figura 6.13 - Perfil de DBO – Cenários 7b, 9b e 11b.....	89
Figura 6.14 - Perfil de DBO – Cenários 8b, 10b e 12b.....	90
Figura 6.15 - Perfil de DBO – Cenários 7c, 9c e 11c.....	92
Figura 6.16 - Perfil de DBO – Cenários 8c, 10c e 12c.....	93
Figura 6.17 - Perfil de DBO – Cenários 7d, 9d e 11d.....	94
Figura 6.18 - Perfil de DBO – Cenários 8d, 10d e 12d.....	95
Figura 6.19 - Perfil de DBO – Cenários 7e, 9e e 11e.....	96
Figura 6.20 - Perfil de DBO – Cenários 8e, 10e e 12e.....	97
Figura 6.21 - Precipitação média anual no ribeirão Marmelada.....	99
Figura 6.22 - Precipitação média mensal no período 1975-2005 no ribeirão Marmelada.....	99
Figura 6.23 - Vazão x Largura – Estação fluviométrica Abaeté.....	100
Figura 6.24 - Vazão x Profundidade – Estação fluviométrica Abaeté.....	101
Figura 6.25 - Vazão x Velocidade – Estação fluviométrica Abaeté.....	101

Figura 6.26 - Curva de permanência de vazões – Estação fluviométrica Abaeté.....	102
Figura 6.27 - Curva de permanência de vazões – Estação fluviométrica Abaeté – Detalhe: vazões mais baixas.....	102
Figura 6.28 - Ajuste de Weibull para Q 7 mínimas – Estação fluviométrica Abaeté.....	103
Figura 6.29 - Série de IQA no ribeirão Marmelada (Estação SF007 – Projeto Águas de Minas).....	104
Figura 6.30 - Série temporal de DBO no ribeirão Marmelada (Estação SF007 – Projeto Águas de Minas).....	105
Figura 6.31 - Série temporal de OD no ribeirão Marmelada (Estação SF007 – Projeto Águas de Minas).....	105
Figura 6.32 - Série temporal de coliformes Termotolerantes (Estação SF007 – Projeto Águas de Minas).....	106
Figura 6.33 - Perfil de DBO – Cenários 1, 3 e 5.....	109
Figura 6.34 - Perfil de DBO – Cenários 2, 4 e 6.....	110
Figura 6.35 - Perfil de DBO – Cenários 7, 9 e 11.....	111
Figura 6.36 - Perfil de DBO – Cenários 8, 10 e 12.....	112

LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1 - Padrões de lançamento para efluentes urbanos da Comunidade Européia.	34
Tabela 3.2- Valores típicos de K1 em condições de laboratório e de Kd em condições de campo (base e, 20oC).	37
Tabela 3.3 - Valores médios de K2 considerando características do corpo d'água.....	39
Tabela 3.4 - Valores médios de K2, segundo modelos baseados em dados hidrológicos do corpo d'água	39
Tabela 5.1 - Legenda dos pontos cadastrados.....	62
Tabela 5.2 - Características do efluente do empreendimento 1.	63
Tabela 5.3 - Características do efluente de empreendimento 2.	65
Tabela 5.4 - Características do efluente do empreendimento 3.....	67
Tabela 5.5 - Características do efluente do sistema de lagoas apresentados no processo de licenciamento.....	67
Tabela 5.6 - Dados do efluente da ETE São Simão, em Abaeté, MG.....	69
Tabela 5.7 - Localização dos lançamentos in natura do município de Abaeté.....	70
Tabela 6.1 - Vazões específicas médias do Estado de Minas Gerais.....	76
Tabela 6.2 - Vazões de referência nos pontos de lançamentos.....	77
Tabela 6.3 - Razão de diluição resultante.....	78
Tabela 6.4 - Vazão de diluição e DBO para os cenários 1 a 6 (Equação da Mistura).....	78
Tabela 6.5 - Vazão de diluição e DBO para os cenários 7 a 12 (Streeter-Phelps).....	82
Tabela 6.6 - Vazão de diluição e DBO para cenários 7, 8, 7a e 8a (Streeter-Phelps).....	85
Tabela 6.7 - Valores de vazão de diluição e DBO no corpo d'água para o cenário 7'	87
Tabela 6.8 - Vazões e áreas de drenagem das sub-bacias da região I da bacia do Jequitinhonha.....	88
Tabela 6.9 - Vazão de diluição e DBO para os cenários 7b a 12b (Streeter-Phelps).....	89
Tabela 6.10 - Vazões e áreas de drenagem das sub-bacias da região II da bacia do rio Paraíba do Sul.....	91
Tabela 6.11 - Vazão de diluição e DBO para os cenários 7c a 12c (Streeter-Phelps).....	92
Tabela 6.12 - Vazão de diluição e DBO para os cenários 7d a 12d (Streeter-Phelps).....	94
Tabela 6.13 - Vazão de diluição e DBO para os cenários 7e a 12e (Streeter-Phelps).....	96
Tabela 6.14 - Características do ribeirão Marmelada – Estação Abaeté.....	100
Tabela 6.15 - Vazão específica para bacia do ribeirão Abaeté.....	103
Tabela 6.16 - DBO média para a bacia do ribeirão Abaeté.....	107
Tabela 6.17 - Resumo dos dados de DBO dos efluentes considerados na simulação.....	107
Tabela 6.18 - Razão de diluição requerida.....	108
Tabela 6.19 - Vazão de diluição e DBO para os cenários 1 a 6 (Equação da Mistura).....	109
Tabela 6.20 - Vazão de diluição e DBO para os cenários 7 a 12 (Streeter-Phelps).....	111

LISTA DE QUADROS

Quadro 3.1 – Resumo da legislação pertinente à outorga para lançamento no âmbito nacional.	14
Quadro 3.2 – Resumo da legislação pertinente à outorga para lançamento no âmbito estadual.	20
Quadro 3.3 – Fundamentos das metodologias adotadas pelos órgãos gestores no Brasil.	30
Quadro 3.4 – Critérios adotados para outorga de captação de águas superficiais.	46
Quadro 4.1 – Cenários simulados.	52

LISTA DE ABREVIATURAS, SIGLAS E SÍMBOLOS.

AESA: Agência de Águas, Irrigação e Saneamento do Estado da Paraíba.

ALMG: Assembléia Legislativa de Minas Gerais.

ANA: Agência Nacional de Águas.

CEPRAM: Conselho Estadual de Proteção Ambiental

CERH-MG: Conselho Estadual de Recursos Hídricos de Minas Gerais.

CETESB: Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental.

CNRH: Conselho Nacional de Recursos Hídricos.

CONAMA: Conselho Nacional de Meio Ambiente.

COPASA: Companhia de Saneamento de Minas Gerais.

COPAM: Conselho de Política Ambiental

CPRM: Serviço Geológico do Brasil.

CWA: Clean Water Act.

DAEE-SP: Departamento de Águas e Energia Elétrica do Estado de São Paulo.

DBO: Demanda Bioquímica de Oxigênio.

DN: Deliberação Normativa.

DQO: Demanda Química de Oxigênio.

EMATER-MG: Empresa de Assistência Técnica e Extensão Rural do Estado de Minas Gerais.

EPA: Environmental Protection Agency.

ETE: Estação de Tratamento de Esgoto.

FEAM: Fundação Estadual do Meio Ambiente.

FEPAM-RS: Fundação Estadual de Proteção Ambiental do Rio Grande do Sul.

FIEMG: Federação das Indústrias do Estado de Minas Gerais.

IBGE: Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística.

IEF: Instituto Estadual de Florestas.

IEMA-ES: Instituto Estadual de Meio Ambiente do Estado do Espírito Santo.

IGAM: Instituto Mineiro de Gestão das Águas.

IQA: Índice de Qualidade das Águas.

L: Leste

MD: Margem Direita.

ME: Margem Esquerda.

MS: Material Sólido.

N: Norte

NATURATINS-TO: Instituto Natureza do Estado do Tocantins.

NMP: Número Mais Provável.

NRA: National Rivers Authority.

O: Oeste

O₂: Oxigênio.

OD: Oxigênio Dissolvido.

RMS: Região Metropolitana de Salvador.

S: Sul

SECTMA: Secretaria de Ciência, Tecnologia e Meio Ambiente do Estado de Pernambuco.

SEMAD: Secretaria de Estado de Meio Ambiente e Desenvolvimento Sustentável de Minas Gerais

SEMAR: Secretaria de Meio Ambiente e Recursos Naturais do Estado do Piauí.

SEMARH-GO: Secretaria do Meio Ambiente e dos Recursos Hídricos do Estado de Goiás.

SEMA-RS: Secretaria Estadual de Meio Ambiente do Rio Grande do Sul.

SEPLANTEC: Secretaria de Estado do Planejamento e da Ciência e Tecnologia de Sergipe.

SERGH-MG: Sistema Estadual de Gerenciamento de Recursos Hídricos de Minas Gerais.

SERHID-RN: Secretaria de Estado dos Recursos Hídricos do Rio Grande do Norte.

SIAM: Sistema de Informações Ambientais.

SRH-BA: Superintendência de Recursos Hídricos do Estado da Bahia.

SRH-CE: Superintendência de Recursos Hídricos do Estado do Ceará.

SUDERHSA-PR: Superintendência de Desenvolvimento de Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental do Paraná.

TMDL: Total Maximum Daily Load.

UASB: Reator Anaeróbio de Manta de Lodo.

UFV: Universidade Federal de Viçosa.

UPGRH: Unidades de Planejamento e Gestão de Recursos Hídricos.

WHO: World Health Organization.

WRA: Water Resources Act.

1 INTRODUÇÃO

A poluição de corpos d'água constitui um grande desafio para a gestão de recursos hídricos; 54% da população brasileira está localizada em 406 centros urbanos (IBGE, 2000), caracterizando uma grande concentração de pessoas em poucos centros. Este dado tem conseqüências diretas nas políticas de recursos hídricos e de saneamento. Agregado a isso, o fato de que 49,7% dos municípios não têm sistema de coleta de esgoto e de que apenas 31,3% do esgoto coletado é tratado no Brasil (SNIS, 2004), contribui para a crescente escassez de água disponível em quantidade e qualidade compatível com os diversos usos.

A poluição por introdução de matéria orgânica nos corpos de água constitui, no Brasil, o principal problema de degradação ambiental dos mananciais. Isso se deve ao fato de, no País, os investimentos em saneamento ainda não serem suficientes para a demanda existente. Por isso, utilizar a capacidade de autodepuração de um corpo de água é um recurso que pode ser explorado em países em que a carência de recursos justifica a complementação dos processos de tratamento de esgotos com o uso da capacidade assimiladora dos mananciais (von Sperling, 2005).

Segundo Syme *et al* (1999), a alocação de recursos hídricos tem se tornado um foco de conflito. Ainda segundo esses autores, a competição pela água é evidente, não só em termos de quantidade, mas tem crescido em relação à qualidade.

No ano de 1997 foi aprovada a lei que institui a Política Nacional de Recursos Hídricos, que apresenta novos conceitos de gestão, como a descentralização e a gestão participativa. Os fundamentos nos quais a Lei 9433/97 está baseada são:

I - "a água é um bem de domínio público";

II - "a água é um recurso natural limitado, dotado de valor econômico;"

III - "em situações de escassez, o uso prioritário dos recursos hídricos é o consumo humano e a dessedentação de animais";

IV - "a gestão dos recursos hídricos deve sempre proporcionar o uso múltiplo das águas";

V - "a bacia hidrográfica é a unidade territorial para implementação da Política Nacional de

Recursos Hídricos e atuação do Sistema Nacional de Gerenciamento de Recursos Hídricos";

VI - *"a gestão dos recursos hídricos deve ser descentralizada e contar com a participação do poder público, dos usuários e das comunidades".*

A Política Nacional de Recursos Hídricos tem seus conceitos baseados na gestão francesa de recursos hídricos, apresenta a bacia como unidade de gestão e cria a figura do comitê de bacias, um “parlamento das águas” no âmbito regional. É uma gestão descentralizada e participativa, uma vez que prevê a participação dos diversos segmentos da sociedade, o poder público e usuários. Define ainda o valor econômico para a água que, a partir da Constituição de 1988, é um bem exclusivamente público.

Para materializar os fundamentos, a lei define seis instrumentos de gestão, complementares entre si e é de se esperar que a gestão atinja sua eficiência máxima com a implantação de todos eles. A seguir, são listados os cinco instrumentos de gestão, de interesse do presente estudo.

a) Planos diretores de recursos hídricos

Os planos diretores de recursos hídricos de bacias hidrográficas devem contemplar diretrizes e critérios para o gerenciamento, assim como fundamentar e orientar a implementação de programas e projetos na bacia para o atendimento de metas previstas. Para a elaboração dos planos, deve-se, de forma preliminar, realizar um diagnóstico da situação dos recursos hídricos na bacia hidrográfica. Com base nesse diagnóstico, são estabelecidas metas de racionalização de uso, visando aumentar a disponibilidade hídrica e melhorar a qualidade dos corpos receptores.

b) Enquadramento dos corpos d'água

O enquadramento dos corpos d'água em classes segundo seus usos preponderantes visa assegurar qualidade de água compatível com os usos mais exigentes e diminuir os custos de combate à poluição da água mediante ações preventivas permanentes.

c) Cobrança pelo uso de Recursos Hídricos

A cobrança pelo uso de recursos hídricos tem origem no fundamento que define a água como um bem dotado de valor econômico, conforme indica um dos fundamentos da Política Nacional de Recursos Hídricos, e pretende dar ao usuário uma indicação do seu real valor. A cobrança deve incentivar a racionalização do uso da água e propiciar investimentos na bacia, já que o recurso arrecadado deve ser aplicado prioritariamente na bacia em que foi gerado.

d) Sistema de informações sobre Recursos Hídricos

O sistema de informações visa subsidiar tecnicamente, pela disponibilização de dados, as tomadas de decisão nos processos de gestão dos recursos hídricos.

e) Outorga de direito de uso de Recursos Hídricos

A outorga de direito de uso de recursos hídricos tem por objetivo os controles quantitativo e qualitativo dos usos das águas, garantindo o direito de acesso a essas.

Este último instrumento, a outorga de direito de uso dos recursos hídricos, está no foco de maior interesse deste estudo. A outorga é o instrumento pelo qual o usuário recebe uma autorização administrativa do poder outorgante para captações de águas superficiais ou subterrâneas, para o lançamento de efluentes ou para qualquer outra intervenção no corpo de água que altere seu regime, quantidade ou qualidade. A outorga é condicionada pelas prioridades de uso definidas nos planos diretores, pela classe de enquadramento e pelo princípio do uso múltiplo do recurso.

Segundo Cardoso e Monteiro (2004), a outorga deve ser entendida como um instrumento de alocação de água entre os mais diversos usos dentro de uma bacia, que deve buscar, como objetivos mínimos: o atendimento das necessidades ambientais, econômicas e sociais; a redução ou eliminação dos conflitos entre usuários da água, e a possibilidade de que as demandas futuras também possam ser atendidas. Para a mencionada alocação levam-se em conta os aspectos quantitativos, qualitativos e de distribuição temporal e espacial da água.

Em Minas Gerais, os critérios para outorga de derivação ou captação em um corpo de água natural estão estabelecidos na Portaria IGAM N^o 010/98. O valor máximo outorgável para

captações a fio d'água é limitado em 30% da $Q_{7,10}$, ficando garantidos, a jusante de cada derivação, fluxos residuais mínimos equivalentes a 70% dessa vazão. Para captações em reservatórios, esse valor pode ser superior a 30% da vazão de referência, desde que seja garantido o fluxo residual mínimo a jusante equivalente a 70% da $Q_{7,10}$, considerada a vazão necessária para a manutenção do meio biótico.

A outorga de lançamento de efluentes em Minas Gerais é, no seu princípio, regulada pelo Art. 18 da Lei Estadual Nº 13.199/99, Política Estadual de Recursos Hídricos, pelo Decreto Nº 41.578/00 que regulamenta a Lei Nº 13199/99, e pela Portaria IGAM Nº 010/98. Entretanto, tais normas não fixam critérios para subsidiar a análise dessa modalidade de outorga. Devido à ausência de critérios técnicos, as outorgas de direito de uso para lançamento de efluentes ainda não são concedidas pelo órgão gestor.

A disposição de efluentes em corpos d'água deve ocorrer de forma criteriosa para que se garantam os demais usos previstos para a água, já que seu uso para diluição de efluentes conflita com quase todos os demais, quando feito de forma indiscriminada. O emprego da água em vários usos e processos depende de características físicas, químicas e biológicas específicas. Além disto, quanto mais preservada, maior a gama de utilizações da água encontrada em um corpo d'água. É, portanto, possível definir a qualidade da água pelos intervalos de valores das variáveis que limitam determinado uso. A outorga de lançamento de efluentes, neste contexto, apresenta-se como um instrumento eficaz da garantia da qualidade das águas. A outorga e o enquadramento em classes constituem os dispositivos de controle qualitativo na gestão de recursos hídricos.

A definição de critérios e a implementação da outorga de lançamento de efluentes no Estado de Minas Gerais visam controlar e regular a emissão de cargas poluidoras nos corpos d'água e, conseqüentemente, garantir a qualidade apropriada desses, assegurando às águas qualidade compatível com os usos a que forem destinadas.

O estudo do tema outorga para lançamento de efluentes em corpos d'água transita entre as áreas de saneamento, meio ambiente e recursos hídricos, causando, muitas vezes, o sobreposição entre as competências dos órgãos ambientais e gestores de recursos hídricos. Segundo Machado *et al* (2003), o arranjo institucional brasileiro provoca conflitos

operacionais. Por um lado, os órgãos ambientais concedem licenças com base em padrões de lançamento. No caso dos órgãos gestores de recursos hídricos, a outorga para o lançamento é autorizada considerando-se a qualidade do efluente, em vazões que garantam uma certa qualidade residual do corpo d'água (enquadramento do corpo d'água).

Os órgãos ambientais têm como atribuição pesquisar, monitorar e diagnosticar a poluição ou a degradação ambiental, desenvolver pesquisas, estudos, sistemas, normas, padrões, bem como prestar serviços técnicos destinados a prevenir e corrigir a poluição ou a degradação ambiental. Esses órgãos têm ainda as atribuições de desenvolver atividades informativas e educativas, apoiar os municípios na implantação e no desenvolvimento de sistemas de gestão ambiental, fiscalizar o cumprimento da legislação de controle da poluição ou da degradação ambiental, podendo aplicar penalidades.

Na análise técnica de licenciamento para empreendimentos que efetuem lançamentos, os órgãos ambientais primam pelo cumprimento dos padrões de lançamento. É levado em conta o processo de tratamento adequado para se atingir os padrões estabelecidos. A análise é pontual e muitas vezes negligencia o estudo do impacto do lançamento no corpo receptor. Por fim, não considera os efeitos combinados de todos os lançamentos na bacia hidrográfica.

Segundo von Sperling (2005), quando se emprega um enfoque regional para a bacia hidrográfica, no que tange ao controle da poluição, conduz-se a maior economicidade e segurança nas estratégias de controle.

O papel do órgão gestor de recursos hídricos é superintender o processo de outorga e de suspensão de direito de uso da água, gerir e manter atualizado o Sistema Estadual de Informações sobre Recursos Hídricos. Compete ainda ao órgão gestor manter um sistema de fiscalização de uso das águas da bacia e exercer outras ações, atividades e funções estabelecidas em lei, regulamento ou decisão do Conselho Estadual de Recursos Hídricos de Minas Gerais-CERH-MG, compatíveis com a gestão de recursos hídricos. Como objetivo final, cabe ao órgão gestor zelar pelas questões quantitativas e qualitativas do corpo d'água, garantindo, assim, água disponível em quantidade e qualidade para os diversos usos.

Segundo Cardoso e Monteiro (2004), os órgãos ambientais e gestores de recursos hídricos devem trabalhar de forma plenamente articulada nos processos de outorga para lançamento de

efluentes, visto que as respectivas decisões a tomar são interdependentes, ou seja: as eficiências de tratamento de efluentes definidas na licença ambiental e as correspondentes cargas poluidoras remanescentes deverão estar em perfeita consonância com as vazões que poderão ser alocadas para a diluição desses poluentes, e vice-versa. Com este mesmo enfoque, é necessário que se conheçam os impactos qualitativos e quantitativos que cada usuário causará ao manancial ao longo do tempo, dos trechos, e em função de cada parâmetro de qualidade. Após o conhecimento dos impactos individuais, é fundamental estimar e entender o impacto cumulativo desses usos nos corpos de água e na bacia hidrográfica.

Ao analisar os sistemas administrativos voltados para o controle de lançamentos experimentados ao longo do tempo, em diversos países, Derísio (2000) conclui que esses sistemas distinguem-se quanto ao ponto em que o controle é exercido: no corpo receptor ou no ponto de descarga do efluente e faz uma análise de três modelos. O primeiro modelo considera o controle como sendo exercido pelo corpo receptor em função de padrões de qualidade estabelecidos com base em critérios e dados históricos, para os usos que se pretende garantir para os corpos d'água. Esse modo de controle, baseado unicamente nos padrões de qualidade, é mais adequado para regiões onde os rios são caudalosos e os lançamentos ocorrem com intervalos consideráveis, ao longo da bacia. As dificuldades próprias desse tipo de sistema recaem sobre a identificação dos níveis de tratamento necessários nas diversas fontes, para o atendimento dos padrões. No caso de fontes que lançam seus efluentes no mesmo corpo d'água, as de jusante teriam que ter maior eficiência no tratamento que as de montante. Isto, por causa do efeito cumulativo do efluente. Assim, lançamentos mais a jusante possuirão melhores condições em termos da vazão disponível no rio para autodepuração. Outro ponto a ser salientado é o fato de duas indústrias de mesma atividade, cujos lançamentos possuam as mesmas características e estejam localizadas em corpos d'água com diferentes capacidades de assimilação, demandarem níveis de tratamentos diferenciados, o que implicaria em custos unitários de produção também diferenciados. De acordo com o segundo modelo, o controle é exercido desde o ponto de descarga e se estende ao processo industrial ou à natureza da atividade geradora de efluentes. A base do controle consiste no monitoramento de efluente, mas não se estabelece *a priori* um limite para os efluentes. As exigências de remoção de substâncias poluentes devem ir até o ponto onde a tecnologia corrente permita. A vantagem desse sistema é que a proteção da qualidade das águas é a maior

possível e a melhoria da qualidade no lançamento poderia acompanhar as evoluções técnicas no tratamento de efluentes. Um ponto fraco dessa linha de controle, quando adotada isoladamente, é que não leva em conta a capacidade de assimilação dos corpos d'água, podendo este fato levar a investimentos desnecessários no tratamento dos efluentes. Um terceiro modelo requer que a concentração de poluentes no efluente não exceda a valores determinados pela autoridade de controle, independentemente do local de descarga e da natureza da atividade geradora da poluição. A maior vantagem desse sistema consiste na sua simplicidade administrativa e no fácil entendimento da forma de controlar. A aplicação desse sistema impõe o mesmo custo unitário de tratamento de efluentes nas indústrias de mesmos ramos de atividade.

Neste trabalho, são feitos: (a) uma análise crítica das metodologias adotadas para outorga de lançamentos de efluentes; (b) testes dos elementos que influenciam os modelos, como a vazão de referência adotada e a condição inicial do corpo d'água; e (c) uma avaliação da diferença entre uma análise pontual e outra que contemple uma visão geral da bacia, considerando-se para tanto o efeito cumulativo dos diversos lançamentos na mesma.

Inicialmente, foi realizada uma revisão bibliográfica que produziu uma compilação e uma reflexão sobre a legislação afeta ao tema outorga de lançamentos. Estudaram-se diversas metodologias adotadas no Brasil por órgão gestores, além de algumas proposições internacionais. Por fim, analisaram-se os modelos matemáticos que descrevem essas metodologias, bem como os seus parâmetros de entrada.

A metodologia proposta neste trabalho apresenta duas etapas distintas: uma hipotética e o estudo de caso, em que são realizadas simulações considerando 12 cenários, nos quais são alternadamente testados os modelos matemáticos, as vazões de referência e a concentração de DBO inicial considerada para o corpo d'água.

2 OBJETIVOS

2.1 Objetivo geral

Este estudo tem o objetivo de fazer uma análise crítica dos critérios e modelos adotados para a outorga de lançamento de efluentes no Brasil, assim como buscar critérios adequados à realidade dos estados brasileiros, de modo a subsidiar as análises técnicas conduzidas pelos diversos órgãos gestores.

2.2 Objetivos específicos

Para alcançar o objetivo geral, são definidos os seguintes objetivos específicos:

- a) Comparar cenários de lançamentos utilizando-se o modelo de Streeter Phelps (1925) e a simples equação de mistura;
- b) Avaliar a capacidade de absorção do impacto poluidor de cargas lançadas em diversos pontos de uma bacia, vista como uma unidade de gestão de recursos hídricos;
- c) Avaliar e mensurar o impacto de cargas lançadas ao corpo d'água por usuários;
- d) Avaliar a interferência da vazão de referência a ser adotada na capacidade de assimilação do corpo d'água;
- e) Avaliar a diferença dos modelos e suas variáveis adotadas para uma bacia com pouca disponibilidade hídrica e para outra com abundância;
- f) Propor critérios que possam ser adotados para a concessão das outorgas para lançamento de efluentes.

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste capítulo são apresentadas a legislação nacional e do Estado de Minas Gerais, referentes a recursos hídricos e meio ambiente, de interesse para o tema deste estudo. Foi feita uma análise dos termos legais, ressaltando-se a relação da outorga de lançamento de efluentes com outros instrumentos de gestão de recursos hídricos e com a legislação ambiental. Em especial foram analisados os padrões de lançamento e do corpo receptor.

Além disto, são analisadas as diversas metodologias aplicadas no Brasil e no exterior, para outorga de lançamento. Tais metodologias baseiam-se em modelos matemáticos de qualidade das águas que também foram estudados na revisão, juntamente com os diversos parâmetros que compõem esses modelos.

3.1 Legislação aplicada à gestão de recursos hídricos e à gestão ambiental

3.1.1 Legislação Federal

3.1.1.1 Lei 9433/97 de 8 de Janeiro de 1997

A Lei nº 9433/97, em seu Art. 3º, estabelece diretrizes gerais de ação para implementação da Política Nacional de Recursos Hídricos e, no inciso I, contempla a necessidade da gestão sistemática dos recursos hídricos, sem dissociação dos aspectos de quantidade e qualidade.

O Art. 12 determina, em seu inciso III, que o lançamento em corpos de água de esgotos e demais resíduos líquidos ou gasosos, tratados ou não, com o fim de sua diluição, transporte ou disposição final está sujeito à outorga pelo Poder Público.

O Art. 13 condiciona a concessão da outorga às prioridades de uso estabelecidas nos Planos de Recursos Hídricos, à classe em que o corpo de água estiver enquadrado e à manutenção das condições adequadas ao transporte aquaviário, quando for o caso.

Sendo assim, a outorga de lançamento de efluentes busca a integração dos aspectos qualitativos e quantitativos.

Em relação a cobrança, a Lei diz que serão cobrados os usos sujeitos à outorga e na fixação dos valores a serem cobrados, deverão ser observados, nos lançamentos de efluentes, o volume lançado e seu regime de variação e as características físico-químicas, biológicas e de toxicidade do afluentes, mecanismos estes que devem ser fixados pelos comitês de bacia hidrográfica.

Dentre as atribuições dadas por esta lei ao Conselho Nacional de Recursos Hídricos - CNRH está a de estabelecer critérios gerais para a outorga de direito de uso de recursos hídricos, incluindo-se aí aquelas para lançamento de efluentes.

3.1.1.2 Resolução do Conselho Nacional de Recursos Hídricos-CNRH N° 12, de 19 de julho de 2000

A Resolução nº 12/2000 tem como objetivo o estabelecimento de procedimentos para o enquadramento de corpos de água em classes, segundo os usos preponderantes. O enquadramento é um importante instrumento para a análise dos pedidos de outorga para lançamento de efluentes, pois os critérios de outorga para lançamento devem estar de acordo com o enquadramento do corpo d'água . Essa Resolução reafirma a prescrição contida na Lei 9.433/97, de que as agências de água deverão propor aos respectivos Comitês de Bacia o enquadramento dos corpos de água. A Resolução enumera, ainda, os estudos a serem realizados para a proposta de enquadramento a ser escolhida.

Cabe aos órgãos gestores de recursos hídricos considerar, nas análises dos pedidos de outorga, o enquadramento de corpos de água para que sejam mantidos os padrões de qualidade determinados. Cabe a eles, ainda, monitorar, controlar e fiscalizar para avaliar o seu cumprimento.

Nascimento e von Sperling (1999) afirmam, ainda, que o enquadramento dos corpos d'água em classes tem importância para se estabelecer um sistema de vigilância sobre os níveis de qualidade das águas dos mananciais. Os autores ressaltam que o enquadramento é o elo de ligação entre a gestão de quantidade e a gestão da qualidade da água.

3.1.1.3 Resolução CNRH N°16, de 8 de maio de 2001

A Resolução nº 16/2001 do CNRH estabelece critérios gerais para outorga de direito de uso de recursos hídricos. No *caput* do Art. 12, essa Resolução determina que a outorga deverá observar os planos de recursos hídricos. No caso do lançamento de efluentes, o inciso II do mesmo artigo estabelece que a outorga será concedida observando-se a classe em que o corpo de água estiver enquadrado, em consonância com a legislação ambiental. Os parágrafos 1º e 2º do mesmo artigo estabelecem que as vazões e os volumes outorgados poderão ficar indisponíveis, total ou parcialmente, para outros usos no corpo de água, considerando o balanço hídrico e a capacidade de autodepuração para o caso de diluição de efluentes e, ainda, que a vazão de diluição poderá ser destinada a outros usos no corpo de água, desde que não agregue carga poluente adicional.

O Art. 15 determina que a outorga de direito de uso de Recursos Hídricos para o lançamento de efluentes será concedida em quantidade de água necessária para a diluição da carga poluente, que pode variar ao longo do prazo de validade da outorga, com base nos padrões de qualidade da água correspondentes à classe de enquadramento do respectivo corpo receptor e/ou em critérios específicos definidos no correspondente plano de recursos hídricos ou pelos órgãos competentes.

O Art. 16 estabelece as informações mínimas que devem estar contidas no requerimento de outorga de uso de recursos hídricos. No caso de lançamento de efluentes, essas informações são:

- a) Vazão máxima instantânea e volume diário a ser lançado no corpo de água receptor e regime de variação do lançamento;
- b) Concentrações e cargas de poluentes físicos, químicos e biológicos.

Por fim, no Art. 31 da mesma Resolução é determinada a necessidade de monitoramento da vazão de lançamento de efluentes e de sua qualidade, com o encaminhamento à autoridade outorgante dos dados observados ou medidos, na forma preconizada no ato da outorga.

3.1.1.4 Resolução da Agência Nacional das Águas - ANA N° 219, de 06 de junho de 2005

A Resolução estabelece diretrizes para análise e emissão de outorga para fins de lançamento de efluentes e determina que, para análise dos pedidos de outorga para lançamento de efluentes em corpos d'água de domínio da União, a ANA analisará os parâmetros: temperatura, DBO e, em locais sujeitos a eutrofização, fósforo e nitrogênio.

3.1.1.5 Resolução do Conselho Nacional de Meio Ambiente – CONAMA N° 357, de 18 de março de 2005

O controle da qualidade dos corpos d'água, em função do uso, envolve atividades de controle da poluição. Desta forma, quando fatores de qualidade devem ser mensurados por fatores econômicos e pelos usos previstos, dois conceitos tornam-se importantes (CETESB, 1976):

- a) Padrões de qualidade: aplicam-se às regras, princípios ou medidas, estabelecidas por autoridade competente, visando objetivos atingíveis dentro de um certo prazo.
- b) Critérios de qualidade: são os meios pelos quais torna-se possível julgar a adequabilidade das águas aos usos previstos. Tais critérios devem, então, dar subsídio ao estabelecimento dos padrões.

A resolução CONAMA N° 357/05, constituinte do arcabouço legal da gestão ambiental brasileira, que veio em substituição à resolução CONAMA N° 20/86, dispõe sobre a classificação e diretrizes ambientais para o enquadramento de corpos d'água superficiais e estabelece as condições e padrões de lançamento.

A mesma resolução estabelece a classificação das águas doces, salobras e salinas do Território Nacional. Para as águas doces são estabelecidas 5 classes (classe especial e classes 1 a 4), 4 classes para as águas salinas (classe especial e classes 1 a 3) e 4 classes para as águas salobras (classe especial e classes 1 a 3). Para cada uma das classes são determinados os usos preponderantes e os limites máximos para as concentrações de diversos parâmetros de qualidade que deverão ser mantidos nos corpos de água ao longo de todo o tempo. Da mesma forma, são estabelecidas as condições que devem ser atendidas pelos efluentes de qualquer fonte poluidora para que possam ser lançados direta ou indiretamente nos corpos de água. A

classe 2 abrange os corpos d'água não enquadrados, desta forma, a maioria dos corpos d'água brasileiros está classificada como Classe 2, salvo se estiver em condições melhores.

Em resumo, a referida Resolução estabelece duas condições a serem observadas na análise para autorizar o lançamento de efluentes. A primeira, definida no Art. 24, é a exigência da verificação dos padrões de qualidade do efluente quanto ao atendimento aos limites máximos possíveis de lançamento. A segunda define os padrões de qualidade da água resultante da mistura do efluente com o corpo de água, que deve atender aos limites estabelecidos para a classe em que se enquadra o corpo d'água. Esta segunda condição é definida no Art. 28, que estabelece que os efluentes não poderão conferir ao corpo receptor características em desacordo com as metas progressivas propostas pelos comitês de bacias.

O Art. 10 da resolução CONAMA Nº 357/05 apresenta um avanço em relação à resolução CONAMA Nº 20/86, visto que define que os valores máximos estabelecidos para os parâmetros em cada uma das classes deverão ser atendidos na vazão de referência. Desta maneira, flexibiliza a escolha da vazão, anteriormente fixada como sendo a $Q_{7,10}$, e permite que estudos possam ser feitos para a sua escolha em função da realidade local e das prioridades estabelecidas nos planos de bacia.

Outra importante mudança da Resolução Nº 357/2005 consta do capítulo Diretrizes Ambientais para o Enquadramento, que, no seu parágrafo segundo, define que em bacias hidrográficas em que a condição de qualidade dos corpos de água esteja em desacordo com os usos preponderantes pretendidos, metas intermediárias e final deverão ser estabelecidas, buscando a melhoria da qualidade das águas para a efetivação do enquadramento.

O Quadro 3.1 apresenta as principais legislações relativas ao tema no âmbito Federal.

Quadro 3.1 – Resumo da legislação pertinente à outorga para lançamento no âmbito Nacional

Lei	Dispõe sobre	Comentário
Lei 9433/97 de 8 de janeiro de 1997	A Política Nacional de Recursos Hídricos	Estabelece diretrizes gerais para a implementação da Política Nacional de Recursos Hídricos, fundamentando-se em uma gestão descentralizada e participativa. Prevê instrumentos de gestão para operacionalização da política, no qual salienta-se a outorga de direito de uso dos Recursos Hídricos e a outorga para lançamento de efluentes. A gestão de recursos hídricos busca a compatibilização dos aspectos quantitativos aos qualitativos.
Resolução CNRH nº 12 de 19 de julho de 2000	Dispõe sobre enquadramento de corpos d'água	Estabelece que o enquadramento, instrumento de planejamento da Política Nacional de Recursos Hídricos, que define classes aos corpos d'água em função do uso a que se destina, deve ser proposto pela Agência de Bacia do respectivo comitê. É um dos parâmetros de maior importância a ser utilizado na análise dos pedidos de outorga para lançamento de efluentes, onde cabe aos órgãos gestores de recursos hídricos considerar nas análises dos pedidos de outorga o enquadramento de corpos de água para que sejam mantidos os padrões de qualidade determinados.
Resolução CNRH nº 16 de 8 de maio de 2001	Dispõe sobre a outorga de direito de uso de recursos hídricos	Estabelece diretrizes gerais para outorga de direito de uso de recursos hídricos. Em relação à modalidade lançamento de efluentes estabelece que a outorga será concedida observando-se a classe em que o corpo de água estiver enquadrado, em consonância com a legislação ambiental. As vazões e os volumes outorgados poderão ficar indisponíveis, total ou parcialmente, para outros usos no corpo de água, considerando o balanço hídrico e a capacidade de autodepuração para o caso de diluição de efluentes e, ainda, que a vazão de diluição poderá ser destinada a outros usos no corpo de água, desde que não agregue poluente adicional. Por fim, determina que a outorga de direito de uso da água para o lançamento de efluentes será dada em quantidade de água necessária para a diluição da carga poluente e o requerimento deverá conter no mínimo a vazão máxima instantânea do lançamento e concentrações e cargas de poluentes físicos, químicos e biológicos.
Resolução CNRH nº 219 de 06 de junho de 2005	Dispõe sobre outorga de lançamento de efluentes	Estabelece diretrizes para análise e emissão de outorga para fins de lançamento de efluentes e resolve que para análise dos pedidos de outorga para lançamento de efluentes em corpos d'água do domínio da União, a ANA analisará os parâmetros: temperatura, DBO e em locais sujeitos a eutrofização, fósforo e nitrogênio.
Resolução CONAMA 357/2005 de 18 de março de 2005	Dispõe sobre a classificação dos corpos d'água, diretrizes ambientais para o seu enquadramento e estabelece procedimentos e padrões para lançamento de efluentes	Estabelece os padrões de qualidade e termos de padrões de lançamento e padrões do corpo receptor. Os padrões de lançamento são constituídos por parâmetros e seus respectivos limites. Para cada uma das classes são determinados os usos preponderantes e os limites máximos para as concentrações de diversos parâmetros de qualidade que deverão ser mantidas nos corpos de água ao longo de todo o tempo, para uma determinada vazão de referência. Prevê ainda o estabelecimento de metas obrigatórias, intermediárias e final de melhoria de qualidade das águas para efetivação do enquadramento.

3.1.2 Legislação do Estado de Minas Gerais

3.1.2.1 Lei Nº 13.199, de 29 de Janeiro de 1999

Estabelece os usos sujeitos a outorga. Segundo o inciso III do Art. 18, está sujeito à outorga de direito de uso de recursos hídricos o lançamento de esgotos e demais efluentes líquidos ou gasosos, tratados ou não, com o fim de sua diluição, transporte ou disposição final em um corpo d'água. Segundo o Art. 19 da mesma lei, a outorga de direito de uso de recursos hídricos deve respeitar as prioridades de uso estabelecidas nos Planos Diretores de Recursos Hídricos de Bacias Hidrográficas, a classe em que o corpo de água estiver enquadrado e a manutenção de condições adequadas ao transporte hidroviário, quando for o caso.

A lei estabelece a cobrança pelo uso de recursos hídricos. Para a fixação dos valores a serem cobrados pelo uso de recursos hídricos, deverão ser observados, para os lançamentos de efluentes, o volume lançado e seu regime de variação, além de suas características físico-químicas.

O Conselho Estadual de Recursos Hídricos de Minas Gerais – CERH-MG, cujas competências são definidas pelo Art. 41 da Lei Nº 13.199/99, é o órgão deliberativo e normativo central do Sistema Estadual de Gerenciamento de Recursos Hídricos de Minas Gerais – SERGH-MG. Dentre outras, o Conselho tem a competência de estabelecer os critérios e as normas gerais para a outorga dos direitos de uso de recursos hídricos.

3.1.2.2 Decreto Nº 41.578, de 08 de Março de 2001

O inciso II do Art. 6º desse Decreto define que o CERH-MG estabelecerá, mediante deliberação normativa, os critérios e normas gerais atinentes à outorga de direito de uso de recursos hídricos, estando aí incluída aquela referente ao lançamento de efluentes.

No Art. 7º fica estabelecido que em matérias como enquadramento de corpos d'água, licenciamento de atividades que impactarem as coleções hídricas e outorgas para empreendimento de grande porte, o Conselho Estadual de Recursos Hídricos e o Conselho de Política Ambiental, sob a coordenação da Secretaria Estadual de Meio Ambiente e

Desenvolvimento Sustentável, estabelecerão mediante deliberação conjunta, critérios e normas gerais.

O Art. 20 estabelece que a gestão de recursos hídricos, no âmbito do SEGRH-MG, dar-se-á mediante a adoção de parâmetros e ações integradas voltadas para prevenir, mitigar ou reparar o lançamento nos corpos hídricos de esgotos urbanos domésticos, industriais e demais efluentes, sem tratamento adequado.

Conforme o Art. 35, a outorga de direito de uso de recursos hídricos respeitará as metas de qualidade e quantidade estabelecidas nos Planos Estaduais e Diretores de Recursos Hídricos e a classe em que o corpo d'água estiver enquadrado.

De acordo com o inciso II do Art. 38, o processo de outorga será regulamentado pelo CERH-MG, mediante proposta do Instituto Mineiro de Gestão das Águas - IGAM, devendo ser observados os critérios de outorga de lançamento de efluentes, considerando a capacidade de autodepuração do corpo d'água receptor, visando especialmente as inter-relações com o enquadramento dos corpos d'água e a articulação com os processos de licenciamento ambiental.

3.1.2.3 Portaria do Instituto Mineiro de Gestão das Águas – IGAM N° 010, de 30 de dezembro de 1998

Essa Portaria regulamenta os procedimentos de outorga do IGAM. Dentre as modalidades de usos ou obras sujeitas à outorga de direito de uso de recursos hídricos está o lançamento de efluentes em corpos de água, conforme previsto no seu Apêndice II.

Segundo o Art. 10, a análise técnica para outorga de lançamento de efluentes deve considerar as vazões dos corpos de água, que receberem lançamentos de efluentes, e desta forma se tornam comprometidas com a diluição de cargas de poluentes, como uso consuntivo. Observa-se porém que deve-se distinguir os poluentes “conservativos” e “não conservativos”. Nos parágrafos 1º e 2º é definida a previsão legal específica para disciplinamento das outorgas para lançamento de efluentes e que, para distinção dos poluentes, serão considerados os enquadramentos em classe de uso preponderante dos corpos de água e os padrões de lançamento determinados pela legislação ambiental pertinente.

3.1.2.4 Deliberação Normativa - DN do Conselho de Política Ambiental - COPAM N° 10, de 16 de dezembro de 1986

Em Minas Gerais, a DN n° 10/86 estabelece normas e padrões para qualidade das águas e lançamento de efluentes nas coleções de águas. Os padrões de lançamento são atribuídos em função da classe do corpo d'água e são constituídos por parâmetros e seus respectivos limites. Os padrões do corpo receptor por sua vez são estabelecidos baseados em critérios científicos que avaliam o risco para uma dada vítima (*sic*) e o dano causado pela exposição a uma dose conhecida de um determinado poluente (Nascimento e von Sperling, 1999).

São definidas 5 classes de águas doces segundo seus usos preponderantes. Para cada uma dessas classes são estabelecidas, nos Art. 3º a 7º, as concentrações máximas para diversos parâmetros de qualidade da água e que deverão ser mantidas no corpo de água ao longo de todo o tempo.

A mesma DN estabelece, em seu Art. 15, os limites para as concentrações dos parâmetros de qualidade dos lançamentos de efluentes possíveis de serem autorizados. Para o lançamento de efluentes, são estabelecidos os limites de concentrações de poluentes listados na norma, como por exemplo, DBO, DQO e Sólidos em suspensão dentre outros.

Sendo assim, para todos os lançamentos de efluentes, devem ser seguidos dois critérios:

1. Os lançamentos realizados não podem alterar os limites de padrões de qualidade estabelecidos para as respectivas classes, conforme Art. 3º a 7º;
2. Os lançamentos devem estar enquadrados nos limites dispostos no Art. 15:
 - a) DBO: no máximo de 60 mg/L (este limite só poderá ser ultrapassado no caso do sistema de tratamento de águas residuárias reduzir a carga poluidora de efluente, em termos de DBO₅ a 20° C do despejo em, no mínimo, 85%);
 - b) DQO máximo: 90 mg/L.

Conforme o Art. 12, para as águas enquadradas na classe especial, não são tolerados lançamentos de águas residuárias, domésticas e industriais, lixo e outros resíduos sólidos, substâncias potencialmente tóxicas, defensivos agrícolas, fertilizantes químicos e outros

poluentes, mesmo tratados. Os corpos de água que têm suas águas enquadradas entre as classes 1 a 4 devem seguir os dois critérios apresentados anteriormente.

O Art. 16 estabelece que, para o lançamento, não será permitida a diluição de efluentes industriais com águas não poluídas, tais como água de abastecimento e água de refrigeração.

Nos termos do Art. 17, os efluentes não poderão conferir ao corpo receptor características em desacordo com o seu enquadramento. E determina ainda que, resguardados os padrões de qualidade do corpo receptor, demonstrados por estudo de impacto ambiental realizado pela entidade responsável pela emissão, o COPAM poderá autorizar lançamentos acima dos limites estabelecidos no Art. 15, fixando o tipo de tratamento e as condições para esse lançamento.

É importante salientar que essa deliberação normativa é anterior a Resolução CONAMA N^o 357/2005, e que existe um grupo instituído pela Secretaria Estadual de Meio Ambiente e Desenvolvimento Sustentável do Estado de Minas Gerais que está em fase final de proposição de uma nova deliberação, adequando aos novos conceitos apresentados pela Resolução CONAMA N^o 357/2005.

Foram editadas, ainda, três outras Deliberações Normativas do COPAM que alteram a DN n^o 010/86.

a) A DN n^o 32/98 altera o limite para o lançamento de DQO, sendo permitida a concentração máxima de 90 mg/L (limite que só poderá ser ultrapassado no caso do sistema de tratamento de águas residuárias reduzir a carga poluidora de efluente, em termos de DQO do despejo em, no mínimo, 90%);

b) A DN n^o 46/2001 estabelece alteração no limite de eficiência de remoção de DBO e DQO para sistemas de tratamento de esgotos domésticos e de percolado de aterros sanitários municipais. Para os lançamentos realizados, direta ou indiretamente, nos corpos de água pelos sistemas de tratamento de esgotos domésticos e de chorume de lixo de aterros sanitários municipais, a DN n^o 46/2001 exige que os valores de DBO₅ a 20°C e de DQO devam ser inferiores a 60 mg/L e 90 mg/L, respectivamente. Os limites só poderão ser ultrapassados quando o estudo de autodepuração comprovar que os efluentes não conferem ao corpo

receptor características em desacordo com o seu enquadramento, assim mesmo se o sistema de tratamento reduzir a carga poluidora dos efluentes, em termos de DBO₅ a 20°C e de DQO em, pelo menos, 60%.

c) A DN nº 47/2001 estabelece novo limite de concentração de DQO para lançamento de efluentes líquidos, gerados pelas indústrias têxteis, direta ou indiretamente, nos corpos de água. Para essas indústrias, o limite máximo de concentração de DQO para os lançamentos líquidos será de no máximo 250 mg/L. A mesma DN fixa um prazo máximo de 5 anos para reavaliação desse padrão. Caso não seja realizada a nova avaliação no prazo previsto, o limite máximo da concentração de lançamento passará para 90 mg/L.

O Quadro 3.2 resume as principais legislações ligadas ao tema no âmbito estadual

Quadro 3.2 – Resumo da legislação pertinente à outorga para lançamento no âmbito Estadual

Legislação	Dispõe sobre	Comentário
Lei Nº 13.199/99, de 29 de janeiro de 1999	A Política Estadual de recursos Hídricos	Estabelece, no âmbito estadual, os usos sujeitos a outorga, inclusive para fins de lançamento em corpo de água de esgotos e demais efluentes líquidos ou gasosos, tratados ou não, com o fim de sua diluição, transporte ou disposição final, devendo respeitar as prioridades de uso estabelecidas nos Planos Diretores de Recursos Hídricos de Bacias Hidrográficas, a classe em que o corpo de água estiver enquadrado.
Decreto Nº 41.578/01, de 08 de março de 2001	Regulamentação da Política Estadual de Recursos Hídricos	Define como atribuição do Conselho Estadual de Recursos Hídricos estabelecer, mediante deliberação normativa, os critérios e normas gerais atinentes à outorga de direito de uso de recursos hídricos, mediante proposta do IGAM, devendo ser observados para critérios de outorga de lançamento de efluentes, a capacidade de autodepuração do corpo d'água receptor, visando especialmente as inter-relações com o enquadramento dos corpos d'água e a articulação com os processos de licenciamento ambiental.
Portaria IGAM Nº 010/98, de 30 de dezembro de 1998	Estabelecimento de procedimentos e critérios para a outorga no Estado de MG	Estabelece que deve-se considerar como derivação consuntiva, as vazões dos corpos de água, que receberem lançamentos de efluentes estando estas vazões comprometidas com a diluição de cargas de poluentes, distinguindo-se, todavia, em classes de poluentes “conservativos” e “não conservativos”. Prevê legislação específica para disciplinamento das outorgas para lançamento de efluentes e que, para distinção dos poluentes, serão considerados os enquadramentos em classe de uso preponderante dos corpos de água e os padrões de lançamento determinados pela legislação ambiental pertinente.
DN COPAM Nº 10/86, de 16 de dezembro de 1986	Estabelecimento de normas e padrões para qualidade das águas, lançamento de efluentes nas coleções de águas Estaduais	<p>Estabelece normas e padrões para qualidade das águas e lançamento de efluentes nas coleções de águas.</p> <p>São definidas cinco classes de águas segundo seus usos preponderantes, para cada uma das quais são estabelecidas as concentrações máximas para diversos parâmetros de qualidade da água e que deverão ser mantidas no corpo de água ao longo de todo o tempo.</p> <p>Estabeleceu limites para as concentrações dos parâmetros de qualidade dos lançamentos de efluentes possíveis de serem autorizados. Para o lançamento de efluentes, são estabelecidos os limites de concentrações dos seguintes poluentes: pH, temperatura, materiais sedimentáveis, óleos e graxas, materiais flutuantes, DBO_{5,20} e DQO.</p> <p>Por fim, estabelece que os efluentes não poderão conferir ao corpo receptor características em desacordo com o seu enquadramento.</p>

3.2 Metodologias de concessão de outorga para lançamento no Brasil

No Brasil, apenas a Superintendência de Recursos Hídricos do Estado da Bahia e a ANA empregam como critérios de outorga para lançamento de efluentes os aspectos qualitativos e a capacidade de autodepuração do corpo d'água. A maior parte dos Estados não concede outorga para esta finalidade.

3.2.1 Agência Nacional das Águas

A metodologia adotada pela Agência Nacional das Águas para a quantificação dos impactos qualitativos do lançamento de efluentes, está apoiada em conceitos propostos por Kelman (1997). A metodologia baseia-se na “transformação” de interferências qualitativas no corpo hídrico em equivalentes quantitativos. O autor justifica o procedimento por facilitar as análises dos pleitos de outorga que realizam lançamento de efluentes, unificando, dessa forma, as análises quantitativas e qualitativas pertinentes. Segundo Cardoso da Silva e Monteiro (2004), o balanço de massa pode ser expresso por 3.1:

$$C_{mistura} = \frac{C_a.Q_a + C_b.Q_b}{Q_a + Q_b} \quad (3.1)$$

onde:

C_a = concentração de um determinado parâmetro de qualidade no efluente **a** (mg/L);

Q_a = vazão do efluente **a** (m³/s);

C_b = concentração de um determinado parâmetro de qualidade no efluente **b** (mg/L);

Q_b = vazão do efluente **b** (m³/s);

$C_{mistura}$ = concentração de um determinado parâmetro na mistura resultante dos efluentes **a** e **b** (mg/L).

Modificando-se 3.1 convenientemente, é possível expressar o balanço qualitativo por 3.2, denominada Equação de Diluição, proposta por Kelman (1997):

$$Q_{dil} = Q_{ef} \cdot \frac{(C_{ef} - C_{perm})}{(C_{perm} - C_{man})} \quad (3.2)$$

onde:

Q_{dil} = vazão de diluição para determinado parâmetro de qualidade (m^3/s);

Q_{ef} = vazão do efluente que contém o parâmetro de qualidade analisado (m^3/s);

C_{ef} = concentração do parâmetro de qualidade no efluente (mg/L);

C_{perm} = concentração permitida do parâmetro de qualidade no manancial onde é realizado o lançamento (mg/L);

C_{man} = concentração natural do parâmetro de qualidade no manancial onde é realizado o lançamento (mg/L).

A vazão de diluição (Q_{dil}) é a vazão necessária para diluir determinada concentração (C_{ef}) de dado parâmetro de qualidade, de modo que a concentração resultante ($C_{mistura}$) seja igual à concentração permitida (C_{perm}); ou seja, a vazão de diluição é “apropriada” virtualmente por um usuário para diluir um determinado poluente que conste do efluente lançado. Desta forma, esta vazão torna-se indisponível para diluição do poluente.

A vazão de diluição é a média ponderada das concentrações com as respectivas vazões dos dois componentes que se misturam: rio-esgoto, afluente-rio etc (von Sperling, 2004).

A vazão indisponível no ponto de lançamento (Q_{indisp}) é dada pela Equação 3.3:

$$Q_{indisp} = Q_{dil} + Q_{ef} \quad (3.3)$$

onde:

Q_{dil} = vazão de diluição para determinado parâmetro de qualidade (m^3/s);

Q_{ef} = vazão do efluente que contém o parâmetro de qualidade analisado (m^3/s).

Na metodologia adotada pela ANA, admite-se sempre que o manancial receptor do efluente está na condição natural de concentração do parâmetro de qualidade (C_{man}) em estudo. Segundo Klein (1962), *apud* von Sperling (2005), um rio bastante limpo possui uma demanda

bioquímica de oxigênio (DBO) natural de, aproximadamente, 1,0 mg/L, decorrente da matéria orgânica oriunda de folhas e galhos de árvore, peixes mortos, fezes de animais, etc. Para os parâmetros fenol, mercúrio e arsênio a concentração natural no manancial é nula. A metodologia proposta pela ANA considera a DBO do corpo d'água igual a 1,0 mg/L. Os autores justificam a adoção desta condição inicial a fim de avaliar o quanto cada usuário comprometerá qualitativamente o manancial em termos absolutos, de forma independente e sem a interferência de outros usuários e de sua localização na bacia, buscando desta forma atribuir o mesmo peso a usuários que lancem efluentes com as mesmas características quantitativas e qualitativas, independente da época de sua instalação.

A verificação final proposta é a comparação do valor da vazão indisponível total de determinado parâmetro de qualidade, com a vazão remanescente (*Q_{reman}*), ou seja, a vazão que resta no manancial após todas as interferências quantitativas.

A resolução ANA 219/2005 obriga a análise, para esta modalidade de outorga, dos parâmetros: temperatura, DBO e em locais sujeitos a eutrofização, fósforo e nitrogênio.

O cálculo da vazão indisponível (*Q_{indisp_n}*) para DBO, apresentada por Cardoso da Silva e Monteiro (2004), em qualquer trecho a jusante do lançamento é dado pela Equação 3.4 a seguir:

$$Q_{indisp_n} = \frac{(Q_{ef} + Q_{dil_1}) \cdot C_{perm_1} \cdot e^{-K_1 \cdot T}}{C_{perm_n}} \quad (3.4)$$

onde:

Q_{dil₁} = vazão de diluição no trecho onde ocorre o lançamento (m³/s);

Q_{ef} = vazão do efluente (m³/s);

K₁ = coeficiente de desoxigenação (dia⁻¹);

T = tempo de percurso do trecho onde ocorre o lançamento até o trecho onde se quer calcular a vazão indisponível (d);

C_{perm_1} = concentração permitida de DBO para o manancial no trecho onde ocorre o lançamento (mg/L);

C_{perm_n} = concentração permitida de DBO para o manancial no trecho onde se quer calcular a vazão indisponível (mg/L).

Para o parâmetro temperatura a análise é realizada segundo a Equação 3.5, baseada também na equação da mistura (3.1), cumprindo a exigência imposta pela Resolução 357/2005, segundo o inciso II do §4º do Art. 34, qual seja: os lançamentos de efluente não poderão ter temperatura superior a 40°C e não poderão causar elevação de mais de 3°C na temperatura do corpo hídrico receptor.

$$Q_{indisp_n} = \frac{(Q_{ef} + Q_{dil_1}) \cdot \{[(T_{perm_1} + T_{man_1}) \cdot e^{-Kr \cdot Tempo} + T_{man_1}] - T_{man_n}\}}{T_{perm_1} - T_{man_1}} \quad (3.5)$$

onde:

Q_{ef} = vazão do efluente (m³/s);

T_{man_1} = temperatura do corpo d'água no ponto de lançamento (natural) (°C);

T_{perm_1} = temperatura máxima permitida para o corpo d'água no ponto de lançamento (°C);

T_{man_n} = temperatura natural do manancial – trecho **n** de jusante(°C);

T_{perm_n} = temperatura máxima permitida no manancial - trecho **n** de jusante.

Sendo a vazão de diluição, Q_{dil} , dada pela Equação 3.6.

$$Q_{dil_1} = Q_{ref} \cdot \frac{(T_{ef} - T_{perm_1})}{(T_{perm_1} - T_{man_1})} \quad (3.6)$$

onde:

T_{ef} = temperatura do efluente (°C);

T_{man_1} = temperatura do corpo d'água no ponto de lançamento (natural) (°C);

T_{perm_1} = temperatura máxima permitida para o corpo d'água no ponto de lançamento (°C).

3.2.2 Superintendência de Recursos Hídricos do Estado da Bahia – SRH-BA

A outorga de lançamento no Estado da Bahia é concedida utilizando-se a equação de Streeter-Phelps, método que permite calcular a carga máxima de DBO nos esgotos, para que a concentração mínima de OD seja igual à mínima permissível. Tal modelo permite ainda descrever o aumento e o decréscimo seguinte do déficit de oxigênio a jusante de uma fonte poluidora. A vazão do rio utilizada na simulação é 20% da Q_{90} , ou seja, considera-se a vazão remanescente uma vez que o critério adotado nesse Estado para captação é o máximo de 80% da mesma vazão.

O órgão gestor conta com a Norma Técnica-NT002 aprovada pela Resolução CEPRAM 2288, de 28 de abril de 2000, que estabelece os padrões de lançamento para efluentes sanitários nos corpos hídricos, situados na Região Metropolitana de Salvador - RMS e demais municípios do Estado da Bahia. A Norma define que os empreendimentos imobiliários habitacionais serão enquadrados em função do padrão de renda familiar e de interesse social, de acordo com as seguintes categorias:

- I - Construções imobiliárias habitacionais destinadas a famílias com renda mensal de 0 até 12 salários mínimos;
- II - Construções imobiliárias habitacionais destinadas a famílias com renda mensal superior a 12 salários mínimos;
- III - Reurbanização de áreas carentes, tais como: melhorias habitacionais, implantação de infra-estrutura urbana e equipamentos comunitários;

Os sistemas de tratamentos adotados para as categorias I e III deverão apresentar, no mínimo, os seguintes índices de eficiência: 80% de remoção DBO, 70% de remoção de material sólido e redução de coliformes fecais de 10^7 para 10^6 NMP/100 mL. Para a categoria II: 95% de remoção de DBO, 90% de remoção de MS e redução de coliformes fecais de 10^7 para 10^6 NMP/100 mL.

Os empreendimentos imobiliários habitacionais deverão requerer da Superintendência de Recursos Hídricos – SRH-BA a outorga para o lançamento de seus efluentes, quando lançados em corpos hídricos.

Os efluentes finais dos empreendimentos imobiliários habitacionais que estiverem situados em bacias hidrográficas utilizadas como mananciais para abastecimento público, deverão apresentar os teores limites estabelecidos pela Resolução CONAMA nº 20/86, para corpos d'água Classe 2. Nesse caso, não sendo possível o cumprimento dessa exigência, o empreendimento deverá apresentar projeto incluindo a reversão de bacia, para lançamento em outro corpo receptor visando atender aos padrões.

3.2.3 Instituto Estadual de Meio Ambiente do Estado do Espírito Santo – IEMA-ES

No Estado do Espírito Santo, os critérios para outorga de lançamento de efluentes estão disciplinados pela Instrução Normativa 007 de 21 de junho de 2006. A outorga para lançamento será concedida utilizando-se o conceito de vazão de diluição, ou seja, a vazão necessária para diluição dos efluentes lançados, considerando-se o enquadramento.

Na referida Instrução Normativa existe uma ressalva para empreendimentos de aquicultura, cujas estruturas de cultivo localizem-se no corpo d'água, para os quais a outorga será concedida considerando-se o volume e a área ocupados pela estrutura de cultivo, assim como a quantidade e o teor de fósforo utilizados na ração, que conseqüentemente reflete a carga diária de fósforo produzida pelo empreendimento.

A vazão de referencia utilizada pelo IEMA é a $Q_{7,10}$, e para fins de outorga para lançamento o limite máximo é fixado em 50% do seu valor, sendo que cada usuário individualmente não pode ultrapassar 25% da $Q_{7,10}$.

O parâmetro utilizado na análise é a Demanda Bioquímica de Oxigênio (DBO) e, para lançamentos em lagos e reservatórios ou a montante dos mesmos, fósforo.

3.2.4 Departamento de Águas e Energia Elétrica do Estado de São Paulo – DAEE-SP

Em São Paulo, o DAEE-SP, órgão gestor de recursos hídricos do Estado de São Paulo, decide a outorga com base na vazão lançada e considera que a análise efetuada pela CETESB para o licenciamento ambiental é suficiente para a avaliação do impacto do lançamento de efluentes.

3.2.5 Fundação Estadual de Proteção Ambiental do Rio Grande do Sul – FEPAM-RS

No Rio Grande do Sul, a outorga é concedida pelo órgão ambiental, FEPAM-RS, de acordo com o parágrafo II do Art. 29 da Lei Estadual 10.350/94. A licença de operação é considerada como a outorga de lançamento de efluentes.

3.2.6 Superintendência de Desenvolvimento de Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental – SUDERHSA-PR

A SUDERHSA, órgão gestor de recursos hídricos do Estado do Paraná, possui um manual que define procedimentos e a metodologia a ser utilizada para outorga de lançamento, baseado na metodologia utilizada pela ANA. O manual prevê ainda, no caso de corpos d'água muito poluídos, como aqueles da Região Metropolitana de Curitiba, que os valores limites de concentração do lançamento (C_{limi}) poderão ser fixados pela SUDERHSA e aprovados pelo Comitê de Bacia. No entanto, a outorga para lançamentos de efluentes não é concedida.

3.2.7 Órgãos gestores de recursos hídricos de outros estados da Federação

Segundo Lopes et al (2005), o Estado da Paraíba possui critérios para outorga de lançamento de efluentes, mas ainda não concedeu nenhuma outorga com essa finalidade. Nos estados do Ceará, Goiás, Minas Gerais, Rio Grande do Norte, e Tocantins, os critérios de outorga ainda estão em fase de estudos.

3.2.8 Outras metodologias

A literatura nacional sobre outorga para lançamento de efluentes é muito escassa. Analogamente aos critérios da ANA, Kelman (1997), *apud* Machado *et al* (2003), descreveram uma metodologia para outorga de lançamento de efluentes, que considera a

apropriação de uma parcela da vazão de um corpo d'água (vazão indisponível), quando um usuário efetua um lançamento, para que esse seja diluído ou assimilado.

Ribeiro e Lanna (2003) propõem a seguinte metodologia para outorga, com base na vazão de diluição:

- a) Identificação dos efluentes lançados em cada ponto de controle;
- b) Identificação da vazão máxima permitida pelo enquadramento para o trecho do rio onde se localiza o ponto de controle;
- c) Cálculo da vazão necessária para diluir a carga lançada de forma que seja obedecida a concentração máxima permitida pelo enquadramento no trecho em análise;
- d) Definição de critérios de racionamento para situação em que a vazão disponível não é suficiente para as demandas.

Rodrigues (2000) desenvolveu um modelo intitulado RM1, que se baseia no modelo computacional QUAL2E (EPA, 1987). Tal modelo considera as características físicas do corpo receptor, sua capacidade de autodepuração, a capacidade de sedimentação do poluente no sistema, a classe do rio e seu regime de vazão, a vazão do lançamento e a respectiva concentração do poluente e a retirada do poluente pelas captações efetuadas, excluindo a massa de poluente já existente no sistema.

A Equação 3.7 é proposta para parâmetros não conservativos.

$$Q_{diluição}(x) = \left[\frac{C_k \text{ depois}(x) - C_k \text{ antes}(x)}{C_k(x)} \right] \cdot [Q_{rio}(x) + Q_{efl}] \quad (3.7)$$

onde:

$Q_{diluição}(x)$ = vazão de diluição do poluente requerida ao longo do rio, referente apenas ao lançamento do usuário a montante considerado (m^3/s);

$C_k \text{ depois}(x)$ = concentração do poluente no corpo receptor após o lançamento (mg/L);

$C_k \text{ antes}(x)$ = concentração do poluente no corpo receptor antes do lançamento (mg/L);

$Q_{rio}(x)$ = vazão do corpo receptor (m^3/s);

Q_{efl} = vazão do efluente lançado (m^3/s);

$C_k(x)$ = concentração máxima permissível no corpo receptor (mg/L).

Segundo Rodrigues (2000), *apud* Pereira e Mendonça (2005), a vazão de diluição definida pela Equação 3.7 refere-se à concentração do poluente que está sendo lançado. O decaimento da concentração do lançamento é considerado separadamente do decaimento do poluente que já esteja presente no corpo d'água a montante do lançamento. A concentração do poluente no corpo receptor antes do lançamento (C_k antes(x)) e a concentração do poluente no corpo receptor após o lançamento (C_k depois(x)) são obtidas pela Equação 3.8.

$$C_p(t) = \Delta C_p + (y - \Delta C_p) \cdot e^{\ln\left(\frac{z - \Delta C_p}{y - \Delta C_p}\right) \frac{1}{t_z} t} \quad (3.8)$$

onde:

$C_p(t)$ = concentração do poluente no sistema (mg/L);

ΔC_p = variação da concentração do poluente no tempo dt (mg/L);

y = concentração do poluente no ponto de mistura, obtido pelo QUAL2E (mg/L);

t_z = o tempo requerido pelo sistema para o decaimento da concentração do poluente em z (hora);

t = tempo (hora).

O Quadro 3.3 resume o cenário para concessão das outorgas para fins de lançamento de efluentes no Brasil.

Quadro 3.3 – Fundamentos das metodologias adotadas pelos órgãos gestores no Brasil

Órgão gestor	Previsão legal e Regulamentação	Descrição sucinta da metodologia utilizada
ANA	Lei nº 9433/97, Resolução nº 16/2001, Resolução CNRH nº 219/2005	A metodologia utilizada pela Agência Nacional das Águas, no que concerne à quantificação dos impactos qualitativos do lançamento de efluentes, está apoiada em um conceito onde as interferências qualitativas no corpo hídrico são “transformadas” em equivalentes quantitativos. Tal critério tem como embasamento teórico a equação de balanço de massa ou equação de diluição.
SRH-BA	Lei nº 6855/1995	A outorga é concedida utilizando-se a equação de Streeter Phelps, método que permite calcular a carga máxima de DBO nos esgotos, para que a concentração mínima de OD seja igual à mínima permitível.
IEMA-ES	Instrução Normativa nº 007/2006	A outorga para lançamento é concedida segundo a vazão de diluição. A vazão máxima outorgável para esta finalidade é 50% da $Q_{7,10}$, e o limite por usuário é 25%. O parâmetro analisado será DBO e, para ambientes lênticos e seus afluentes, fósforo.
SUDERHSA-PR		Possui um manual que define procedimentos para outorga, assim como a metodologia a ser utilizada para outorga de lançamento, baseado em premissas da metodologia utilizada pela ANA.
SEMA-RS	Lei nº 10.350/94	A outorga é concedida pelo órgão ambiental, FEPAM, conforme parágrafo II do Art. 29 da Lei estadual 10.350/94. A licença de operação é considerada como a outorga de lançamento de efluentes.
DAEE-SP		O órgão gestor de recursos hídricos do Estado de São Paulo, analisa apenas a parte quantitativa, isto é, a vazão lançada. E considera a análise do órgão ambiental, para o licenciamento ambiental, suficiente para a avaliação do impacto do lançamento de efluentes.
SRH-CE		Em estudo
SEMARH-GO		Em estudo
SERHID-RN		Em estudo
NATURATINS-TO		Em estudo

3.3 Critérios internacionais para lançamento de efluentes

3.3.1 Estados Unidos da América do Norte

Nos Estados Unidos, o *Federal Water Pollution Control Act*, de 1972, inclui uma emenda denominada *Clean Water Act – CWA* que regulamenta e dispõe sobre a gestão dos corpos d’água e é a base para a proteção da qualidade das águas no país.

Segundo Machado *et al* (2003), nos Estados Unidos, a *Environmental Protection Agency* – *EPA* analisa as concentrações dos poluentes presentes no lançamento, conforme limites máximos. Qualquer lançamento é permitido, desde que seja utilizada a melhor tecnologia de tratamento conhecida. Uma vez que não se considera a possibilidade de uso da capacidade assimilativa do corpo d’água, o custo do lançamento é geralmente elevado. Com base nas diretrizes gerais da *EPA*, os estados (americanos) definem os limites de concentrações dos parâmetros do lançamento, assim como as vazões de referência a serem adotadas. As licenças para lançamentos podem ser concedidas individualmente por lançamento ou coletivamente, para um conjunto de descargas.

Nos Estados Unidos, assim como em outros países desenvolvidos, o foco principal recai sobre a poluição difusa, uma vez que o efeito das fontes pontuais já foi em grande parte solucionado. Desta forma, o controle integrado de cargas pontuais e difusas está previsto em um programa denominado “*Total Maximum Daily Load*”, ou *TMDL*, que, segundo vários autores citados por Pereira e Mendonça (2005), pode ser entendido como sendo a estimativa de carga máxima de um poluente que um corpo d’água pode receber sem que os padrões de qualidade da água sejam violados. Na prática, a aplicação do *TMDL* para orientar os processos de autorização de lançamento resulta na proteção do corpo d’água, que tem sua capacidade de assimilação de poluentes preservada para os usos designados. A estimativa do *TMDL* leva em consideração todas as cargas provenientes de fontes de poluição pontuais e difusas e um valor para a margem de segurança devido à incerteza da análise. O *TMDL* é estabelecido para cada parâmetro individualmente. Assim, um corpo d’água pode possuir mais de um *TMDL*. Para execução do programa, o órgão estadual estima a quantidade de um poluente específico que um corpo d’água pode assimilar sem que os padrões de qualidade aplicáveis para o corpo d’água sejam violados e propõe estratégia de alocação desta quantidade permissível entre as diferentes fontes de poluentes. A *EPA* é a autoridade que revê, aprova ou desaprova o *TDML* definido pelos estados.

3.3.2 União Européia

Na Europa, a diretiva 75/400/ECC (União Européia, 1975) referente à qualidade das águas superficiais destinadas à potabilização, referencia a faixa de 3 a 7 mg/L para a DBO,

conforme o tipo de tratamento necessário à potabilização. O oxigênio dissolvido deve ficar na faixa de 30 a 70% do valor de saturação. A diretiva 91/271/ECC (União Européia, 1991) para efluentes urbanos especifica a eficiência mínima de remoção e as concentrações de DBO, DQO e sólidos em suspensão totais nos efluentes. O valor de DBO máximo no efluente segundo essa diretiva é de 25 mg/L.

Na França o sistema é descentralizado e a definição dos padrões é feita por bacia hidrográfica. A Política Brasileira de Recursos Hídricos é baseado no modelo francês, que prevê a existência de comitês e agências de bacias. Tanto na França, quanto no Brasil, as agências são órgãos técnicos no âmbito da bacia de atuação, que têm por atribuição a proposição de padrões, prioridades de uso, valores de cobrança, dentre outros aspectos técnicos da gestão das águas.

A *National Rivers Authority* – *NRA* tem por objetivo a proteção e melhoria contínua das águas na Inglaterra e País de Gales, por meio do controle da poluição. Esse órgão concede autorização para lançamento, semelhantemente à outorga, tal como definida na legislação brasileira. A autorização para lançamento é geralmente baseada no volume e na qualidade do efluente. A autorização é restrita a lançamentos pontuais, ou seja, não se aplica à poluição difusa. A legislação corrente no Reino Unido, consolidada no *Water Resources Act (WRA)*, de 1991, define as competências da *NRA*. O *WRA* diz respeito ao controle da poluição em corpos d'água, delega à Secretaria de estado a definição de Estatutos de classificação dos corpos d'água e ainda estabelece as sanções relativas à poluição das águas. O processo de autorização de lançamento de efluentes considera a localização, a natureza, origem, composição, temperatura, volume e vazão, o período de descarga, e os passos (metas) necessários para minimizar os efeitos potenciais da poluição causada pelo lançamento. Os critérios considerados pela *NRA* nos processos de análise de concessão do lançamento são as metas de qualidade a serem alcançadas para o corpo d'água no qual é realizado o lançamento; ou seja, leva em conta os requisitos de qualidade para um corpo d'água, o que se assemelha ao conceito de enquadramento da legislação brasileira. Para o cálculo numérico das condições de lançamento aprovadas, é utilizado um método baseado na equação de balanço de massa. O *NRA* recomenda considerar modelos que observem os impactos cumulativos dos lançamentos

na bacia hidrográfica, ao invés de se considerar separadamente lançamentos individuais. Em rios e córregos, considera-se a qualidade do lançamento, ou seja, parâmetros de qualidade (concentrações), as vazões do lançamento e do corpo d'água, bem como a qualidade planejada dos córregos e rios (dados de entrada para a equação do balanço de massa). Os procedimentos adotados no Reino Unido incluem ainda uma cobrança pela concessão e monitoramento do lançamento baseada no volume, tipo de lançamento e seus constituintes, e no corpo receptor (superficial, subterrâneo, costeiro ou estuário).

Ainda no âmbito da União Européia foi publicada a *Water Framework Directive*, de 23 de outubro de 2000, que, segundo Pereira e Mendonça (2005), é o principal instrumento da política da União Européia relativa à água. Essa *diretiva* substitui outras anteriores, criadas individualmente na década de 70. A *Water Framework Directive* superou o conceito tradicional de proteção, surgindo como instrumento unificador das normas de recuperação e proteção da qualidade das águas, eliminando as lacunas nas legislações existentes e estabelecendo uma abordagem integrada dos problemas da água.

Os fundamentos da Diretiva são a proteção das águas (rios, lagos, águas costeiras e águas subterrâneas), a definição de objetivo para que seja alcançado o “bom estado” de todas as águas até 2015; a promoção do consumo sustentável da água; a cooperação transfronteiriça entre todos os países e partes envolvidas; a garantia de participação ativa de todos os interessados nas atividades de gestão das águas; a adoção de políticas para estabelecimento do preço da água; a aplicação do princípio do poluidor-pagador; e a ação preventiva. Segundo a Diretiva, as licenças devem ser emitidas pela autoridade competente para valores limites de emissão, e o tratamento deve ser baseado nas melhores técnicas disponíveis. Este critério se assemelha ao adotado pelos Estados Unidos. Os valores limites são definidos por um Conselho pela proposta da comissão da Diretiva, para instalações industriais e cargas poluentes. Os estados-membros devem garantir a disposição adequada das águas residuárias, contemplando, no mínimo, um tratamento secundário. A Diretiva ainda estabelece as porcentagens mínimas de redução da carga efluente das estações de tratamento de águas residuárias, bem como as concentrações máximas para DBO, DQO e sólidos em suspensão, e nitrogênio e fósforo total para zonas propensas a eutrofização.

A Tabela 3.1 apresenta as condições mínimas para efluentes de estações de tratamento de esgoto, segundo a Comunidade Européia.

Tabela 3.1 – Padrões de lançamento para efluentes urbanos da Comunidade Européia

Parâmetro	Limite	Eficiência mínima de remoção
DBO ₅	25 mg/L O ₂	70-90%
DQO	125 mg/L O ₂	75%
Sólidos em suspensão total	35 mg/L	90%
	60 mg/L	70%
	150 mg/L	-

Fonte: von Sperling, 2005

3.4 Modelos matemáticos de qualidade das águas

A definição de uma metodologia adequada à outorga para lançamentos de efluentes passa pela definição prévia do modelo matemático a ser utilizado. Segundo Yassuda *et al* (2000), os modelos numéricos são importantes dispositivos de apoio para tomadas de decisões gerenciais e para a avaliação das correspondentes respostas do sistema sob gerenciamento e, por consequência, são importantes na prescrição de novos rumos.

3.4.1 A equação da mistura

A equação da mistura, utilizada para DBO e oxigênio dissolvido, além de representar o ponto inicial do modelamento matemático de qualidade das águas, no ponto onde a maior parte dos poluentes apresenta sua concentração mais crítica, retrata as condições de diluição disponibilizadas pelo corpo d'água receptor, o que influencia diretamente a capacidade de assimilação do rio (von Sperling, 1995).

O oxigênio dissolvido é uma importante exceção, pelo fato de suas concentrações críticas poderem ocorrer a jusante do ponto de lançamento.

A formulação da equação da mistura é dada por (3.9):

$$C_0 = \frac{Q_r \cdot OD_r + Q_e \cdot OD_e}{Q_r + Q_e} \quad (3.9)$$

onde:

C_0 = concentração inicial de oxigênio, logo após a mistura (mg/L);

Q_r = vazão do rio a montante do lançamento dos despejos (m³/s);

Q_e = vazão de esgotos (m³/s);

OD_r = concentração de oxigênio dissolvido no rio, a montante do lançamento dos despejos (mg/L);

OD_e = concentração de oxigênio dissolvido no esgoto (mg/L).

O cálculo da DBO₅ e da demanda última no rio após a mistura com o despejo é apresentado pelas equações 3.10 e 3.11 a seguir.

$$DBO5_0 = \left(\frac{Q_r \cdot DBO_r + Q_e \cdot DBO_e}{Q_r + Q_e} \right) \quad (3.10)$$

$$L_o = DBO5_0 \cdot K_T \left(\frac{Q_r \cdot DBO_r + Q_e \cdot DBO_e}{Q_r \cdot Q_e} \right) K_T \quad (3.11)$$

onde:

DBO = concentração de DBO₅, logo após a mistura (mg/L);

L_o = demanda última de oxigênio, logo após a mistura (mg/L);

DBO_r = concentração de DBO₅ do rio (mg/L);

DBO_e = concentração de DBO₅ do esgoto (mg/L);

K_T = constante para transformação da DBO₅ a DBO última (DBO_u)(-) (Equação 3.12).

$$K_t = \frac{DBO_u}{DBO_5} = \frac{1}{1 - e^{-5k_1}} \quad (3.12)$$

K_1 = coeficiente de desoxigenação (dia⁻¹)

3.4.2 Modelo de Streeter-Phelps

O modelo de Streeter-Phelps foi desenvolvido em 1925 e, por causa de sua simplicidade conceitual, é até hoje o mais utilizado para a modelagem de DBO e OD, além de servir como base para modelos mais avançados disponíveis atualmente. O modelo QUAL2E, por exemplo, desenvolvido pela *EPA* é o mais conhecido em uma geração relativamente recente e fundamenta-se no modelo de Streeter-Phelps.

O cálculo do perfil do oxigênio dissolvido em função do tempo, para a obtenção da curva de depleção do oxigênio dissolvido segundo o modelo de Streeter-Phelps, considera a desoxigenação e a reaeração atmosférica no balanço do OD.

3.4.2.1 Coeficiente de desoxigenação K_1

A desoxigenação é o processo que ocorre naturalmente no corpo d'água, pelo qual o oxigênio é consumido para estabilização da matéria orgânica. A cinética de reação da matéria orgânica se dá segundo uma reação de primeira ordem. A taxa de oxidação da matéria orgânica é tanto maior, quanto maior for a matéria orgânica disponível.

O coeficiente de desoxigenação K_1 depende das características da matéria orgânica, além da temperatura e da presença de substâncias inibidoras (von Sperling, 2005), e é obtido em condições controladas em laboratório. A Tabela 3.5 apresenta valores médios de K_1 , obtidos em condições de laboratório. O coeficiente de decomposição da DBO no rio, K_d , incorpora os efeitos na decomposição da matéria orgânica pela biomassa suspensa na massa líquida e pela biomassa no lodo de fundo. Os valores de K_d para oxidação da DBO no rio são superiores a valores de K_1 obtidos em laboratório. Isto se explica pelo fato da biomassa que cresce aderida a um meio suporte, como, por exemplo, o lodo de fundo, ser mais efetiva na decomposição de matérias orgânicas que a biomassa dispersa na massa líquida (Chapra, 1997, *apud* von Sperling). A Tabela 3.2 apresenta os valores médios de K_d .

Tabela 3.2 – Valores típicos de K_1 em condições de laboratório e de K_d em condições de campo (base e, 20°C)

Origem	K_1 (laboratório) (dia ⁻¹)	K_d (rio)	
		Rios rasos	Rios profundos
Esgoto bruto concentrado	0,35 – 0,45	0,50 – 1,00	0,35 – 0,50
Esgoto bruto de baixa concentração	0,30 – 0,40	0,40 – 0,80	0,30 – 0,45
Efluente primário	0,30 – 0,40	0,40 – 0,80	0,30 – 0,45
Efluente secundário	0,12 – 0,24	0,12 – 0,24	0,12 – 0,24
Corpo de água com águas limpas	0,08 – 0,20	0,08 – 0,20	0,08 – 0,20

Fonte: von Sperling, 2005

Nota: Rio raso: profundidade inferior a cerca de 1,0 ou 1,5 m;

Rio profundo: profundidade superior a cerca de 1,0 ou 1,5 m.

Segundo EPA (1985), apud von Sperling (2005), e Thomann e Mueller (1987), o valor de K_d pode ser obtido em função de características hidráulicas no corpo d'água, conforme as Equações 3.13, 3.14 e 3.15 descreias a seguir:

- K_d em função da profundidade

$$K_d = 0,3 \left(\frac{H}{2,5} \right)^{-0,434} \quad (\text{para } H \leq 2,5 \text{ m}) \quad (3.13)$$

$$K_d = 0,3 \text{ d}^{-1} \quad (\text{para } H > 2,5 \text{ m}) \quad (3.14)$$

- K_d em função da vazão

$$K_d = 1,80 \times Q^{-0,49} \quad (3.15)$$

onde:

H entre 0,3 e 10 m;

Q entre 0,15 e 250 m³/s.

A temperatura tem influência direta no metabolismo bacteriano e, conseqüentemente, nas taxas de estabilização da matéria orgânica. A relação empírica entre a temperatura e a taxa de desoxigenação, é dada pela Equação 3.16 (von Sperling, 2005), que pode ser utilizada tanto para K_1 , quanto para K_d .

$$K_{1T} = K_{120} \cdot \theta^{(T-20)} \quad (3.16)$$

onde:

K_{1T} = K_1 a uma temperatura T qualquer (d^{-1});

K_{120} = K_1 a uma temperatura $T = 20^\circ C$ (d^{-1});

T = temperatura do meio líquido ($^\circ C$);

θ = coeficiente de temperatura (-).

O valor de θ usualmente utilizado para K_1 e K_d é 1,047 (EPA, 1987)

3.4.2.2 O coeficiente de reaeração K_2

O segundo importante fenômeno integrante no balanço de oxigênio em um corpo d'água é a reaeração atmosférica, que representa a troca de gases entre o meio líquido e a atmosfera.

O K_2 é o coeficiente relacionado à taxa de reaeração atmosférica que representa a difusão de oxigênio atmosférico do ar para o líquido. K_2 depende da mistura e da turbulência responsáveis pelo gradiente de velocidade, da temperatura, da mistura pelo vento, da existência de quedas d'água e de barragens (Thomann e Mueller, 1987).

O valor do coeficiente K_2 tem maior influência nos resultados do balanço do oxigênio dissolvido do que o coeficiente K_d , ou seja, o modelo de Streeter-Phelps normalmente é mais sensível a K_2 do que a K_d . A determinação do K_2 pode ser efetuada por métodos estatísticos, fundamentados na análise de regressão (von Sperling, 2005).

O valor estimado do coeficiente K_2 , para a simulação do oxigênio dissolvido em um corpo de água, pode ser encontrado tabelado, em função das características do corpo d'água. Um exemplo é a Tabela 3.3, publicada por Fair *et al* (1973) e Arceivala (1981).

Tabela 3.3 – Valores médios de K_2 considerando características do corpo d'água

Corpo de água	K_2 (dia ⁻¹)	
	Profundo	Raso
Pequenas lagoas	0,12	0,23
Rios vagarosos e grandes lagos	0,23	0,37
Grandes rios com baixa velocidade	0,37	0,46
Grandes rios com velocidade normal	0,46	0,69
Rios rápidos	0,69	1,15
Corredeiras e quedas de água	>1,15	>1,61

Fonte: von Sperling, 2005

Existem ainda outros autores que buscam correlacionar os valores de K_2 com as características hidráulicas do corpo d'água e com sua vazão, conforme Tabela 3.4.

Tabela 3.4 – Valores médios de K_2 , segundo modelos baseados em dados hidrológicos do corpo d'água

Autor	Fórmula	Faixa de Aplicação aproximada
O'Connor & Dobbins (1958)	$3,73.V^{0,5} H^{-1,5}$	0,6 m ≤ H < 4,0 m 0,05 m/s ≤ V < 0,8 m/s
Churchill <i>et al</i> (1962)	$5,0.V^{0,97} H^{-1,67}$	0,6 m ≤ H < 4,0 m 0,8 m/s ≤ V < 1,5 m/s
Owens <i>et al</i> (apud Branco, 1976)	$5,3.V^{0,67} H^{-1,85}$	0,1 m ≤ H < 0,6 m 0,05 m/s ≤ V < 1,5 m/s

Fonte: von Sperling, 2005

onde:

V = velocidade do corpo d'água (m/s);

H = altura da lâmina d'água (m).

Outro fato é que o aumento da temperatura reduz a solubilidade do oxigênio no meio líquido, ou seja, reduz a concentração de saturação e acelera os processos de absorção de oxigênio. A influência da temperatura no K_2 se dá em dois sentidos opostos.

A representação do efeito da temperatura no coeficiente K_2 pode ser expressa conforme Equação 3.17.

$$K_{2T} = K_{2,20} \cdot \theta^{(T-20)} \quad (3.17)$$

sendo:

K_{2T} = K_2 a uma temperatura T qualquer (d^{-1});

$K_{2,20}$ = K_2 a uma temperatura T = 20°C (d^{-1});

T = temperatura do meio líquido (°C);

θ = coeficiente de temperatura (-).

Segundo von Sperling (2005) um valor muito utilizado para o coeficiente de temperatura θ é 1,024.

O modelo de Streeter-Phelps normalmente é mais sensível a K_2 , que a K_d (von Sperling, 2004).

3.4.2.3 Cálculo do perfil de oxigênio dissolvido em função do tempo

Considerando os fenômenos de desoxigenação e reaeração atmosférica no balanço de oxigênio dissolvido, a Equação 3.18 fornece a concentração de oxigênio no instante t.

$$C_t = C_s - \left[\frac{K_d \cdot L_0}{K_2 - K_d} \right] \cdot (e^{-K_d \cdot t} - e^{-K_2 \cdot t}) + (C_s - C_0) \cdot e^{-K_2 \cdot t} \quad (3.18)$$

sendo:

C_t = concentração de OD no tempo t;

C_s = concentração de saturação de oxigênio (mg/L);

C_o = concentração de oxigênio, logo após a mistura (mg/L);

L_o = demanda última de oxigênio, logo após a mistura (mg/L);

K_d = coeficiente de decomposição da DBO no rio (d^{-1});

K_2 = coeficiente de reaeração (d^{-1});

t = tempo de percurso (d).

Ao longo do perfil de OD no corpo d'água em função do tempo, um ponto de fundamental importância é o ponto no qual o oxigênio assume seu valor mínimo. Nesse momento, tem-se a concentração crítica e o tempo crítico. O valor da concentração crítica não deve ser inferior ao valor mínimo estabelecido pela legislação em função da classe do corpo d'água.

O modelo de Streeter-Phelps é aplicável em condições estacionárias, em que as condições são permanentemente as mesmas e em condições uniformes do trecho simulado.

Na ocorrência de concentrações negativas do oxigênio, o que é matematicamente possível, tem-se uma situação de anaerobiose, e o modelo de Streeter-Phelps não é mais aplicável.

3.4.2.4 Outros dados de entrada nos modelos da Equação da Mistura e de Streeter-Phelps

A vazão de esgotos considerada em estudos de autodepuração é normalmente a vazão média, sem considerar os coeficientes para dia e hora de maior consumo, Q_e .

O oxigênio dissolvido e a DBO a montante do lançamento são produto das atividades da bacia hidrográfica, que podem ser obtidos a partir de coletas de amostras no corpo d'água – OD_r e DBO_r .

Conforme referenciado anteriormente, segundo Klein (1962) *apud* von Sperling (2005), um rio bastante limpo possui uma demanda bioquímica de oxigênio (DBO) natural de, aproximadamente, 1,0 mg/L, decorrente da matéria orgânica oriunda de folhas e galhos de árvore, peixes mortos, fezes de animais, etc.

DBO_e – O valor típico de DBO para esgotos domésticos é de 300 mg/L. Para o cálculo do valor de DBO do efluente tratado deve-se recorrer a valores bibliográficos de eficiência média de remoção, para o tipo de tratamento utilizado.

Os valores médios de eficiência de remoção de DBO para diversos sistemas de tratamentos, podem, de forma simplificada, ser apresentados conforme os seguintes intervalos (von Sperling, 2005):

- a) Tratamento primário convencional – 30 a 35%;
- b) Sistema de lagoas – 75 a 90%;
- c) UASB seguido de pós-tratamento – 75 a 93%;
- d) Lodos ativados – 85 a 98%.

3.5 Características hidrológicas do corpo d'água e vazão de referência

A unidade de gestão de recursos hídricos é a bacia hidrográfica. Segundo Naghettini (1997), bacia hidrográfica é uma unidade fisiográfica, limitada por divisores topográficos, que colhe a precipitação, age como um reservatório de água e sedimentos, defluindo-os em uma seção fluvial única, denominada exutório. O comportamento hidrológico dos corpos de água obedece à distribuição das chuvas na bacia hidrográfica ao longo do tempo. O volume de escoamento superficial causado por um evento isolado de precipitação sobre uma bacia hidrográfica pode ser obtido subtraindo-se do total de chuva, a soma do volume infiltrado e do volume superficial captado, durante a ocorrência.

A vazão do corpo de água receptor, que depende de fatores climáticos e geomorfológicos, é um importante parâmetro na modelagem matemática da qualidade das águas, da mesma forma para o modelo de outorga de lançamento. A vazão influencia as características hidráulicas do escoamento do rio, que é importante no processo de dispersão e mistura das cargas poluidoras, e ainda está diretamente associada à capacidade de diluição dos lançamentos recebidos. A resolução CONAMA Nº 357/2005 preconiza que os valores máximos estabelecidos para os poluentes, em cada uma das classes, deverão ser atendidos nas condições de vazão de referência. Assim, segundo von Sperling (2005), a utilização de modelos de qualidade pode ser feita com quaisquer das vazões de referência, conforme o objetivo da simulação, da forma que se segue. A calibração dos modelos de qualidade das águas é feita com a vazão observada em um determinado período, sendo então possível ajustar os coeficientes do modelo, para que os dados simulados sejam os mais próximos possíveis dos dados medidos no corpo de água, no período de análise. A vazão média é adotada quando se deseja simular as condições médias prevalentes em qualquer período de tempo

determinado, denominada de vazão média de longo período e definida como a média das vazões da série disponível num local. Esse valor é obtido pela Equação 3.19.

$$Q_m = \frac{\sum_{t=1}^N Q_t}{N} \quad (3.19)$$

onde:

Q_t = vazão no intervalo de tempo t (m^3/s);

N = número de intervalos t .

A vazão mínima é empregada para o planejamento do uso da água na bacia hidrográfica, para a avaliação do atendimento aos padrões ambientais do corpo receptor e para a alocação de cargas poluidoras. A vazão mínima permite demonstrar as condições críticas do corpo receptor, em que a capacidade de diluição de cargas poluentes é menor. As características do escoamento na vazão são dependentes da topografia, geologia, clima e uso da terra, sendo que, freqüentemente, mais de um desses fatores explique a sua variabilidade. A vazão mínima está relacionada com uma duração, considerando-se que o uso da água não é um processo instantâneo. Portanto, existem alguns valores de vazões mínimas característicos que são utilizados em projetos de recursos hídricos e que são indicadores das condições de estiagens de um rio. Os mais utilizados são : (i) vazão mínima com 7 dias de duração e 10 anos de tempo de retorno e; (ii) vazão com 95% e 90 % de permanência (Tucci,2000).

A Q_{90} (ou Q_{95}) é uma vazão em que 90% (ou 95%) dos dados de vazão da série de vazões observadas são iguais ou superiores a ela, ou seja, 10% (ou 5%) das vazões diárias são inferiores. Pode também ser entendida como a vazão em que 90% (ou 95%) do tempo se tem vazões iguais ou superiores a ela, corresponde ao percentil 10% (ou 5%). A Q_{95} é mais restritiva que a Q_{90} . A vazão Q_{95} é um valor característico do comportamento em estiagem de uma bacia.

A curva de permanência ou de duração é obtida a partir da série histórica das vazões ou níveis de uma determinada bacia. Essa curva retrata a parcela do tempo em que uma determinada

vazão é igualada ou superada durante o período analisado e é utilizada quando se deseja conhecer a permanência no tempo de determinados valores. A Q_{90} e Q_{95} são extraídas de uma curva de permanência de uma série histórica, da qual se estimam as probabilidades de ocorrência de vazões de determinados valores.

A $Q_{7,10}$ é a vazão mínima com período de retorno de 10 anos e duração de 7 dias consecutivos, ou seja, uma vazão que tem a probabilidade de ocorrer em média a cada 10 anos, significando a menor média móvel dos períodos de 7 dias consecutivos. Normalmente, o valor da $Q_{7,10}$ é inferior ao das vazões de permanência Q_{90} e Q_{95} , ou seja, sua utilização é mais restritiva. Não há uma relação absoluta entre essas vazões, visto que, elas dependem do regime hidrológico do corpo d'água, que por sua vez depende da topografia, geologia, clima e uso da terra e intervenções hidráulicas.

Em certas regiões, dispõe-se de poucos dados hidrológicos ou estações fluviométricas. Assim sendo, em regiões com características homogêneas é possível assumir um comportamento hidrológico regular. O termo “regionalização” tem sido utilizado em hidrologia para denominar a transferência de informações de um local para outro, dentro de uma área com comportamento hidrológico semelhante. A regionalização tem sido estabelecida com o objetivo de se estimar a informação hidrológica em locais sem dados ou com poucos dados. O princípio da regionalização se baseia nas *similaridades espaciais* de algumas funções, variáveis e parâmetros que permitem esta transferência (Tucci, 2000).

A vazão específica é utilizada para designar a vazão por unidade de área, numa região homogênea, conforme 3.20:

$$q = \frac{Q}{A} \quad (3.20)$$

onde:

q = vazão específica (L/s.km²);

Q = vazão (L/s);

A = área da região homogênea (km²).

Os órgãos gestores de recursos hídricos no Brasil utilizam como vazões de referência $Q_{7,10}$, Q_{90} e Q_{95} . O Quadro 3.4 apresenta os critérios da União e de estados do Brasil, para outorga de captação de águas superficiais.

Quadro 3.4 – Critérios adotados para outorga de captação de águas superficiais.

Estado	Órgão gestor	Vazão máxima outorgável	Legislação referente à vazão máxima outorgável	Limites máximos de vazões consideradas insignificantes	Legislação referente à definição das vazões insignificantes
União	ANA	70% da Q_{95} podendo variar em função das peculiaridades de cada região. 20% para cada usuário individual	Não existe, em função das peculiaridades do País, podendo variar o critério.	1,0 L/s	Resolução ANA 707/2004
Bahia	SRH	80% da Q_{90} 20% para cada usuário individual	Decreto Estadual 6.296/97	0,5 L/s	Decreto Estadual 6.296/97
Ceará	SRH	90% da Q_{90reg}	Decreto Estadual nº 23.067/94	2,0 m ³ /h (0,56 L/s – para águas superficiais e subterrâneas)	Decreto Estadual nº 23.067/94
Goiás	SEMARH	70% da Q_{95}	Não possui legislação específica.	Não estão ainda definidos	-
Minas Gerais	IGAM	30% da $Q_{7,10}$ para captações a fio d'água. Para captações em reservatórios, podem ser liberadas vazões superiores, mantendo o mínimo residual de 70% da $Q_{7,10}$ durante todo o tempo.	Portarias do IGAM nº 010/98 e 007/99.	1,0 L/s para a maior parte do Estado e 0,5 L/s para as regiões de escassez (águas superficiais) 10,0m ³ /dia (águas subterrâneas)	Deliberação CERH-MG nº 09/2004
Paraíba	AAGISA	90% da Q_{90reg} . Em lagos territoriais, o limite outorgável é reduzido em 1/3.	Decreto Estadual 19.260/1997	2,0 m ³ /h (0,56 L/s – para águas superficiais e subterrâneas)	Decreto Estadual 19.260/1997
Paraná	SUDERHSA	50% da Q_{95}	Decreto Estadual 4646/2001	1,0 m ³ /h (0,3 L/s)	
Pernambuco	SECTMA	Depende do risco que o requerente pode assumir	Não existe legislação específica.	0,5 l/s ou 43 m ³ /dia (águas superficiais) 5,0m ³ /dia (águas subterrâneas para abastecimento humano)	Decreto Estadual 20.423/98
Piauí	SEMAR	80% da Q_{95} (Rios) e 80% da Q_{90reg} (Açudes)	Não existe legislação específica.	Não estão ainda definidos	-
Rio Grande do Norte	SERHID	90% da Q_{90reg}	Decreto Estadual nº 13.283/97	1,0 m ³ /h (0,3 L/s)	Decreto Estadual nº 13.283/97
Rio Grande do Sul	SEMA	Não está definido	-	Media mensal até 2,0m ³ /dia (águas subterrâneas)	Decreto Estadual 42047/2002
São Paulo	DAEE	50% da $Q_{7,10}$ por bacia. Individualmente nunca ultrapassar 20% da $Q_{7,10}$.	Não existe legislação específica.	5,0m ³ /dia (águas subterrâneas)	Decreto Estadual 32.955/91
Sergipe	SEPLANTEC	100% da Q_{90} 30% da Q_{90} para cada usuário individual	Não existe legislação específica	2,5m ³ /h (0,69 L/s)	Resolução nº 01/2001
Tocantins	NATURATINS	75% Q_{90} por bacia. Individualmente o máximo é 25% da mesma Q_{90} . Para barragens de regularização, 75% da vazão de referência adotada.	Decreto estadual já aprovado pela Câmara de outorga do Conselho Estadual de Recursos Hídricos.	0,25L/s ou 21,60m ³ /dia. A minuta de regulamentação aprovada deve alterar para 1,0L/s ou 21,60m ³ /dia	Portaria NATURATINS nº 118/2002

Fonte: ANA

A Tabela 3.8 demonstra que o critério de Minas Gerais é o mais restritivo do Brasil, visto que a vazão máxima outorgável é 30 % da $Q_{7,10}$. Em seguida, vem o Estado de São Paulo, cujo critério é 50% da vazão de referência $Q_{7,10}$. Os órgãos gestores de recursos hídricos de Goiás, Paraná e Piauí, assim como a União, utilizam a vazão Q_{95} e os percentuais outorgáveis são 70%, 50%, 80% e 70% respectivamente. Vale salientar que a Agência Nacional das Águas pode alterar seus critérios em função de peculiaridades regionais, uma vez que este critério não é fixado em norma. Os demais Estados que surgem na tabela utilizam a Q_{90} com vazão de referência e os percentuais variam de 75% em Tocantins até 100% em Sergipe. Alguns Estados fixam um percentual máximo por usuário.

Outras características importantes para a modelagem matemática da qualidade das águas são a velocidade, a profundidade e a largura do corpo d'água.

A velocidade da massa líquida do corpo d'água pode ser estimada por medição direta em estações fluviométricas, pela utilização de fórmulas hidráulicas para canais, ou por correlação com a vazão. A velocidade e a vazão de um corpo d'água afetam de forma significativa a sua capacidade de assimilar e transportar contaminantes. A velocidade da água pode variar no dia, assim como de dia para dia, nas estações do ano, dependendo de influências hidrometeorológicas e conforme as características geomorfológicas da bacia hidrográfica.

Os rios são caracterizados por possuírem uma corrente unidirecional, com alta variação de velocidade, entre 0,1 e 1,0 m/s. As correntes nos lagos possuem baixa velocidade, variando em média de 0,001 a 0,01 m/s (UNEP/WHO, 1996).

A profundidade e largura de um corpo de água naturalmente variam ao longo do ano, em função da vazão. Ambas podem ser medidas num corpo de água, sendo que a profundidade é, em geral, medida por batimetria. O perfil da profundidade ao longo da seção transversal pode variar bastante de local para local do rio, ao passo que a largura, de medição mais simples, apresenta menos variação. À medida que o corpo de água flui de montante para jusante e, conseqüentemente, incorpora uma maior vazão, normalmente a seção do corpo de água vai aumentando e da mesma forma ocorre ampliação da profundidade e largura.

Chapra (1997) apresenta as equações 3.21, 3.22 e 3.23 de velocidade, profundidade e largura em função da vazão.

$$V=aQ^b \quad (3.21)$$

$$H=aQ^\beta \quad (3.22)$$

$$B=cQ^f \quad (3.23)$$

onde:

V = velocidade média (m/s);

H = profundidade média (m);

B = largura (m).

$a, b, \alpha, \beta, c, f$ = coeficientes empíricos que podem ser determinados a partir dos dados medidos nas estações fluviométricas.

Utilizando-se a Equação de vazão (3.24),

$$Q= AV=BH.V \quad (3.24)$$

Temos as equações 3.25 e 3.26 que:

$$b+\beta+f= 1,0 \quad (3.25)$$

$$a.a.c= 1,0 \quad (3.26)$$

Segundo von Sperling (2005), com base nas relações empíricas apresentadas em 3.21 a 3.23 para os coeficientes de descarga, os coeficientes c e f podem ser obtidos por 3.27 e 3.28:

$$c = 1,0/(a.a) \quad (3.27)$$

$$f = 1,0 (b+\beta) \quad (3.28)$$

4 METODOLOGIA

4.1 Introdução

A metodologia deste trabalho foi composta das seguintes etapas:

- a) revisão bibliográfica;
- b) escolha dos modelos matemáticos;
- c) desenvolvimento de aplicativos em planilha MS-Excel[®];
- d) testes dos modelos em cenários simulados; e
- e) estudo de caso.

Os modelos desenvolvidos em planilha MS-Excel[®] foram testados em vários cenários em uma bacia hipotética, em que foi observado o comportamento dos diversos fatores que influenciam a outorga de efluentes. Por fim, os modelos foram aplicados a uma real.

4.1.1 Revisão bibliográfica

A revisão bibliográfica foi apresentada no Capítulo 3. A consulta à bibliografia disponível propiciou o levantamento e a análise comparativa dos critérios de outorga de lançamento utilizados por diversos órgãos gestores de recursos hídricos do Brasil e de outros países. Da revisão constou-se ainda a análise da legislação nacional e aquela do Estado de Minas Gerais.

4.1.2 Escolha dos modelos matemáticos

Os modelos escolhidos para descrever a alocação de cargas poluidoras foram a simples Equação da Mistura e o modelo de Streeter-Phelps, ambos apresentados no Capítulo 3. A escolha foi baseada no fato de serem formulações simples, com perspectivas de ampla utilização por órgãos gestores de recursos hídricos.

4.1.3 Desenvolvimento de aplicativos em planilha MS-Excel®

Para o teste dos modelos, tanto em cenários simulados, quanto no estudo de caso, foi desenvolvido um programa de computador, do tipo planilha eletrônica, em MS-Excel®. O programa permite, pela alocação de lançamentos e pela definição dos parâmetros de entrada no modelo, simular o perfil de DBO no corpo d'água, considerando a sua capacidade de autodepuração. O programa permite, ainda, calcular as vazões de diluição requeridas para cada lançamento. A Figura 4.1 apresenta uma vista da tela da planilha.

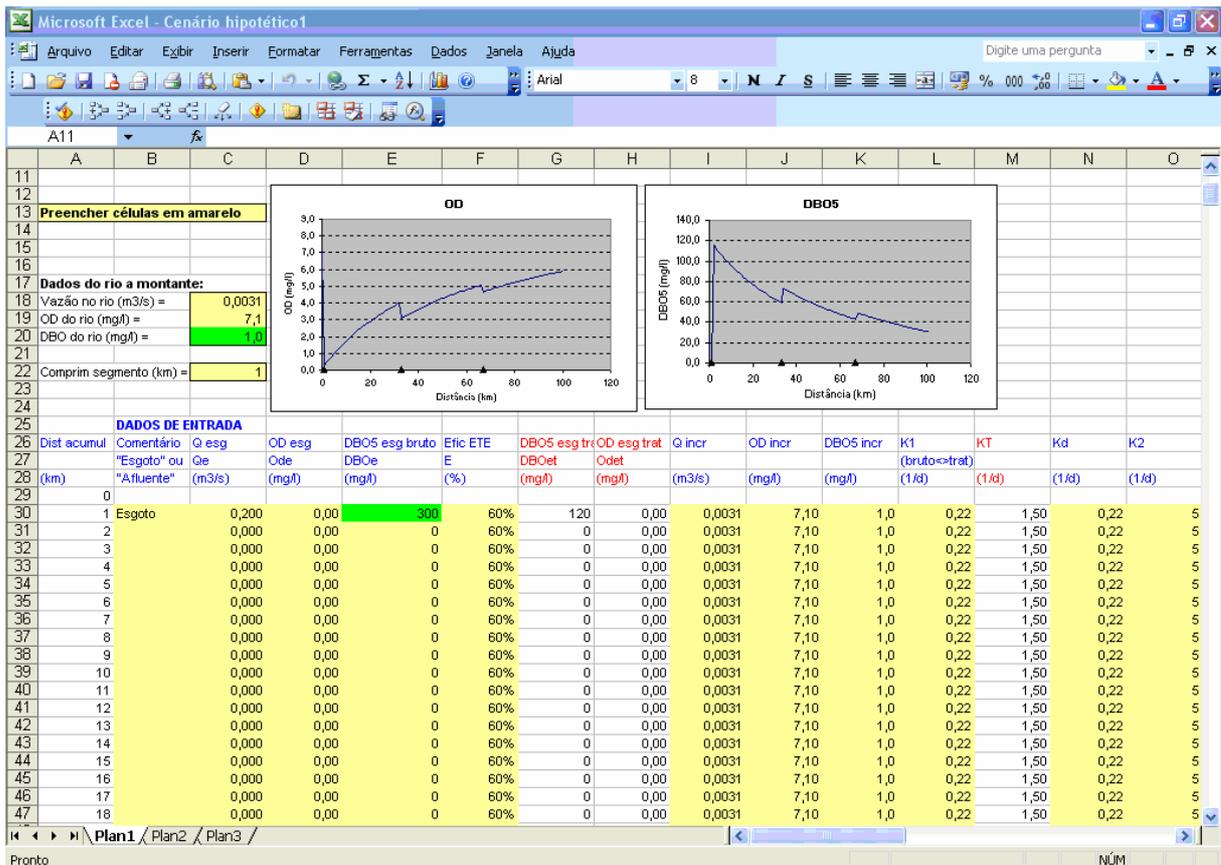


Figura 4.1 – Vista da tela do programa em MS - Excel®

4.1.4 Testes dos modelos em cenários simulados

A primeira etapa dos testes dos modelos consistiu de simulações de cenários em uma bacia hipotética, nos quais fizeram-se variar a posição das cargas lançadas – ou a localização do usuário na bacia, as vazões de referência e o estado anterior do corpo d'água em termos da

concentração de DBO. A escolha desse parâmetro como resposta deveu-se ao fato de que uma significativa maioria das cargas poluidoras dos corpos d'água tem origem em lançamentos de esgoto doméstico.

4.1.5 Estudo de caso

Na segunda etapa dos testes dos modelos, os mesmos cenários da primeira etapa foram aplicados à bacia do ribeirão Marmelada, visando avaliar o comportamento das variáveis na realidade de uma bacia cujos dados de monitoramento de qualidade das águas demonstram uma condição crítica em termos de poluição (IGAM, 1997-2004).

4.2 Cenários simulados

Os cenários simulados para ambas as etapas estão apresentados no Quadro 4.1. Os cenários foram divididos em dois grupos, segundo o modelo utilizado: equação da mistura ou Streeter-Phelps. Considerando-se esses grupos, foram testadas três vazões de referência. Por fim, para cada uma das vazões simuladas, fixou-se como condição inicial para o modelo o rio em condições naturais, ou seja, DBO igual a 1 mg/L, ou na sua condição atual de qualidade das águas, definido segundo as duas últimas colunas do Quadro 4.1.

Quadro 4.1 – Cenários simulados.

Cenário	Modelo	Vazão de referência			Rio	
		Q _{7,10}	Q ₉₀	Q ₉₅	Condições naturais	Condições atuais
1	Equação da mistura					
2						
3						
4						
5						
6						
7	Streeter-Phelps					
8						
9						
10						
11						
12						

Para cada cenário, foram alocadas cargas de modo a se avaliar o efeito de lançamentos isolados e também dos lançamentos de múltiplos usuários, com a finalidade de se formar uma visão global da bacia. Não se considerou a poluição difusa, mas somente as cargas pontuais. A DBO foi o parâmetro de controle utilizado, pois, ainda que indiretamente, representa o principal aporte de matéria orgânica nos corpos d'água, além de ser de fácil determinação.

Foi avaliado o impacto de lançamentos em corpos d'água em condições críticas, utilizando-se vazões de referência distintas, Q_{7,10}, Q₉₀ e Q₉₅, contemplando, desta forma, diferentes razões de diluição. A escolha das referidas vazões considerou serem estas as principais vazões de referência adotadas por órgãos gestores brasileiros.

Visto que a maior parte dos corpos d'água em Minas Gerais enquadra-se na classe 2 da Resolução CONAMA N^o 357/2005, as simulações foram realizadas tomando-se rios dessa classe, com padrões de corpo receptor com valor de DBO igual a 5,0 mg/L.

A alocação de vazão de diluição assumindo o rio sem lançamentos anteriores permite quantificar o impacto unitário de um lançamento na bacia, tornando possível mensurar o

“peso” do usuário. A alocação de vazão de diluição assumindo rio com lançamentos anteriores permite avaliar a condição real da bacia. As duas situações foram testadas nas simulações.

Nos cenários, são assumidas condições estacionárias, em que algumas características, como dimensões, vazões, concentrações e fatores ambientais, permanecem constantes ao longo do tempo.

4.3 Simulações em uma bacia hipotética

Foi realizado um estudo de cenários em uma bacia hipotética a fim de se testarem os modelos, as vazões de referência e o estado anterior do corpo d'água quanto à concentração de DBO (Quadro 4.1).

Em todos os casos, foram alocados três lançamentos em um trecho de 100 km do rio considerado:

- a) o primeiro lançamento a 1 km do ponto inicial, com vazão de 200L/s;
- b) o segundo, a 33 km (1/3 do percurso), com vazão de 100 L/s; e
- c) o último a 67 km (2/3 do percurso), com vazão de 50 L/s.

A concentração adotada para o esgoto bruto foi de 300 mg/L, que é um valor típico para os esgotos domésticos (von Sperling, 2005). A eficiência inicial adotada para o tratamento foi de 75%, valor de eficiência mínima para remoção de DBO em tratamentos secundários (von Sperling, 2005).

Os valores das vazões de referência utilizadas nas simulações – Q_{90} , Q_{95} e $Q_{7,10}$ – foram obtidos calculando-se a média de todos os dados disponíveis para o Estado de Minas Gerais, encontrados no Atlas Digital das Águas de Minas (UFV, 2005), que apresenta valores por sub-bacias. Além dos valores médios, simulou-se um cenário para uma região com déficit hídrico e outra com grande disponibilidade hídrica no Estado, de modo a permitir uma análise

de situações extremas. Os dados de vazões de referência utilizados do Atlas estão apresentados no Apêndice 1.

Do mesmo modo, o valor utilizado para a DBO atual do corpo d'água foi a média dos resultados das medições efetuadas no Projeto Águas de Minas (IGAM, 1997-2004) em todo o Estado de Minas.

O valor adotado para a DBO do rio, a montante do primeiro lançamento, foi 1,0 mg/L, que é típico para as condições naturais dos corpos d'água (von Sperling, 2005). O coeficiente de desoxigenação – K_1 e o coeficiente de decomposição – K_d dependem das características da matéria orgânica, da temperatura e da presença de substâncias inibidoras (Fair *et al*, 1973, e Arceivala, 1981, *apud* von Sperling, 2005). O coeficiente K_1 apresenta valores na faixa de 0,12 a 0,24 para efluente secundário. Para as simulações, foi adotado o valor de K_1 igual a 0,22, pois é um valor médio para efluentes de tratamento secundário.

Em seguida, outras quatro simulações foram realizadas, a saber:

- a) a primeira testou a influência da localização do usuário no valor da vazão de diluição necessária para atender as condições de lançamento;
- b) a segunda testou as situações das regiões com a menor disponibilidade e com a maior disponibilidade hídrica no Estado de MG, segundo dados do Atlas Digital das Águas de Minas (UFV, 2005);
- c) na terceira, atribuiu-se uma eficiência ao tratamento para que o efluente atendesse o padrão de lançamento, que para DBO é 60 mg/L segundo resolução COPAM Nº 10/86; e
- d) por fim, as eficiências dos tratamentos foram aumentadas de tal forma que todo os lançamentos individualmente atendessem ao padrão para o corpo d'água para DBO de 5 mg/L na mistura.

5. DESCRIÇÃO DO ESTUDO DE CASO – BACIA DO RIBEIRÃO MARMELADA

Com os cenários simulados, realizou-se um estudo de caso no qual foi utilizada a bacia do ribeirão Marmelada, em Minas Gerais. A escolha dessa bacia baseou-se na existência e disponibilidade de dados de monitoramento da quantidade e qualidade da água. A bacia do ribeirão Marmelada pode ser considerada uma bacia crítica, pois o Índice de Qualidade das Águas – IQA situa-se no nível ruim, na maior parte do período em que foi monitorada (IGAM, 1997-2004).

5.1 Caracterização geral da bacia do ribeirão Marmelada

A bacia do ribeirão Marmelada está contida nos municípios de Quartel Geral, Abaeté e Cedro do Abaeté. A bacia tem como seu corpo d'água principal o ribeirão Marmelada, afluente do rio São Francisco, que nasce na serra da Saudade, no Município Quartel Geral-MG, a 940 m de altitude. Sua foz é no reservatório da represa de Três Marias, pela margem esquerda, e possui área total de 874 km². O comprimento do nascente até a foz do ribeirão Marmelada é de 96 km. A bacia está inserida na Unidade de Planejamento e Gestão de Recursos Hídricos denominada SF4. A Figura 5.1 mostra a bacia do ribeirão Marmelada.

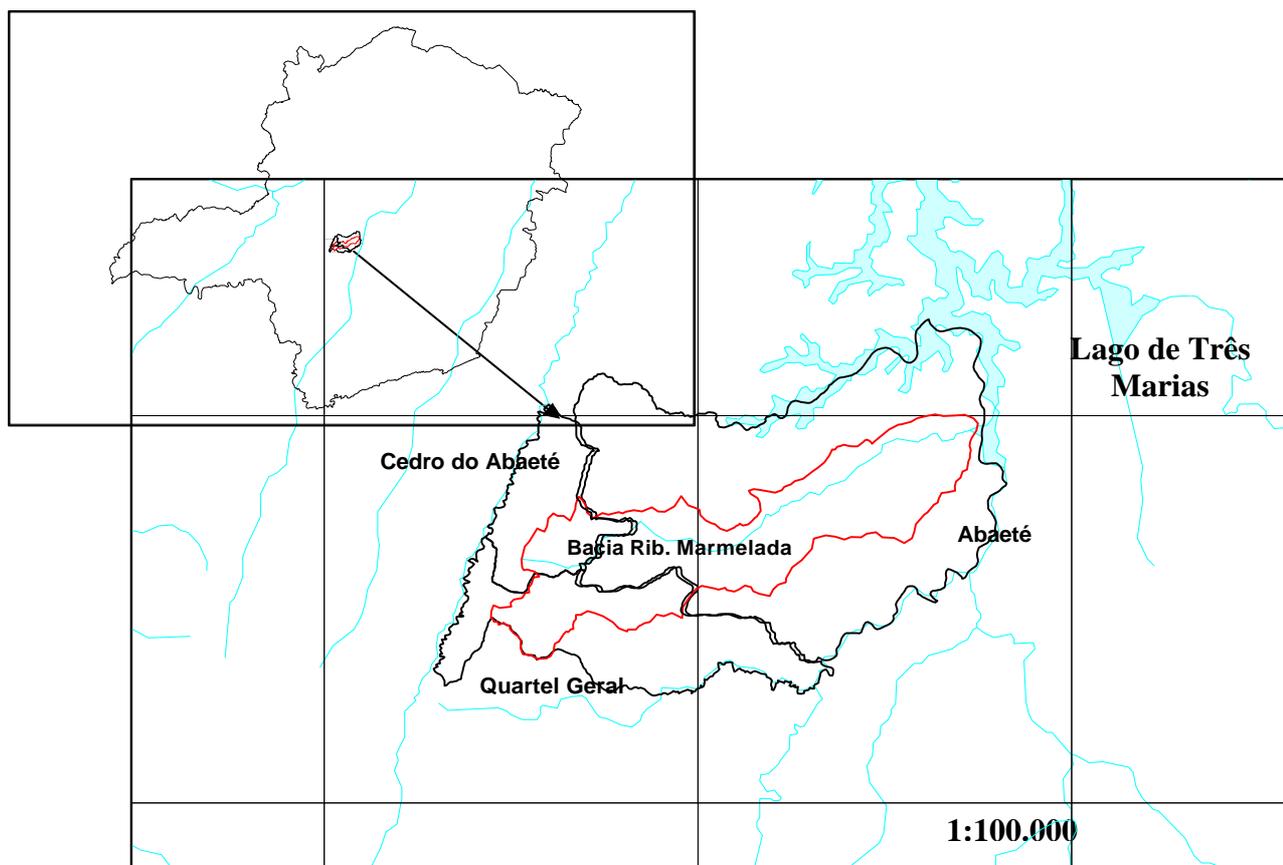


Figura 5.1 – Vista geral da bacia do ribeirão Marmelada.

O município de Abaeté, o mais importante da bacia, possui uma área de 1814,59 km² e população de 22.330 habitantes (IBGE, 2000). A temperatura média anual no município é de 22,1°C e o índice pluviométrico médio anual é de 1230 mm (site: ALMG). O município de Cedro do Abaeté possui uma área 281,56 km² e população de 1.285 habitantes (IBGE, 2000). Os dados de temperatura e índice pluviométrico são semelhantes aos do município de Abaeté. Quartel Geral, com população 3.017 habitantes e área de 557,45 km², possui o índice pluviométrico médio anual de 1416 mm e temperatura média semelhante aos demais municípios componentes da bacia (site: ALMG).

5.2 Monitoramento das águas da bacia do ribeirão Marmelada

A bacia do ribeirão Marmelada possui uma estação fluviométrica denominada Abaeté, situada no município de mesmo nome, cujo código é 40530000. A estação se localiza nas coordenadas geográficas 19°09'46''S e 45° 26'31''W, e possui uma série histórica de 36 anos de dados de vazão, referentes ao período 1966-2002 (site: ANA). A área de drenagem contribuinte ao ponto de monitoramento é de 466 km². A operação da estação é realizada pelo Serviço Geológico do Brasil - CPRM.

A área conta ainda com um ponto de monitoramento da qualidade das águas do Projeto Águas de Minas (IGAM, 1997-2004), no qual, desde 1997 são medidos os valores de DBO, OD, coliformes termotolerantes, cor, manganês, fósforo total, ferro solúvel, manganês e fenóis, em quatro campanhas anuais. A estação está localizada no município de Abaeté, nas coordenadas 19° 09'24''S e 45° 25'41''W. A Figura 5.2 apresenta a localização das estações descritas no presente item.

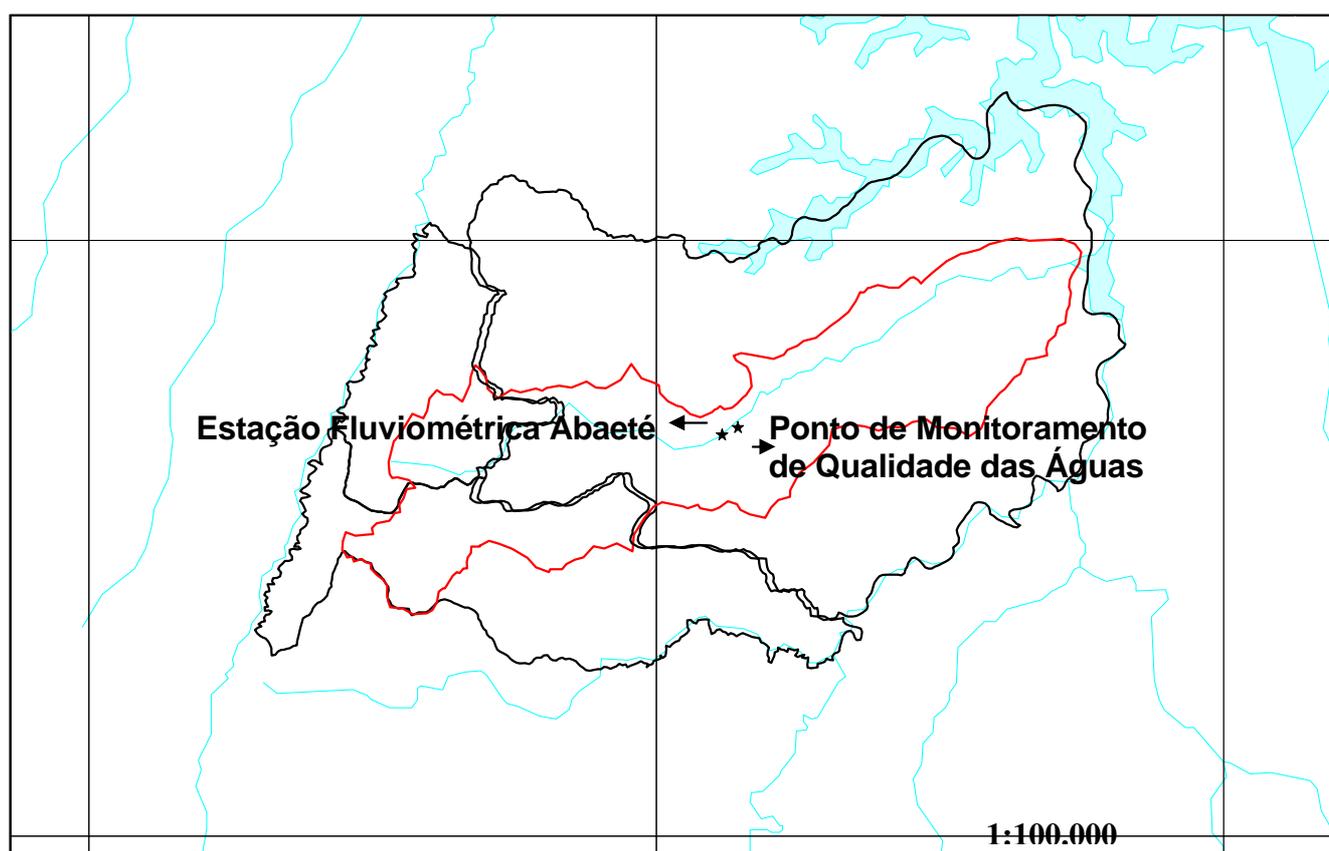


Figura 5.2 – Bacia do ribeirão Marmelada: Localização dos pontos de monitoramento.

5.3 Outorgas para captação concedidas na bacia do ribeirão Marmelada

Em consulta ao banco de dados do IGAM em agosto de 2005, observou-se que os municípios de Abaeté e Cedro de Abaeté possuem outorga para as captações de abastecimento. Em ambos os municípios, a COPASA possui a concessão do abastecimento de água. As demais outorgas referem-se a pequenos sistemas de irrigação, que não serão considerados para o estudo em questão. A Figura 5.3 apresenta as outorgas concedidas.

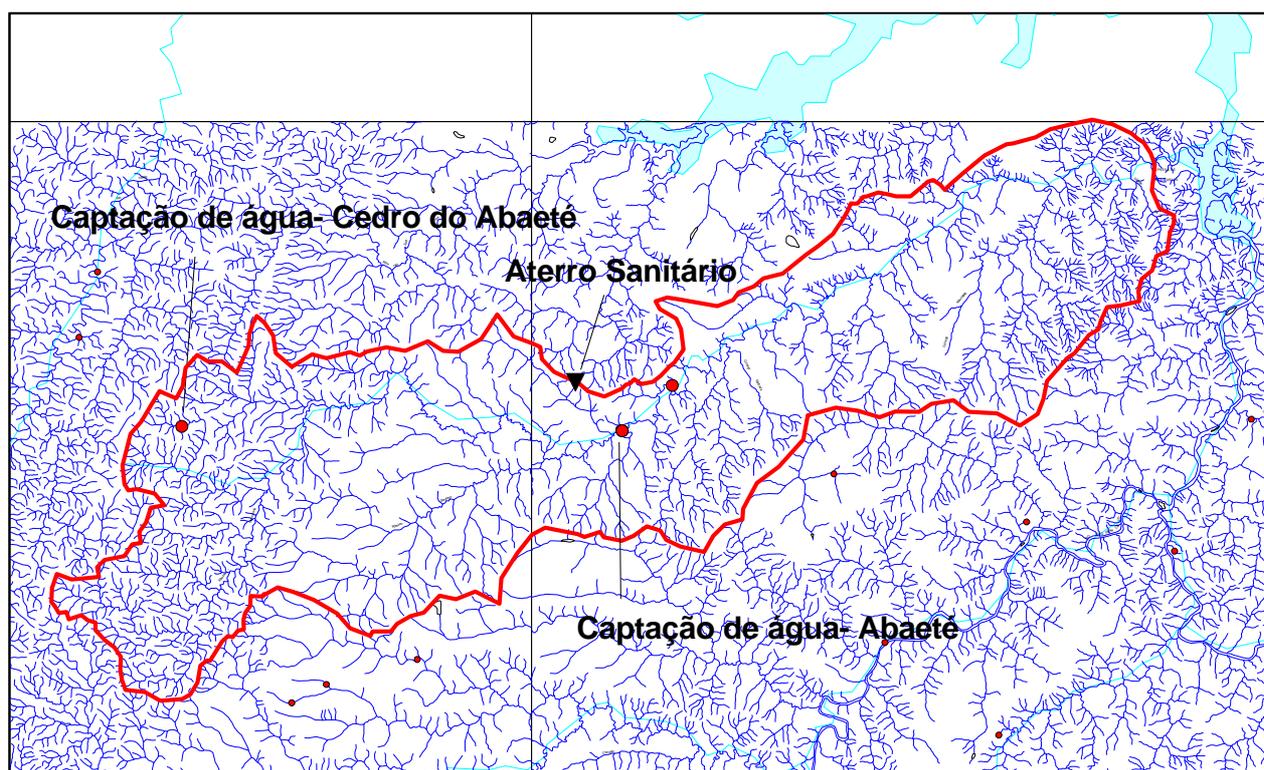


Figura 5.3 – Bacia do ribeirão Marmelada: Distribuição geográfica das outorgas concedidas pelo IGAM (Escala: 1:100.000).

5.4 Coleta de dados na bacia do ribeirão Marmelada

Com a finalidade de cadastrar os lançamentos na bacia, foi inicialmente realizado um levantamento nos processos de licenciamento ambiental na Fundação Estadual do Meio Ambiente – FEAM nos municípios envolvidos. Foram selecionados os empreendimentos

licenciados ou em fase de licenciamento no órgão ambiental e, em seguida, analisados os seus respectivos relatórios para coleta de dados.

A seguir, foi realizada uma visita ao local, no período de 16 a 19 de agosto de 2005. Foram visitados todos os possíveis pontos de lançamento doméstico ou industrial na bacia, com base em um levantamento realizado no Sistema de Informações Ambientais – SIAM, no cadastro de indústrias da Federação das Indústrias do Estado de Minas Gerais – FIEMG, e em consulta aos escritórios locais da EMATER e do Instituto Estadual de Florestas – IEF, além da Polícia Ambiental do Estado de MG, que acompanhou todo o trabalho no campo. Os dados utilizados são de agosto de 2005 quando foi realizada a pesquisa nos órgãos citados.

Foi elaborada uma ficha de cadastro (Apêndice 2) a fim de auxiliar a coleta de dados em campo. Foram visitados nove empreendimentos que serão aqui designados Empreendimentos 1 a 9 conforme será descrito ao longo do presente capítulo.

- a) Empreendimento 1;
- b) Empreendimento 2;
- c) Empreendimento 3;
- d) Empreendimento 4;
- e) Empreendimento 5;
- f) Empreendimento 6;
- g) Empreendimento 7;
- h) Empreendimento 8;
- i) Empreendimento 9.

Foi verificado que somente algumas empresas possuíam lançamentos diretos nos corpos d'água e, desta forma, estas são aquelas consideradas importantes para este estudo. As indústrias que lançam efluentes no corpo d'água são os Empreendimentos 1, 2 e 4. As demais lançam seus efluentes na rede de esgotamento sanitário da cidade de Abaeté. A Figura 5.4 mostra os pontos cadastrados na bacia.

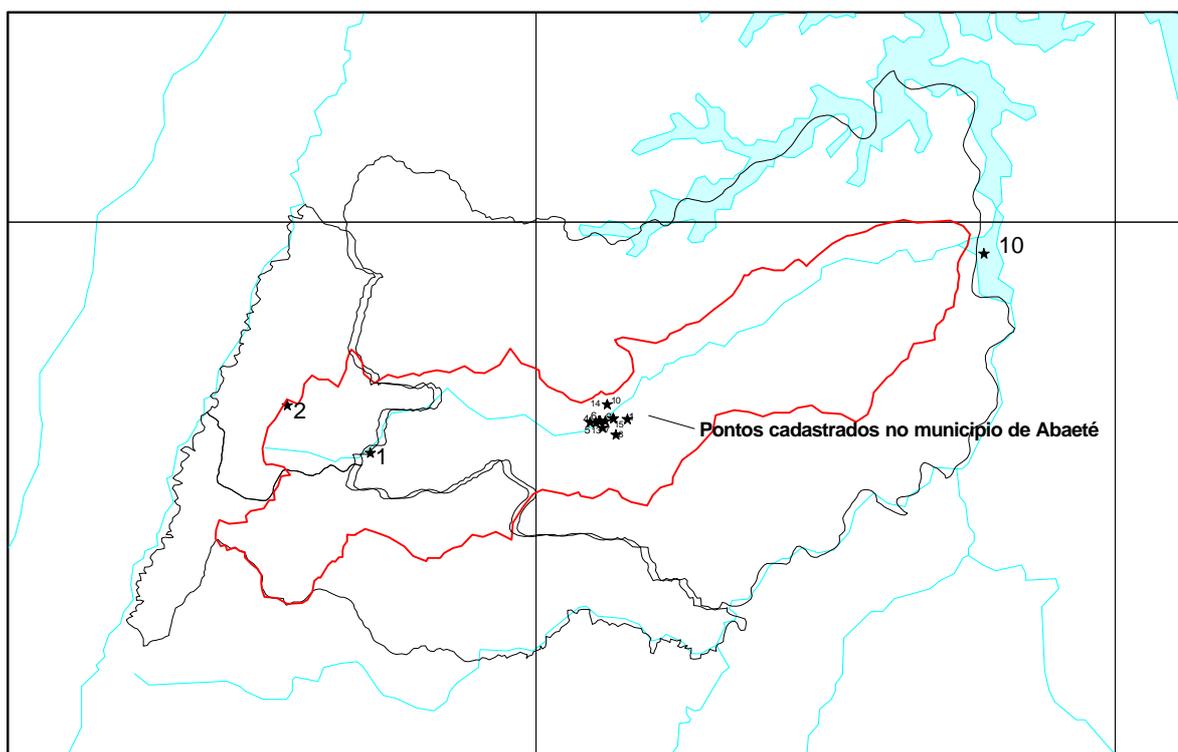


Figura 5.4 – Bacia do ribeirão Marmelada: Pontos cadastrados (Escala: 1:100.000).

Observou-se uma concentração dos lançamentos no município de Abaeté, conforme detalhe na Figura 5.5.

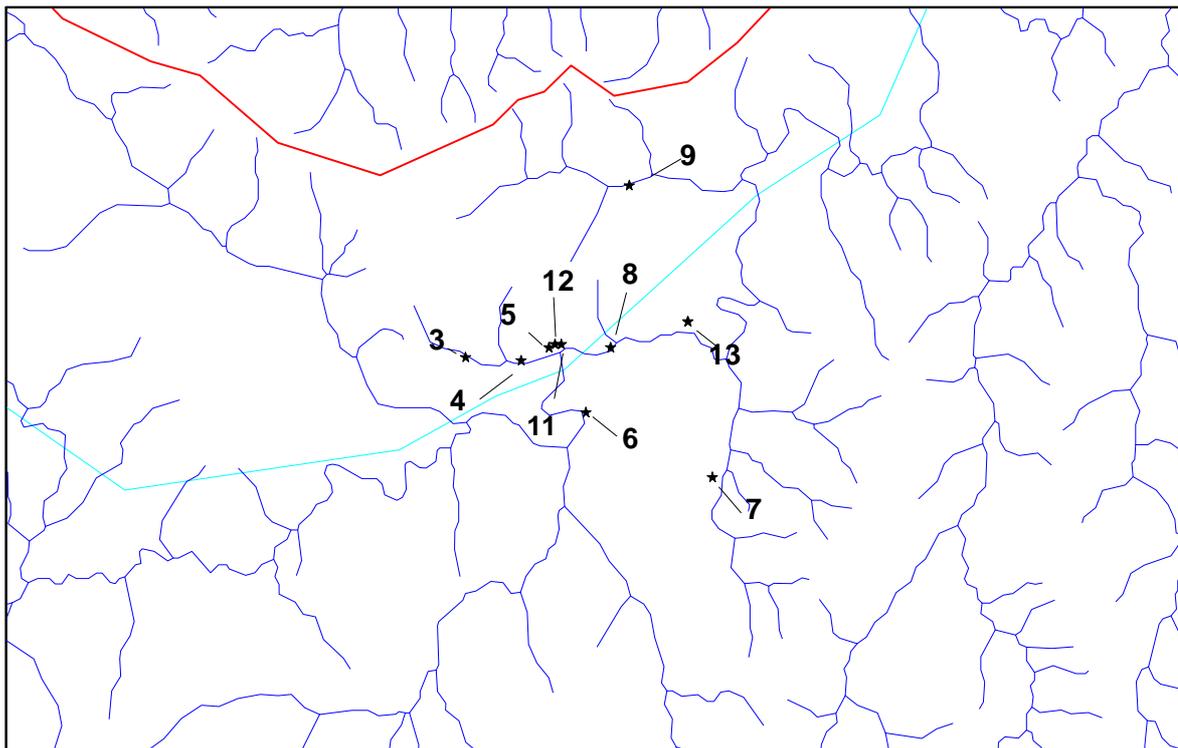


Figura 5.5 – Detalhe dos pontos cadastros no município de Abaeté (Escala: 1:100.000).

A Tabela 5.1 refere-se à legenda dos pontos de cadastro apresentados nos mapas das figuras 5.4 e 5.5.

Tabela 5.1 – Legenda dos pontos cadastrados.

Localização	Latitude	Longitude	Corpo d'água
PONTO 1 – Ponto do ribeirão Marmelada na divisa dos municípios de a Abaeté e Cedro de Abaeté	19°11'22"	45°25'16"	Ribeirão Marmelada
PONTO 2 – Empreendimento 5	19°09'01"	45°25'16"	Córrego Caretinha
PONTO 3 – Lançamento de esgoto <i>in natura</i> no município de Abaeté	19°09'51"	45°25'16"	Afluente do Ribeirão Marmelada – ME
PONTO 4 - Lançamento de esgoto <i>in natura</i> no município de Abaeté	19°09'52"	45°25'16"	Afluente do Ribeirão Marmelada – ME
PONTO 5 - Lançamento de esgoto <i>in natura</i> no município de Abaeté	19°09'48"	45°25'16"	Afluente do Ribeirão Marmelada – ME
PONTO 6 - Lançamento de esgoto <i>in natura</i> no município de Abaeté	19°10'08"	45°25'16"	Ribeirão Marmelada
PONTO 7 – Empreendimento 4 ⁽¹⁾	19°10'28"	45°25'16"	Afluente do Ribeirão Marmelada – MD
PONTO 8 - Lançamento de esgoto <i>in natura</i>	19°09'48"	45°25'16"	Ribeirão Marmelada
PONTO 9 – Empreendimento 4 ⁽²⁾	19°08'58"	45°25'16"	Córrego das Galinhas
PONTO 10 - Lago de Três Marias próximo à foz do ribeirão Marmelada	19°01'32"	45°25'16"	Represa de Três Marias
PONTO 11 – Empreendimento 2	19°09'47"	45°25'16"	Ribeirão Marmelada
PONTO 12 – Empreendimento 3	19°09'47"	45°25'16"	Ribeirão Marmelada
PONTO 13 – Empreendimento 4	19°09'40"	45°25'16"	Ribeirão Marmelada

(1) e (2) – Refere-se a dois pontos de tratamento distintos do mesmo empreendimento

5.4.1 Empreendimento 1

O Empreendimento 1 é uma indústria de manipulação de envoltório natural de bovinos e suínos para a fabricação de embutidos de carne, que gera um efluente decorrente do processo de dessalgação das tripas e lavagens das instalações. O processo de tratamento está em fase de implantação. O efluente industrial será tratado por lodos ativados e o efluente doméstico tem sua destinação final em fossas sépticas seguidas de filtro anaeróbico de fluxo ascendente. A Figura 5.6 mostra o ponto onde é lançado o efluente no ribeirão Marmelada, assim como o efluente lançado.



Figura 5.6 – Efluente gerado e ponto de lançamento dos efluentes do Empreendimento 1 no ribeirão Marmelada.

As características do efluente gerado e do que será lançado após a implantação da estação de tratamento ($Q = 0,058 \text{ L/s}$), tal como consta do processo de licenciamento ambiental, estão apresentados na Tabela 5.2. Embora tratem-se de dados de projeto, os dados do Empreendimento 1 foram adotados para o estudo de caso.

Tabela 5.2 – Características do efluente do Empreendimento 1.

Parâmetro	Efluente gerado	Efluente lançado
DBO (mg/L)	1257	125
OD (mg/L)	<0,5	–
DQO (mg/L)	2194	219
pH	6,4	7,0 a 8,0
Sólidos sedimentáveis (mL/L)	340	3

5.4.2 Empreendimento 2

O Empreendimento 2 é um matadouro e frigorífico que abate 200 bovinos e 100 suínos ao mês. O empreendimento gera um efluente com vazão de $20 \text{ m}^3/\text{hora}$ e o sistema de tratamento para o efluente industrial tem uma etapa de peneiramento inicial (filtro), seguido de um tanque de aeração prolongada (reator biológico) e um decantador, onde é introduzido um floculante. O lodo gerado no processo, após desidratação em leito de secagem, é recolhido por caminhões limpa-fossa e levados ao depósito de lixo a céu-aberto da cidade. As Figuras 5.7 a

5.9 apresentam vistas das unidades da estação de tratamento, assim como o ponto de lançamento no ribeirão Marmelada. O esgoto doméstico é disposto em três fossas de tipo indeterminado.



Figura 5.7 – Tanque de aeração e filtro da estação de tratamento de efluentes do Empreendimento 2.



Figura 5.8 – Filtro e decantador da estação de tratamento de efluentes do Empreendimento 2.



Figura 5.9 – Detalhe do decantador e vista do lançamento no ribeirão Marmelada.

A Tabela 5.3 apresenta a caracterização do efluente industrial, segundo o processo de licenciamento ambiental na Fundação Estadual do Meio Ambiente. A eficiência do sistema de tratamento é de 95% para DBO. Na visita ao empreendimento foram obtidos dados de uma única análise disponível de seu efluente industrial. As amostras foram coletadas e os parâmetros foram analisados por laboratórios diferentes em datas diferentes e, desta forma, sua correlação tornou-se difícil. A vazão do efluente gerado é 5,9 L/s.

Tabela 5.3 – Características do efluente de Empreendimento 2.

Parâmetro	Efluente gerado	Efluente lançado
DBO (mg/L)	4.716	236
DQO (mg/L)	6.310	–
Temperatura (°C)	27	–
pH	8,0	–
Sólidos sedimentáveis (mL/L)	1.956	–
Óleos e Graxas (mg/L)	4.752	–

5.4.3 Empreendimento 3

O Empreendimento 3 produz polpa de frutas para suco de maracujá, com produção de 1 tonelada de frutas beneficiadas por hora. O efluente industrial gerado tem uma vazão de 6,67 L/s. Atualmente, o efluente é filtrado e disposto em um tanque de equalização de pH e correção de nutrientes para, em seguida, ser tratado em um sistema de lagoas anaeróbias e facultativas. Assim que as lagoas forem preenchidas, o efluente será lançado na rede de

esgotos do município. O efluente doméstico da empresa é tratado em caixa de gordura e fossa séptica. As Figuras 5.10 e 5.11 mostram as unidades da estação de tratamento da empresa.



Figura 5.10 – Filtro e tanque de equalização: Empreendimento 3.



Figura 5.11 – Lagoas anaeróbias e lagoa facultativa.

O efluente do Empreendimento 3 tem as características apresentadas no Tabela 5.4, segundo uma única análise disponível no empreendimento:

Tabela 5.4 – Características do efluente do Empreendimento 3.

Parâmetro	Efluente gerado	Efluente lançado
DBO (mg/L)	612	183
DQO (mg/L)	1578	292
Temperatura (°C)	37,6	23,8
pH	6,5	5,4
Sólidos sedimentáveis (mL/L)	5,5	<0,1
Sólidos suspensos (mg/L)	111	45
Óleos e Graxas (mg/L)	9	5

Os parâmetros analisados no sistema de lagoas apresentam-se conforme Tabela 5.5.

Tabela 5.5 – Características do efluente do sistema de lagoas apresentados no processo de licenciamento.

Lagoas	DBO entrada (mg/L)	DBO saída (mg/L)
Lagoa Anaeróbia 1	1855	742
Lagoa Anaeróbia 2	742	371
Lagoa Facultativa	371	56

5.4.4 Empreendimento 4

O Empreendimento 4 possui duas estações de tratamento de esgotos, a ETE Primavera e ETE São Simão, que se localizam respectivamente nas coordenadas geográficas 19°10'28''S e 45°25'52''W e 19°08'58''S e 45°26'19''W. O serviço de esgotamento sanitário é de responsabilidade da Prefeitura Municipal, com índice de coleta em torno de 90%, segundo informações da própria Prefeitura. A estação Primavera, apresentada na Figura 4.12, não possui qualquer tipo de operação. A Figura 4.13 mostra o ponto de lançamento do efluente desta ETE.



Figura 5.12 – Vista da ETE Primavera.



Figura 5.13 – Ponto de lançamento da ETE Primavera.

A ETE São Simão, que atende aproximadamente a 72% da população, é formada por duas lagoas: uma anaeróbia seguida de uma facultativa, sendo que, no projeto original foram previstas duas lagoas anaeróbias e uma lagoa facultativa. A vazão do efluente é 29,21 L/s. Tal como a estação Primavera, a estação não possui tratamento preliminar, não apresenta operação adequada⁴ e não possui monitoramento para controle do processo. As características

⁴ Durante a visita, o operador descreveu seu trabalho como sendo o de retirar a vegetação que nasce em torno das lagoas e remover o lodo gerado nas lagoas, que é disposto sem tratamento no próprio terreno da estação.

do efluente foram obtidas no processo de licenciamento ambiental e são apresentadas na Tabela 5.6.

Tabela 5.6 – Dados do efluente da ETE São Simão, em Abaeté, MG.

Unidade	Lagoa anaeróbia		Lagoa Facultativa
	Entrada	Saída	Saída
DBO (mg/L)	325,7	150,1	17,0
DQO (mg/L)	901,0	345,2	88,6
Coliformes totais (NMP/100mL)	9,00E+08	2,40E+08	5,00+05
Coliformes fecais (NMP/100mL)	2,40E+08	1,60E+08	3,00+05

As Figuras 5.14 a 5.16 a seguir mostram as unidades da ETE São Simão.



Figura 5.14 – Vista da ETE São Simão.



Figura 5.15 – Lagoa Anaeróbia de ETE São Simão.



Figura 5.16 – Lagoa facultativa da ETE São Simão.

Foram encontrados e cadastrados cinco pontos de lançamentos de esgotos sanitários *in natura* no município de Abaeté (Tabela 5.7 e Figuras 5.17 a 5.21).

Tabela 5.7– Localização dos lançamentos *in natura* do município de Abaeté.

Ponto de lançamento	Latitude	Longitude	Figura
Abaeté-1	19°09'51"S	45°27'12"W	4.19
Abaeté-2	19°09'52"S	45°26'54"W	4.20
Abaeté-3	19°09'48"S	45°26'45"W	4.21
Abaeté-4	19°10'08"S	45°26'33"W	4.22
Abaeté-5	19°09'48"S	45°26'25"W	4.23

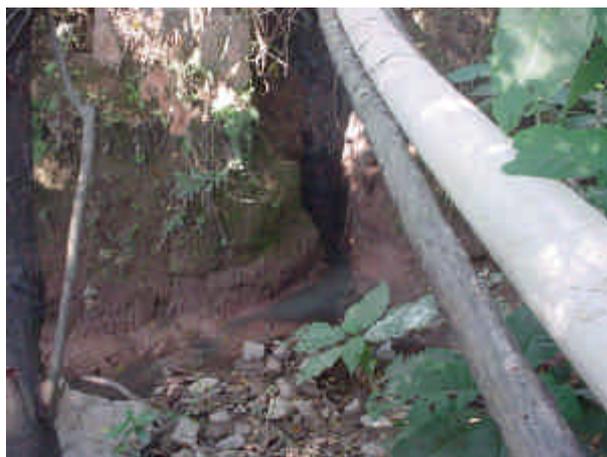


Figura 5.17 – Ponto de lançamento de esgoto *in natura* Abaeté-1.



Figura 5.18 – Ponto de lançamento de esgoto *in natura* Abaeté-2.



Figura 5.19 – Ponto de lançamento de esgoto *in natura* Abaeté-3.



Figura 5.20 – Ponto de lançamento de esgoto *in natura* Abaeté-4.



Figura 5.21 – Ponto de lançamento de esgoto *in natura* Abaeté-5.

Conforme dados obtidos na prefeitura municipal de Abaeté, a ETE São Simão é responsável pelo tratamento dos esgotos gerados por 72 % da população de 22.330 habitantes (IBGE, 2000). Para efeitos do estudo de caso, foi estimada a vazão e a carga dos lançamentos *in natura*. Assim, considerando-se: (i) que 28% da população (6.252 habitantes) não é atendida por tratamento dos esgotos; (ii) que o consumo *per capita* de água é de 160 L/hab.d; e (iii) que o coeficiente de retorno esgoto/água $R = 0,8$ (von Sperling, 2005), obtém-se uma vazão média de esgotos $Q_{med} = 800 \text{ m}^3/\text{d}$ (9,3 L/s). Além disto, considerando-se a produção *per capita* de 50g $\text{DBO}_5/\text{hab.d}$, obtém-se uma carga doméstica total de 50 g/hab.d, que, para os 6.252 habitantes não atendidos por tratamento de esgoto, perfaz um total de 313 kg/d de DBO. Para a vazão média de esgotos de 9,3 L/s, a concentração do efluente bruto lançado no

ribeirão Marmelada é igual a 391 mg/L. Esta estimativa foi considerada nas simulações dos cenários para a bacia do ribeirão Marmelada, visto que a Lei 9433/97 define no inciso III do parágrafo 12 que estão sujeitos a outorga os lançamentos em corpo d'água de esgotos e demais resíduos líquidos ou gasosos, tratados ou não, com fim de sua diluição, transporte ou disposição final.

5.4.5 Empreendimento 5

O Empreendimento 5 possui uma estação de tratamento de esgotos formada por fossas, seguidas por sumidouros, não havendo lançamento direto no corpo d'água. As coordenadas da ETE são 19°09'01''S e 45°42'53''W. Na Figura 5.22 é apresentada uma vista da estação.



Figura 5.22 – Vista da ETE do Empreendimento 5.

5.5 DIAGRAMA UNIFILAR

Na Figura 4.24 é apresentado o diagrama unifilar da bacia, considerando-se apenas os pontos que foram empregados nos cenários do estudo de caso. A distância entre cada dois lançamentos consecutivos é de, aproximadamente, 1 km, o que faz que apareçam agrupados em um ponto do diagrama da Figura 5.23.

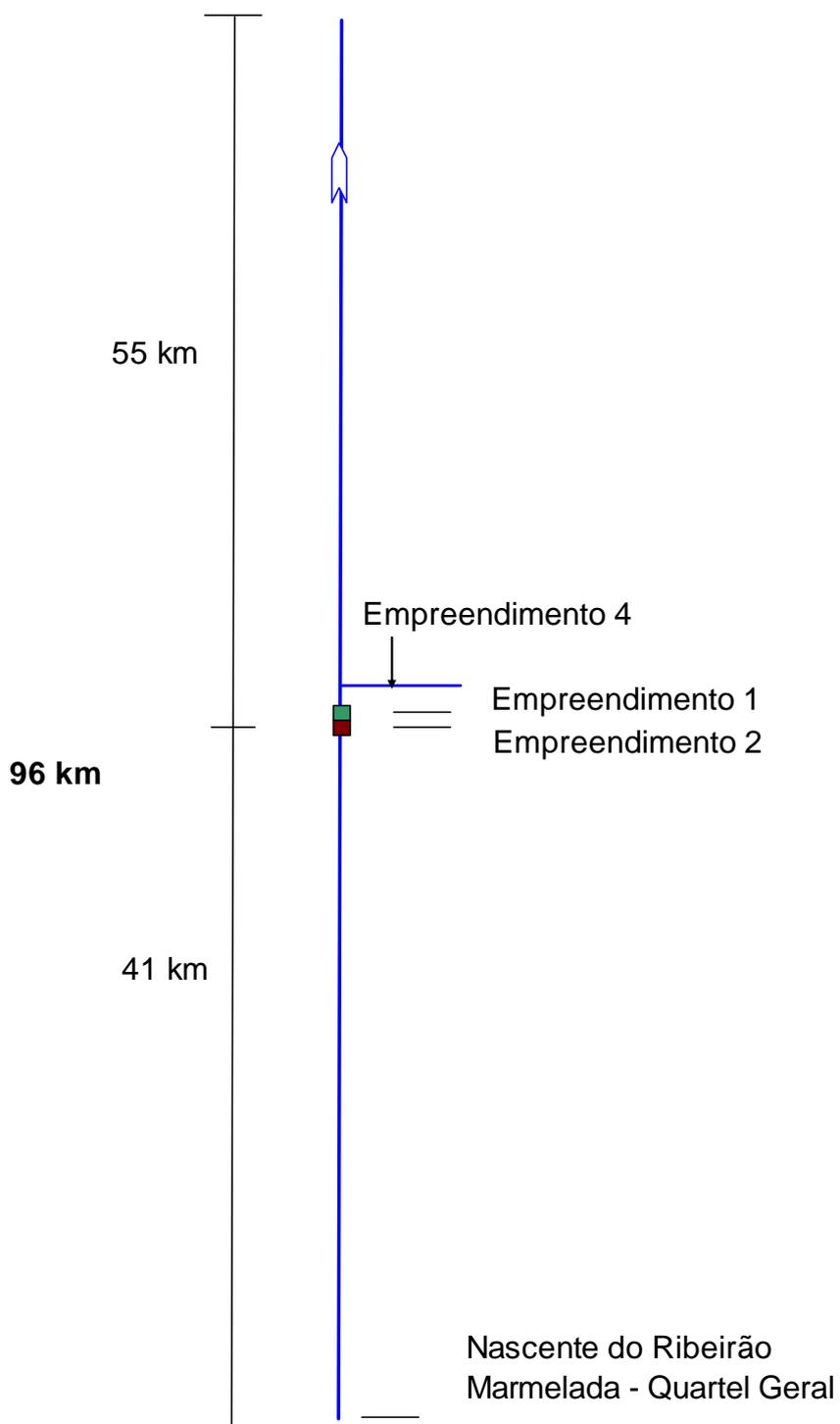


Figura 5.23 – Diagrama unifilar da bacia do ribeirão Marmelada com os lançamentos utilizados no estudo de caso.

6 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Este capítulo é dividido em duas partes: na primeira, apresentam-se os resultados obtidos para a etapa de simulações de cenários em uma bacia hipotética e, na segunda parte, aplicam-se os cenários a um estudo de caso na bacia do ribeirão Marmelada.

6.1 SIMULAÇÕES EM UMA BACIA HIPOTÉTICA

Neste caso, foram testados os modelos, a localização de cargas lançadas, as vazões de referência e o estado anterior do curso d'água quanto à concentração de DBO. Na primeira etapa dessas simulações, foram realizados testes em 12 cenários, conforme anteriormente descrito (Cap. 4).

Na segunda etapa, a fim de testarem-se outros fatores pertinentes à definição da metodologia adequada à outorga para lançamento de efluentes, realizaram-se outras quatro simulações em alguns dos cenários das simulações iniciais, em que foram testados os seguintes fatores:

- a) Para os cenários 7 e 8, a localização dos lançamentos, para verificar a influência da localização do usuário no valor da vazão de diluição necessária para atender as condições de lançamento;
- b) Nos cenários 7 a 12, a influência da vazão de referência para representar regiões de Minas Gerais com condições hídricas de carência e abundância;
- c) Também nos cenários 7 a 12, a eficiência do tratamento para atingir-se o padrão de lançamento de DBO = 60 mg/L, valor máximo admitido pela resolução COPAM N^o 10/86, para cada lançamento individual;
- d) Ainda nos cenários 7 a 12, a eficiência do tratamento para atingir-se o padrão de corpo d'água de Classe 2, definido pela resolução CONAMA N^o 357/2005, de DBO = 5 mg/L na mistura, para cada lançamento individual.

Nessas quatro simulações extras, os valores dos parâmetros de entrada no modelo, adotados nos cenários das simulações iniciais, foram mantidos inalterados.

6.1.1 Primeira etapa das simulações em bacia hipotética

Nesta etapa, foram simulados os doze cenários anteriormente caracterizados (item 4.2). Os dados de vazão do curso d'água utilizados para a simulação na bacia hipotética foram a média das vazões específicas q_{90} , q_{95} e $q_{7,10}$ para o Estado de Minas Gerais (Tabela 6.1), calculadas conforme o Apêndice 1 (UFV, 2005).

Tabela 6.1 – Vazões específicas médias do Estado de Minas Gerais.

Vazão Específica, q (L/s.km ²)	$q_{7,10}$	q_{95}	q_{90}
	3,1	4,5	5,8

Na avaliação do estado qualitativo do curso d'água foram consideradas duas situações nos cenários: o rio em condições naturais, ou seja, DBO = 1 mg/L, e o rio com a qualidade atual representada por medições. Para tanto, foi calculada a média das medições de DBO do Projeto Águas de Minas (IGAM, 1997-2004), para os rios do Estado de Minas Gerais. O valor obtido foi 4,3 mg/L.

Por fim, em cada um dos cenários calculou-se a vazão de diluição (Equação 6.1), considerando: (i) o lançamento como se fosse único no trecho; e (ii) os diversos usuários ao longo do trecho. A vazão de diluição calculada é utilizada nos processos de outorga para lançamento de efluentes, que somente poderá ser concedida se o valor calculado for inferior à vazão máxima outorgável.

$$Q_{dil} = Q_{esg} \cdot \frac{(DBO_{esg} - DBO_{perm})}{(DBO_{perm} - DBO_{rio})} \quad (6.1)$$

Nas simulações da primeira etapa foram considerados três lançamentos em um rio hipotético de 100 km de extensão: o primeiro a 1 km (início do trecho), o segundo a 33 km (1/3 do percurso) e o último a 67 km (2/3 do percurso), em pontos denominados 1, 2 e 3, respectivamente. A concentração de DBO dos lançamentos é de 75 mg/L, que se refere a um tratamento com eficiência de 75% para o esgoto bruto com concentração de 300mg/l, com as

seguintes vazões para lançamentos nos pontos 1, 2 e 3: 0,200 m³/s, 0,100 m³/s e 0,05 m³/s, representando, assim, diferentes cargas. A Figura 6.1 apresenta o diagrama unifilar dos lançamentos hipotéticos.

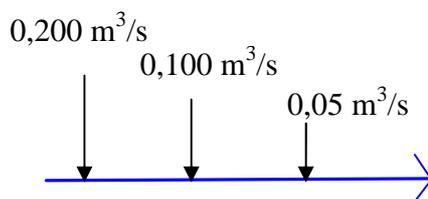


Figura 6.1 – Diagrama unifilar dos lançamentos hipotéticos.

Nos cenários hipotéticos, supondo que a cada 1 km percorrido no corpo d'água tem-se um acréscimo de 1 km² na área, é possível calcular as vazões de referência nos pontos em que ocorre cada um dos lançamentos (Tabela 6.2). A partir do mesmo critério, considerou-se que a cada 1 km no corpo d'água ocorre uma contribuição de vazão incremental com o valor igual à vazão específica utilizada nos cenários.

Tabela 6.2 – Vazões de referência nos pontos de lançamentos.

Ponto de lançamento	Área de drenagem (km ²)	Vazões de referência (L/s)		
		Q _{7,10}	Q ₉₅	Q ₉₀
1	1,0	3,1	4,5	5,8
2	33	102,3	148,5	191,4
3	67	207,7	301,5	388,6

Em seguida, considerando as vazões dos efluentes lançados nos pontos 1, 2 e 3 respectivamente iguais a 200, 100 e 50 L/s, é possível efetuar o cálculo da razão de diluição (Tabela 6.3) para cada um dos lançamentos, nas vazões de referência da Tabela 6.2. Segundo von Sperling (2005), o conhecimento da razão de diluição, quociente entre a vazão do rio, Q_r, e a vazão do efluente, Q_e, permite estimativas rápidas do impacto do lançamento de esgotos no corpo d'água. Para um mesmo lançamento, o impacto será tão maior quanto menor for a razão de diluição.

Tabela 6.3 – Razão de diluição resultante.

Vazão de referência	Razão de diluição resultante ($R = Q_r/Q_e$)		
	Ponto 1	Ponto 2	Ponto 3
$Q_{7,10}$	0,015	1,02	4,15
Q_{90}	0,023	1,48	6,03
Q_{95}	0,029	1,91	7,77

6.1.1.1 Avaliação dos cenários hipotéticos - Equação da Mistura

Nos cenários 1 a 6 foi utilizada a Equação da Mistura, fazendo-se K_1 igual a zero, ou seja, não foi considerada a capacidade de autodepuração do corpo d'água. As demais variáveis testadas foram a vazão de referência, e a condição inicial do corpo d'água expressa em termos de DBO (DBO_{rio}). A Tabela 6.4 apresenta os resultados obtidos para as vazões de diluição e os valores inicial – considerado após o primeiro lançamento – e final do perfil de DBO, assim como as condições iniciais de cada cenário. As Figuras 6.2 e 6.3 apresentam gráficos que descrevem os perfis de DBO no trecho do rio, para cada um dos cenários. Nesses e nos demais gráficos de perfil de DBO, os pontos de lançamento são representados, nas abscissas, por triângulos cheios.

Tabela 6.4 – Vazão de diluição e DBO para os cenários 1 a 6 (Equação da Mistura).

Cenários	Vazão de referência	Qualidade do corpo d'água	DBO (mg/L)		Vazão de diluição requerida (m^3/s)					
			inicial	final	Cenários sem lançamentos anteriores			Cenários com lançamentos anteriores		
					Ponto 1	Ponto 2	Ponto 3	Ponto 1	Ponto 2	Ponto 3
1	$Q_{7,10}$	Natural	73	40	3,5	1,75	0,87	3,5	-0,16	-0,09
2		Atual	73	40	20	10	5	20	-0,16	-0,09
3	Q_{90}	Natural	71	29	3,5	1,75	0,87	3,5	-0,21	-0,12
4		Atual	71	29	20	10	5	20	-0,21	-0,12
5	Q_{95}	Natural	72	33	3,5	1,75	0,87	3,5	-0,18	-0,11
6		Atual	72	33	20	10	5	20	-0,18	-0,11

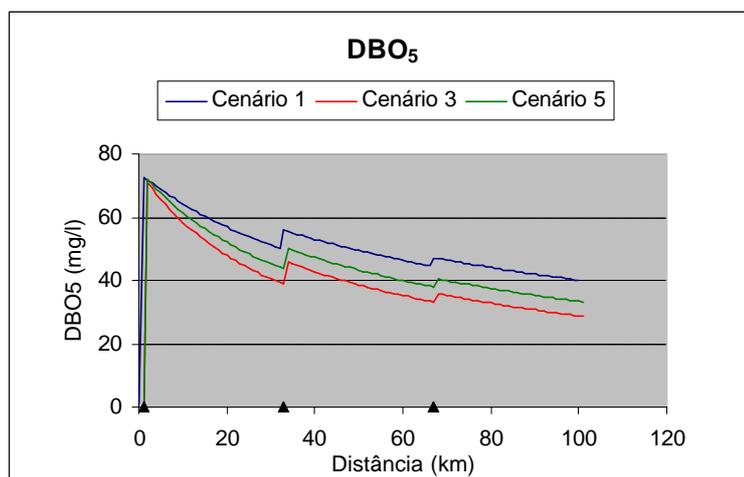


Figura 6.2 – Perfil de DBO – Cenários 1, 3 e 5.

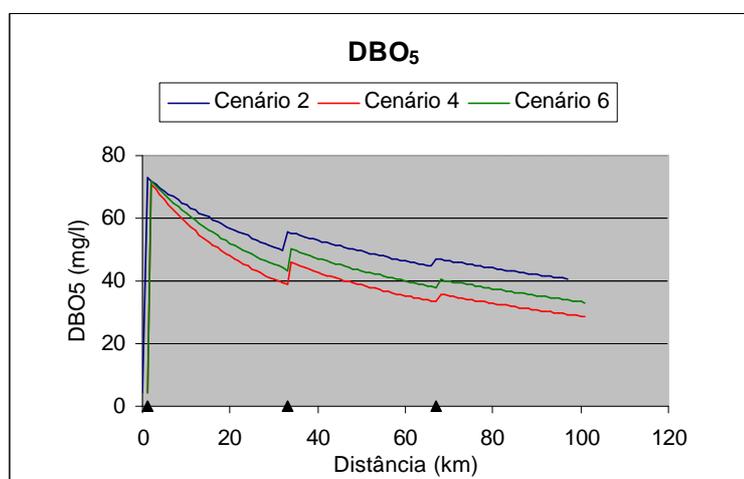


Figura 6.3 – Perfil de DBO – Cenários 2, 4 e 6.

As Figuras 6.2 e 6.3 mostram que o perfil de DBO é praticamente o mesmo, quando é utilizada a mesma vazão de referência, o que leva à conclusão que a condição inicial do corpo d'água em termos de DBO não tem grande influência no perfil. Observa-se ainda que, quanto menor a vazão de referência, maior a DBO final do perfil. O decaimento no valor de DBO observado nas Figuras 6.2 e 6.3 é causado exclusivamente pela vazão incremental considerada nas simulações, uma vez que nos cenários 1 a 6 o valor de K_1 é zero.

As Figuras 6.4 e 6.5 apresentam as vazões de diluição por ponto de lançamento, nos cenários 1 a 6.

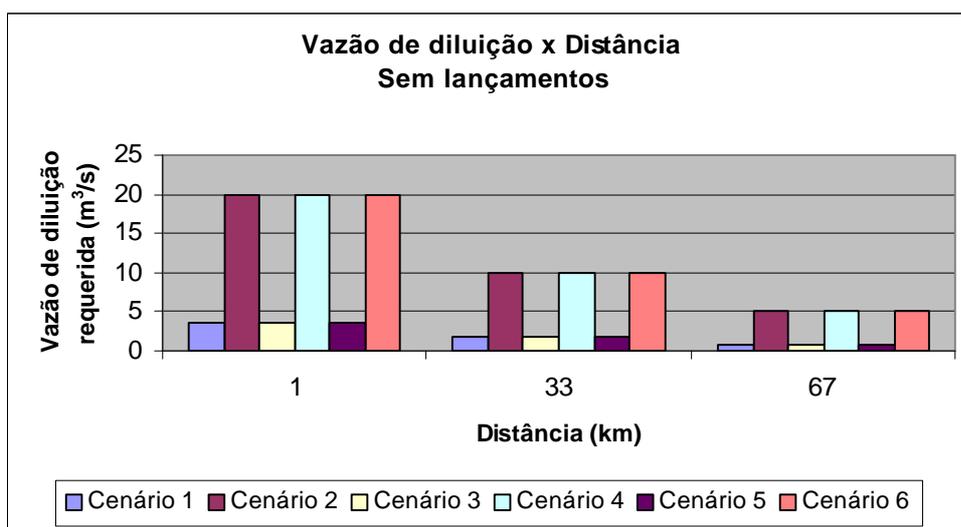


Figura 6.4 – Vazão de diluição – Cenários 1 a 6 – Sem lançamentos anteriores.

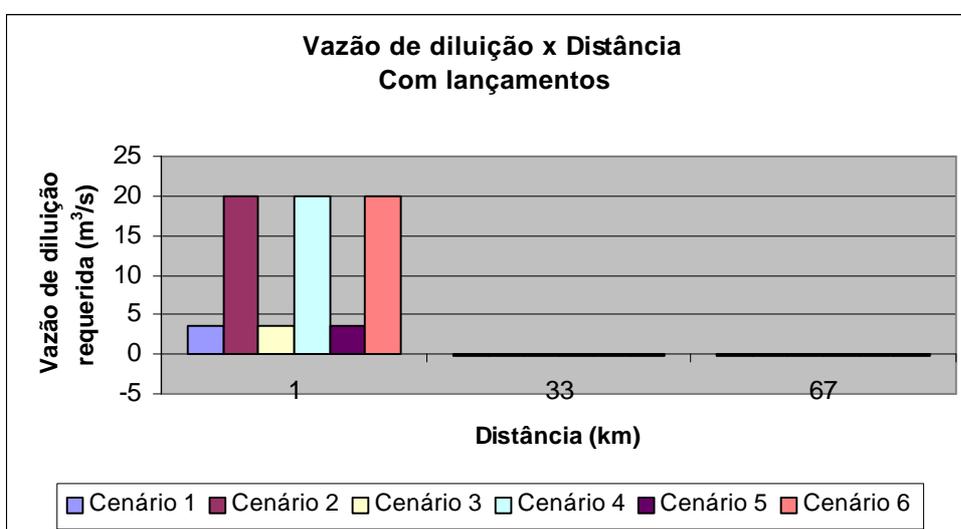


Figura 6.5 – Vazão de diluição – Cenários 1 a 6 – Com lançamentos anteriores.

Na Tabela 6.4 observa-se que, quando não se consideram lançamentos anteriores, a vazão de diluição requerida para a condição atual do corpo d'água em termos de DBO é aproximadamente 6 vezes superior à vazão de diluição na condição natural (DBO = 1,0 mg/L). Esta relação não é constante e depende das condições do corpo d'água e do lançamento. Desta forma, quando se utiliza a condição natural do corpo d'água na análise de uma outorga para lançamento de efluentes, a vazão reservada no rio, para que se atenda ao padrão de corpo d'água de classe 2 (DBO = 5,0 mg/L) é menor que a vazão que realmente deveria ser alocada para o lançamento.

Ainda de acordo com os dados apresentados na Tabela 6.4, quando se consideram lançamentos anteriores no trecho, percebe-se que, a partir do segundo lançamento, todos os valores de vazão de diluição tornam-se negativos, ou seja, o valor da DBO do rio é superior a 5,0 mg/L e o rio já está fora dos padrões. Pode-se ainda observar que os valores da vazão de diluição do segundo e terceiro lançamentos são iguais para a condição atual e natural. Isto se deve ao fato de que o valor considerado para a DBO do corpo d'água é o valor da DBO anterior a esse lançamento. Conforme já constatado, o perfil é praticamente o mesmo quando se trata da mesma vazão de referência. Nessas condições, as vazões de diluição são iguais. Por fim, pode-se observar que as vazões de diluição do segundo e terceiro lançamentos apresentam o maior valor para a vazão $Q_{7,10}$, e sucessivamente menores para Q_{95} e Q_{90} .

A análise comparativa entre os cenários que não consideram os lançamentos anteriores com aqueles que os consideram demonstra que os valores de vazão de diluição para o primeiro lançamento são semelhantes nos dois casos. Entretanto, quando se consideram lançamentos anteriores, o segundo e o terceiro lançamentos resultam em valores de DBO no rio acima do valor limite. Nos casos de processos de outorga, o fato impede a concessão. É notável que os valores obtidos para a vazão de diluição sejam negativos, devido ao fato de que, no ponto do segundo ou terceiro lançamento, o rio já está em desacordo com o seu enquadramento.

6.1.1.2 Avaliação dos cenários hipotéticos – Modelo de Streeter-Phelps

Nos cenários 7 a 12 foi utilizado o modelo de Streeter-Phelps, considerando desta forma a capacidade de autodepuração do corpo d'água. A Tabela 6.5 apresenta os resultados obtidos para cada um dos cenários. Por sua vez, as Figuras 6.6 e 6.7 apresentam os perfis de DBO.

Tabela 6.5 – Vazão de diluição e DBO para os cenários 7 a 12 (Streeter-Phelps).

Cenários	Vazão de referência	Qualidade do corpo d'água	DBO (mg/L)		Vazão de diluição requerida (m ³ /s)					
			inicial	final	Cenários sem lançamentos anteriores			Cenários com lançamentos anteriores		
					Ponto 1	Ponto 2	Ponto 3	Ponto 1	Ponto 2	Ponto 3
7	Q _{7,10}	Natural	72	19	3,5	1,75	0,87	3,5	-0,22	-0,16
8		Atual	72	19	20	10	5	20	-0,22	-0,16
9	Q ₉₀	Natural	70	14	3,5	1,75	0,87	3,5	-0,29	-0,23
10		Atual	70	14	20	10	5	20	-0,29	-0,23
11	Q ₉₅	Natural	71	16	3,5	1,75	0,87	3,5	-0,26	-0,20
12		Atual	71	16	20	10	5	20	-0,26	-0,20

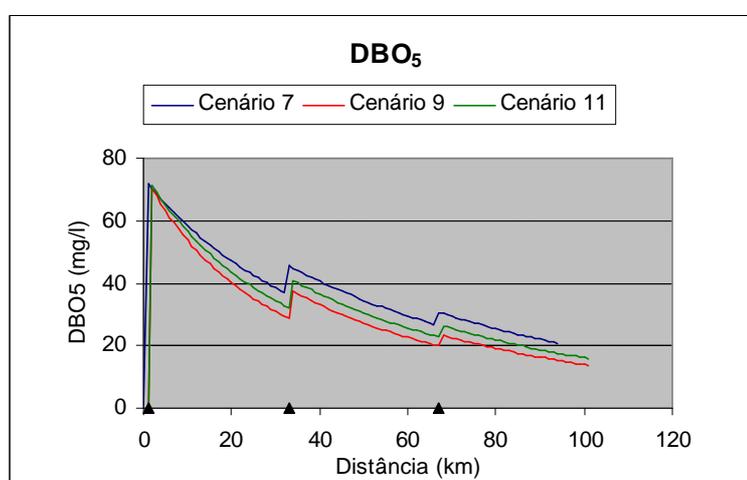


Figura 6.6 – Perfil de DBO – Cenários 7, 9 e 11

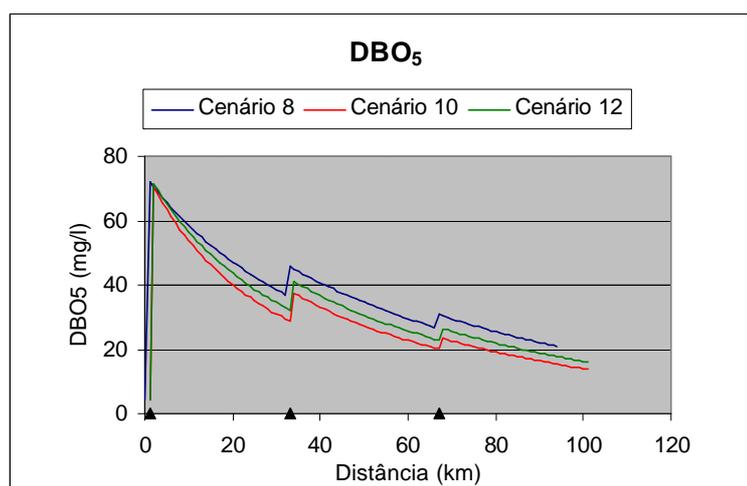


Figura 6.7 – Perfil de DBO – Cenários 8, 10 e 12

De modo geral, as constatações apresentadas para os cenários 1 a 6 repetem-se nos cenários 7 a 12. A principal diferença entre os dois grupos é que o valor final do perfil de DBO é menor em todos os cenários do grupo 7 a 12, uma vez que nesta etapa é considerada a capacidade de autodepuração do corpo d'água.

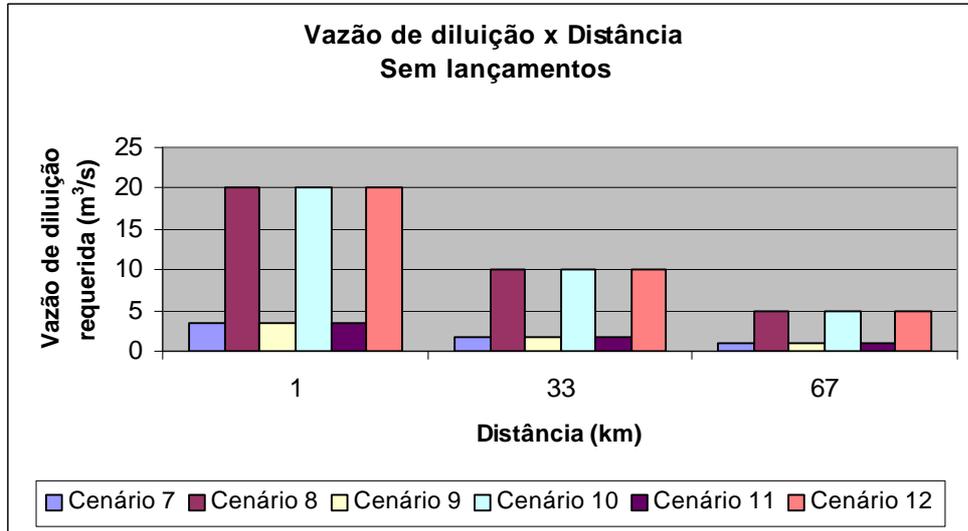


Figura 6.8 – Vazão de diluição – Cenários 7 a 12 – Sem lançamentos anteriores.

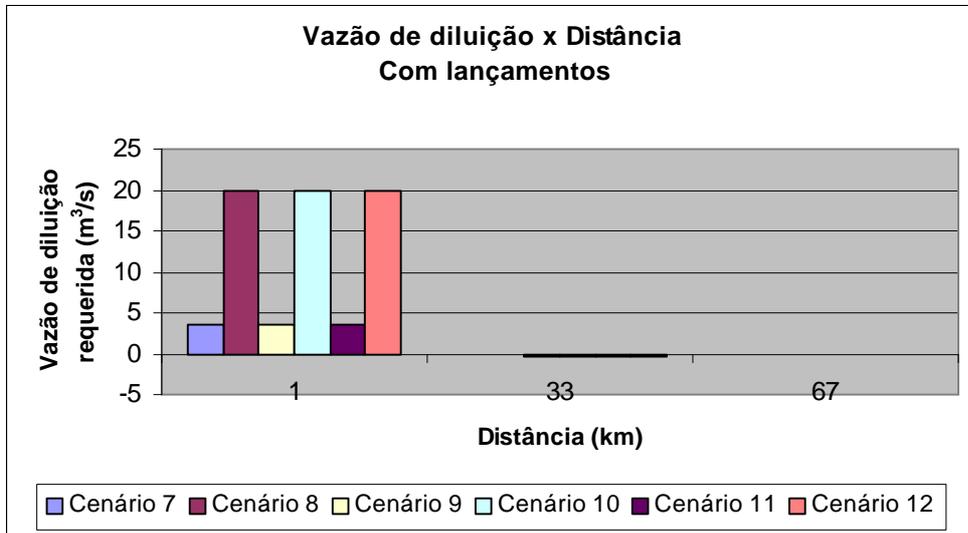


Figura 6.9 – Vazão de diluição – Cenários 7 a 12 – Com lançamentos anteriores.

As Figuras 6.8 e 6.9 permitem constatar que os valores das vazões de diluição dos lançamentos 2 e 3, quando se consideram os lançamentos anteriores, são inferiores aos correspondentes nos cenários 1 a 6. Isto acontece porque os valores de DBO do rio, utilizados na equação da vazão de diluição, são o valor da DBO do rio no trecho imediatamente anterior ao ponto de lançamento. Desta forma, o valor de DBO no rio será menor quando se leva em consideração a capacidade de autodepuração do corpo d'água. Portanto, neste caso, ao ser utilizada a equação da mistura, a vazão reservada será superior àquela necessária para o atendimento ao padrão, fato que pode inviabilizar um usuário a jusante do ponto de lançamento.

Uma observação importante para todos os 12 cenários é que os valores das vazões de diluição obtidos são muito grandes: o menor valor obtido é $0,87 \text{ m}^3/\text{s}$. Considerando-se que a cada 1 km percorrido no corpo d'água tem-se um acréscimo de 1 km^2 na área, as vazões estimadas $Q_{7,10}$, Q_{95} e Q_{90} , no ponto referente à vazão de diluição de $0,87 \text{ m}^3/\text{s}$ são, respectivamente, $0,21$, $0,30$ e $0,39 \text{ m}^3/\text{s}$. Ou seja, qualquer uma das vazões de referência adotadas não seria suficiente para outorgar o lançamento, uma vez que a concessão da outorga deve ocorrer quando o valor da vazão de diluição for inferior à vazão máxima outorgável definida em função de uma vazão de referência. Para que a outorga fosse concedida, dever-se-ia ter um rio com a vazão pelo menos 3 vezes superior, ao ser adotada a Q_{95} , por exemplo.

6.1.2 Segunda etapa das simulações em bacia hipotética

6.1.2.1 Avaliação da influência da localização do lançamento nos critérios testados

Os cenários 7 e 8 foram novamente simulados, considerando os três lançamentos em um rio hipotético de 100 km de extensão, na mesma posição anterior: o primeiro, a 1 km, o segundo a 33 km e o último a 67 km da nascente. A concentração dos lançamentos é de 75 mg/L , com a ordem das vazões tendo sido alterada, ou seja, do primeiro ao último: $0,050 \text{ m}^3/\text{s}$, $0,200 \text{ m}^3/\text{s}$ e $0,100 \text{ m}^3/\text{s}$ (Figura 6.10).

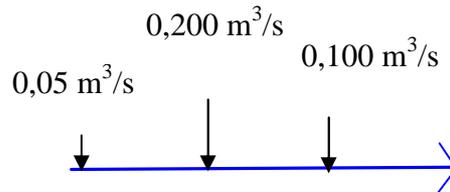


Figura 6.10 – Esquema dos lançamentos.

Para distinção em relação aos cenários 7 e 8, os cenários com a nova configuração são denominados 7a e 8a.

A Tabela 6.6 apresenta os valores inicial e final do perfil de DBO, assim como os valores da vazão de diluição requerida para cada lançamento. As Figuras 6.11 e 6.12 apresentam os perfis de DBO.

Tabela 6.6 – Vazão de diluição e DBO para cenários 7, 8, 7a e 8a (Streeter-Phelps).

Cenário		7	7a	8	8a	
Vazão de referência		$Q_{7,10}$	$Q_{7,10}$	$Q_{7,10}$	$Q_{7,10}$	
Qualidade do corpo d'água		Natural	Natural	Atual	Atual	
DBO (mg/L)	Inicial	72	66	72	66	
	final	19	23	19	23	
Vazão de diluição requerida (m ³ /s)	Cenários sem lançamentos anteriores	Ponto 1	3,50	3,50	20	20
		Ponto 2	1,75	1,75	10	10
		Ponto 3	0,87	0,87	5	5
	Cenários com lançamentos anteriores	Ponto 1	3,50	-1,01	20	-1,01
		Ponto 2	-0,22	-0,30	-0,22	-0,30
		Ponto 3	-0,16	0,87	-0,16	5

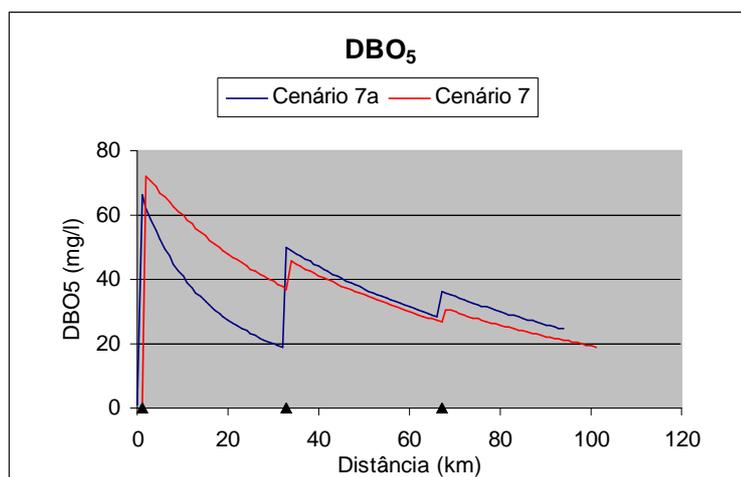


Figura 6.11 – Perfil de DBO – Cenários 7 e 7a.

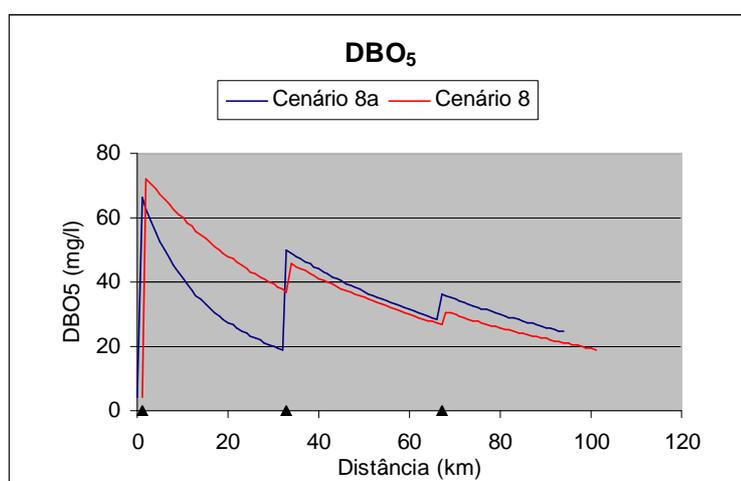


Figura 6.12 – Perfil de DBO – Cenários 8 e 8a.

As Figuras 6.11 e 6.12 mostram que o perfil de DBO altera-se, uma vez que a configuração dos lançamentos são alteradas. Os valores inicial e final de DBO nos perfis são, respectivamente, 66 a 23 mg/L, apresentando picos maiores que aqueles dos cenários 7 e 8, em função dos lançamentos com vazões maiores encontrarem-se no interior do trecho analisado.

Os resultados apresentados na Tabela 6.6 permitem observar que, quando não se consideram os lançamentos anteriores, os valores das vazões de diluição permanecem os mesmos, independentemente da localização de cada lançamento. Porém, considerando os lançamentos anteriores no cálculo da vazão de diluição, a localização tem influência no valor obtido.

Nos casos semelhantes ao do lançamento 1, usuários com efluentes com características semelhantes de vazão e concentração de DBO localizados em locais diferentes teriam vazões de diluição diferentes. Para se comprovar este fato, foi realizada uma simulação com o cenário 7', com as condições iniciais e as seguintes alterações com relação ao cenário 7:

a) todos os lançamentos são iguais, com vazão de 0,200 m³/s e localizados em três pontos: no início do trecho, a 1/3 e a 2/3 do comprimento do corpo d'água;

b) eficiência de tratamento de 97% (valor mínimo de eficiência para que todas as vazões de diluição sejam positivas neste cenário), que resulta em DBO de 9 mg/L.

Os resultados obtidos para as vazões de diluição estão demonstrados na Tabela 6.7.

Tabela 6.7 – Valores de vazão de diluição e DBO no corpo d'água para o cenário 7'.

Cenário	Vazão de referência	Condição qualitativa do corpo d'água	Vazão de diluição requerida (m ³ /s)					
			Cenários sem lançamentos anteriores			Cenários com lançamentos anteriores		
			Início	1/3	2/3	Início	1/3	2/3
7'	Q _{7,10}	Natural	0,20	0,20	0,20	0,20	2,60	0,79

Observa-se que, quando se consideram os usuários anteriores, o mesmo lançamento apresenta três valores diferentes para a vazão de diluição em função da sua localização.

Uma implicação desta alteração dos valores da vazão de diluição em função da localização para um mesmo lançamento é na cobrança pelo uso dos recursos hídricos. Caso o Comitê de Bacia Hidrográfica resolva pela cobrança calculada segundo a vazão de diluição, usuários iguais localizados em locais diferentes no corpo d'água pagariam valores diferentes.

6.1.2.2 Avaliação dos cenários em uma região de grande e outra de pequena disponibilidade hídrica no Estado de Minas Gerais

Nessa avaliação, foram realizados dois testes utilizando-se as mesmas configurações dos cenários 7 a 12: o primeiro, simulou a bacia com menor disponibilidade hídrica no Estado; o segundo, a bacia com maior disponibilidade.

a) Região com menor disponibilidade hídrica em MG

A região que apresenta $Q_{7,10}$, Q_{90} e Q_{95} com menores vazões específicas é a região III das Bacias do Leste (UFV, 2005). Visto que essa região não possui estação de monitoramento de qualidade das águas do Projeto Águas de Minas (IGAM, 1997-2004), a bacia escolhida foi a região I da bacia do Jequitinhonha, que, embora seja a segunda com menor disponibilidade hídrica, é monitorada no referido Projeto.

A região escolhida é a Unidade de Planejamento e Gestão de Recursos Hídricos - UPGRH JQ1 de Minas Gerais e engloba a nascente do rio Jequitinhonha até a montante da confluência com o rio Salinas (DN CERH nº 04/2002). As vazões por sub-bacias, assim como suas respectivas áreas de drenagem estão apresentadas no Tabela 6.8.

Tabela 6.8 – Vazões e áreas de drenagem das sub-bacias da região I da bacia do Jequitinhonha.

Sub-bacia	Área de drenagem (km ²)	Vazão (m ³ /s)			Vazão específica (l/s.km ²)		
		Q _{7,10}	Q ₉₅	Q ₉₀	q _{7,10}	q ₉₅	q ₉₀
Mendanha - Montante	1391	1,24	2,88	3,95	0,89	2,07	2,84
Ponte Vacaria	2556	1,69	3,93	5,34	0,66	1,54	2,09
Grão Mogol (Faz. Jambreiro)	4100	2,28	5,32	7,20	0,56	1,30	1,76
Vila Terra Branca	7780	3,70	8,63	11,61	0,48	1,11	1,49
Porto Mandacaru	16343	7,0	16,34	21,89	0,43	1,00	1,34
Barra do Salinas	23815	9,87	23,06	30,85	0,41	0,97	1,30
Média		4,30	10,03	13,47	0,57	1,33	1,80

Fonte: Atlas Digital das Águas de Minas, 2005.

Na bacia escolhida, o Projeto Águas de Minas mantém 4 estações de monitoramento de qualidade das águas, denominadas JE 001, JE 003, JE 005 e JE 007. A média da série histórica de DBO para estas estações é de 2,38 mg/L.

Para facilitar a distinção dos cenários anteriores, os cenários para a região de menor disponibilidade hídrica são denominados 7b, 8b, 9b, 10b, 11b, 12b. Os resultados obtidos para estes cenários estão resumidos na Tabela 6.9 e nas Figuras 6.13 e 6.14.

Tabela 6.9 – Vazão de diluição e DBO para os cenários 7b a 12b (Streeter-Phelps).

Cenários	Vazão de referência	Qualidade do corpo d'água	DBO (mg/L)		Vazão de diluição requerida (m ³ /s)					
			inicial	final	Cenários sem lançamentos anteriores			Cenários com lançamentos anteriores		
					Ponto 1	Ponto 2	Ponto 3	Ponto 1	Ponto 2	Ponto 3
7b	Q _{7,10}	Natural	74	31	3,50	1,75	0,87	3,5	-0,15	-0,10
8b		Atual	74	31	5,34	2,67	1,34	5,34	-0,15	-0,10
9b	Q ₉₀	Natural	73	24	3,50	1,75	0,87	3,5	-0,18	-0,13
10b		Atual	73	24	5,34	2,67	1,34	5,34	-0,18	-0,13
11b	Q ₉₅	Natural	73	26	3,50	1,75	0,87	3,5	-0,17	-0,12
12b		Atual	73	26	5,34	2,67	1,34	5,34	-0,17	-0,12

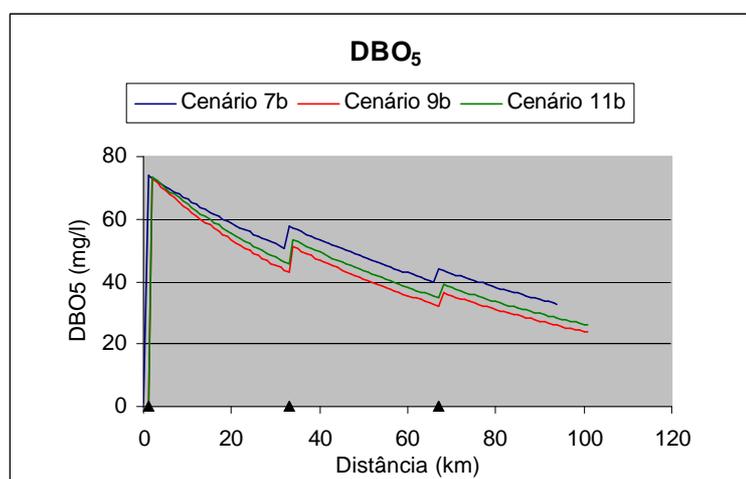


Figura 6.13 – Perfil de DBO – Cenários 7b, 9b e 11b.

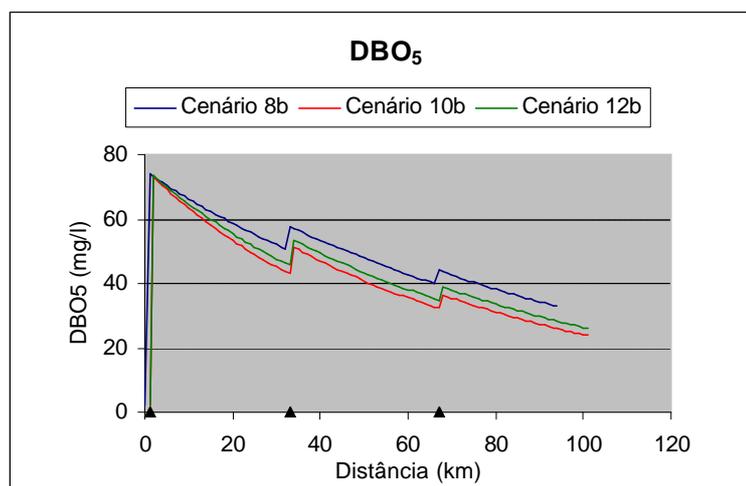


Figura 6.14 – Perfil de DBO – Cenários 8b, 10b e 12b.

Os valores finais da concentração de DBO dos cenários 7b a 12b foram maiores que os correspondentes dos cenários 7 a 12, uma vez que as vazões dos primeiros são menores. Dado que os valores da vazão de diluição não dependem diretamente da vazão do corpo d'água, as vazões para as condições naturais, sem considerar os lançamentos anteriores, permaneceram constantes. Já quando se consideram as condições atuais do corpo d'água em relação à DBO, os valores obtidos são menores, pois a DBO do rio é menor (2,38 mg/L) que a considerada nos cenários 7 a 12. As vazões de diluição calculadas, considerando os lançamentos anteriores são maiores, pois o perfil de DBO apresenta valores maiores que os pontos equivalentes nos perfis dos cenários 7 a 12. Observa-se, ainda, que as vazões de diluição assumem valores altos e, para a região estudada, cujas vazões específicas médias são 0,57 l/s.km² para q_{7,10}, 1,33 l/s.km² para q₉₅ e 1,80 l/s.km² para q₉₀, seria necessária uma área de drenagem mínima de 1526 km² para que a menor vazão de diluição (0,87 m³/s) se igualasse a Q_{7,10} em um determinado ponto. Isto leva à conclusão de que, para pequenos córregos, dificilmente seria concedida uma outorga para lançamentos com as características apresentadas.

b) Região com maior disponibilidade hídrica em MG

Da mesma forma, escolheu-se a região que apresentava as maiores vazões específicas para o Estado (UFV, 2005). A região selecionada foi a região II da bacia do rio Paraíba do Sul, que

tem a delimitação coincidente com a UPGRH PS1, região da bacia do rio Paraibuna. A Tabela 6.10 apresenta as vazões para esta sub-bacia.

Tabela 6.10 – Vazões e áreas de drenagem das sub-bacias da região II da bacia do rio Paraíba do Sul.

Sub-bacia	Área de Drenagem	Vazão (m ³ /s)			Vazão específica (l/s.km ²)		
		Q _{7,10}	Q ₉₅	Q ₉₀	q _{7,10}	q ₉₅	q ₉₀
Chapéu D' uvas	379	2,80	3,97	4,58	7,39	10,47	12,08
Juiz de Fora	965	6,50	9,40	10,71	6,74	9,74	11,10
Juiz de Fora Jusante	971	6,53	9,46	10,77	6,73	9,74	11,09
Usina Brumadinho	110	0,92	1,27	1,48	8,36	11,55	13,45
Torreões	1696	10,80	15,81	17,89	6,37	9,32	10,55
Fazenda São José	2296	14,18	20,90	23,57	6,18	9,10	10,27
Fazenda Santo Antônio	2309	14,25	21,01	23,69	6,17	9,10	10,26
Sobraji	3615	21,35	31,76	35,62	5,91	8,79	9,85
Zelinda	412	3,02	4,29	4,94	7,33	10,41	11,99
Santa Rita do Jacutinga	354	2,63	3,73	4,30	7,43	10,54	12,15
Parapeuna	1800	11,39	16,70	18,89	6,33	9,28	10,49
Rio Preto	1807	11,43	16,76	18,95	6,33	9,28	10,49
Estevão Pinto	782	5,37	7,75	8,84	6,87	9,91	11,30
Média		8,55	12,52	14,17	6,78	9,79	11,16

Fonte: Altas Digital das Águas de Minas, 2005.

Na UPGRH PS1, o projeto Águas de Minas (IGAM, 1997-2004) possui 12 estações de monitoramento de qualidade das águas denominadas: BS 002, BS 006, BS 083, BS 017, BS 018, BS 061, BS 024, BS 028, BS 029, BS 031, BS 032 e BS 060. A média histórica de DBO para estas estações é de 4,40 mg/L.

Os cenários simulados nesta etapa são os mesmos considerados para a região de menor disponibilidade hídrica e foram intitulados 7c, 8c, 9c, 10c, 11c, 12c. Os resultados obtidos estão resumidos na Tabela 6.11 e nas Figuras 6.15 e 6.16.

Tabela 6.11 – Vazão de diluição e DBO para os cenários 7c a 12c (Streeter-Phelps).

Cenários	Vazão de referência	Qualidade do corpo d'água	DBO (mg/L)		Vazão de diluição requerida (m ³ /s)					
			inicial	final	Cenários sem lançamentos anteriores			Cenários com lançamentos anteriores		
					Ponto 1	Ponto 2	Ponto 3	Ponto 1	Ponto 2	Ponto 3
7c	Q _{7,10}	Natural	70	13	3,50	1,75	0,87	3,50	-0,32	-0,26
8c		Atual	70	13	23,33	11,67	5,83	23,33	-0,32	-0,26
9c	Q ₉₀	Natural	67	9	3,50	1,75	0,87	3,50	-0,46	-0,42
10c		Atual	67	9	23,33	11,67	5,83	23,33	-0,46	-0,42
11c	Q ₉₅	Natural	68	10	3,50	1,75	0,87	3,50	-0,42	-0,36
12c		Atual	68	10	23,33	11,67	5,83	23,33	-0,42	-0,36

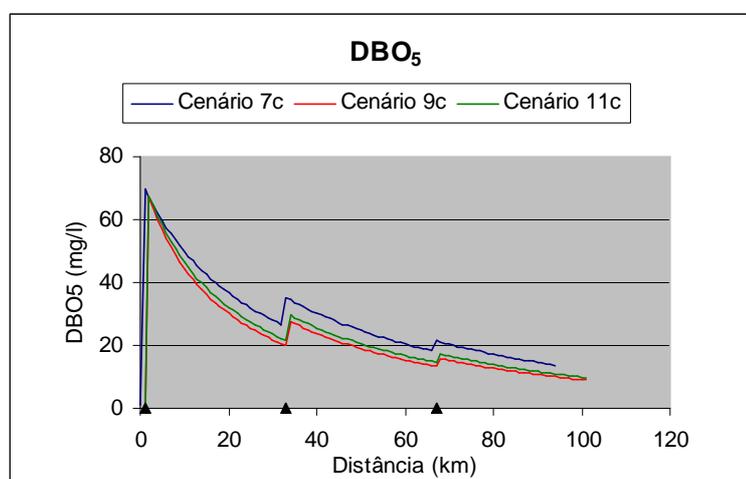


Figura 6.15 – Perfil de DBO – Cenários 7c, 9c e 11c.

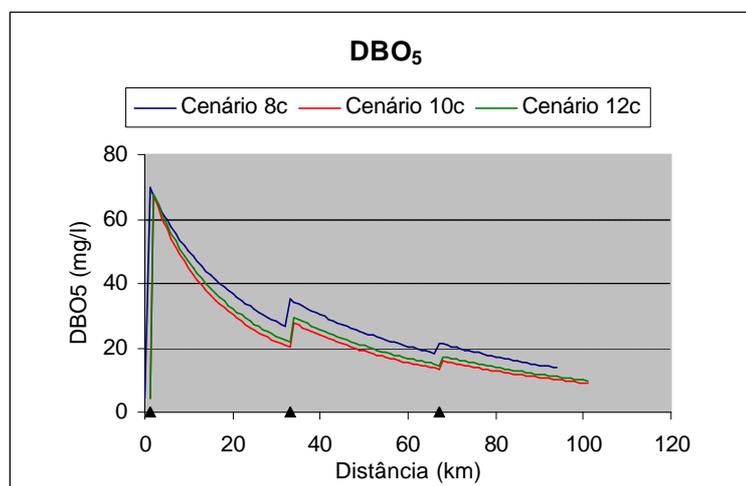


Figura 6.16 – Perfil de DBO – Cenários 8c, 10c e 12c.

Os perfis de DBO apresentam valores inferiores àqueles apresentados para os cenários 7 a 12, em função da maior vazão dos corpos d'água. Os valores das vazões de diluição são maiores quando se considera a condição atual do corpo d'água em relação a DBO, pois o valor médio de DBO nesta região é alto (4,40 mg/L). Em uma análise semelhante à realizada para os cenários 7b a 12b, é possível concluir que, considerando as vazões específicas médias para a região ($q_{7,10} = 6,78 \text{ L/s.km}^2$; $q_{95} = 9,79 \text{ L/s.km}^2$; $q_{90} = 11,16 \text{ L/s.km}^2$), seriam necessárias áreas de drenagem iguais a 128 km^2 , 89 km^2 e 78 km^2 para que a menor vazão de diluição ($0,87 \text{ m}^3/\text{s}$) se igualasse às vazões de referência $Q_{7,10}$, Q_{95} e Q_{90} , em um determinado ponto; e que as áreas de drenagem necessitariam ter valores mínimos de 3436 km^2 , 2380 km^2 e 2087 km^2 para que as vazões de referência se igualem à maior vazão de diluição ($23,3 \text{ m}^3/\text{s}$) obtida nesta simulação. Assim, é possível concluir que, se for considerada a menor vazão de diluição obtida quando se considera o corpo d'água em condição natural ($\text{DBO} = 1,0 \text{ mg/L}$), as áreas de drenagem necessárias são compatíveis com pequenos corpos d'água no interior de MG. Porém, quando se toma a situação mais crítica, ou seja, a maior vazão de diluição obtida quando se considera a condição atual do corpo d'água em relação à DBO, os valores das áreas de drenagem demandados são altos, e esses lançamentos apenas seriam autorizados em grandes rios.

6.1.2.3 Avaliação dos cenários com atendimento obrigatório ao padrão de lançamento

Para as simulações em pauta, atribuiu-se uma eficiência ao tratamento (80%, para o caso específico desta simulação) de tal modo que os efluentes atendessem ao padrão de lançamento, que, para DBO é 60 mg/L, segundo a DN COPAM 10/86. Em outras palavras, fazendo com que cada lançamento atendessem individualmente ao padrão, buscou-se observar o comportamento total do corpo d'água. Para o objetivo proposto, foram simulados, novamente, os cenários 7 a 12, que se designaram 7d, 8d, 9d, 10d, 11d, 12d. A Tabela 6.12 apresenta o resumo dos resultados obtidos, e as Figuras 6.17 e 6.18, os perfis de DBO no rio.

Tabela 6.12 – Vazão de diluição e DBO para os cenários 7d a 12d (Streeter-Phelps).

Cenários	Vazão de referência	Qualidade do corpo d'água	DBO (mg/L)		Vazão de diluição requerida (m ³ /s)					
			inicial	final	Cenários sem lançamentos anteriores			Cenários com lançamentos anteriores		
					Ponto 1	Ponto 2	Ponto 3	Ponto 1	Ponto 2	Ponto 3
7d	Q _{7,10}	Natural	58	15	2,75	1,37	0,69	2,75	-0,22	-0,17
8d		Atual	58	15	15,71	7,86	3,93	15,71	-0,22	-0,17
9d	Q ₉₀	Natural	56	11	2,75	1,37	0,69	2,75	-0,30	-0,25
10d		Atual	56	11	15,71	7,86	3,93	15,71	-0,30	-0,25
11d	Q ₉₅	Natural	57	13	2,75	1,37	0,69	2,75	-0,26	-0,21
12d		Atual	57	13	15,71	7,86	3,93	15,71	-0,26	-0,21

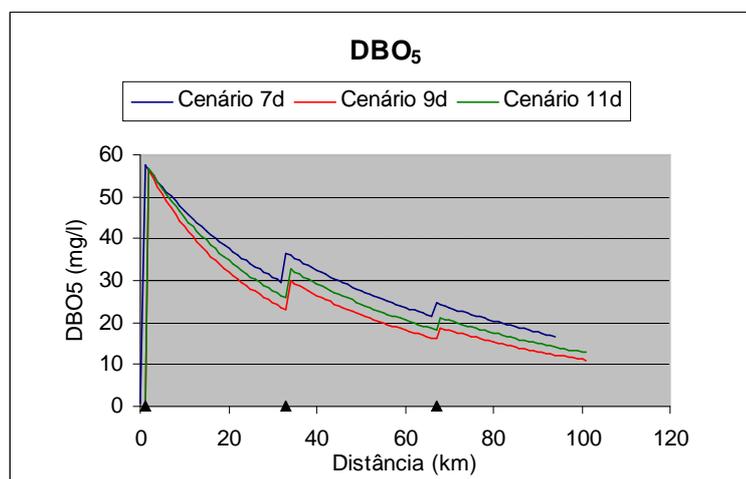


Figura 6.17 – Perfil de DBO – Cenários 7d, 9d e 11d.

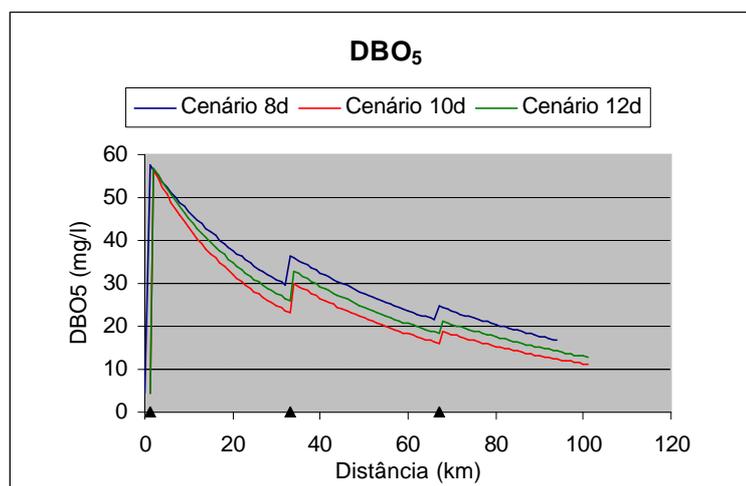


Figura 6.18 – Perfil de DBO – Cenários 8d, 10d e 12d.

Analisando-se a Tabela 6.12 pode-se observar que, quando não se consideram os lançamentos anteriores, os valores das vazões de diluição variam de 0,69 a 15,71 m³/s. O primeiro representa o valor mínimo obtido para condições naturais do corpo d'água e o segundo, o valor máximo para as condições atuais em termos de poluição por matéria orgânica. Já quando se consideram os lançamentos anteriores, os lançamentos 2 e 3 apresentam valores negativos para a vazão de diluição, ou seja o corpo d'água se encontra fora dos padrões antes do lançamento, não sendo possível a concessão da outorga. Uma importante conclusão é que, mesmo se cada lançamento atendesse ao padrão de 60 mg/L, o conjunto dos lançamentos leva o valor da DBO a superar o padrão de corpo receptor de 5 mg/L, levando assim o corpo d'água a não atender à Classe 2. Este fato é comprovado, pois os lançamentos 2 e 3, quando consideram-se os lançamentos anteriores, produzem vazões de diluição negativas.

6.1.2.4 Avaliação dos cenários com atendimento obrigatório ao padrão do corpo receptor

Ainda considerando a visão da legislação ambiental, simularam-se os cenários 7 a 12, nos quais as eficiências dos lançamentos foram aumentadas (98% de eficiência e concentração de 5 mg/L para o primeiro lançamento, 96% de eficiência e concentração de 11 mg/L para o segundo e 92% de eficiência e concentração de 24 mg/L para o terceiro), de tal forma que cada lançamento atendesse ao padrão para o corpo d'água que, para DBO, é de 5 mg/L na mistura. A seguir, foi avaliado o reflexo da utilização deste critério na bacia hidrográfica. Aqui os cenários são nomeados 7e, 8e, 9e, 10e, 11e e 12e.

A Tabela 6.13 apresenta o resumo dos resultados obtidos, as Figuras 6.19 e 6.20 apresentam os perfis de DBO.

Tabela 6.13 – Vazão de diluição e DBO para os cenários 7e a 12e (Streeter-Phelps).

Cenários	Vazão de referência	Qualidade do corpo d'água	DBO (mg/L)		Vazão de diluição requerida (m ³ /s)					
			inicial	final	Cenários sem lançamentos anteriores			Cenários com lançamentos anteriores		
					Ponto 1	Ponto 2	Ponto 3	Ponto 1	Ponto 2	Ponto 3
7e	Q _{7,10}	Natural	4,9	3,1	0,005	0,16	0,24	0,005	0,29	0,48
8e		Atual	4,9	3,1	0,03	0,91	1,36	0,03	0,29	0,48
9e	Q ₉₀	Natural	4,8	2,4	0,005	0,16	0,24	0,005	0,24	0,37
10e		Atual	4,8	2,4	0,03	0,91	1,36	0,03	0,24	0,37
11e	Q ₉₅	Natural	4,9	2,7	0,005	0,16	0,24	0,005	0,26	0,40
12e		Atual	4,9	2,7	0,03	0,91	1,36	0,03	0,26	0,40

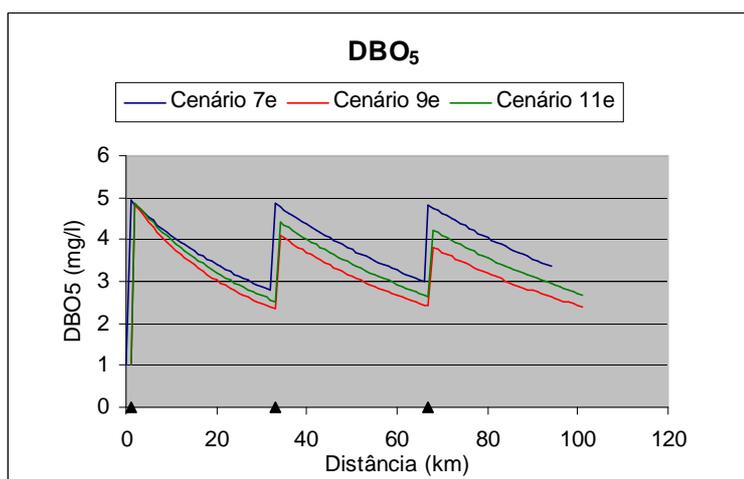


Figura 6.19 – Perfil de DBO – Cenários 7e, 9e e 11e.

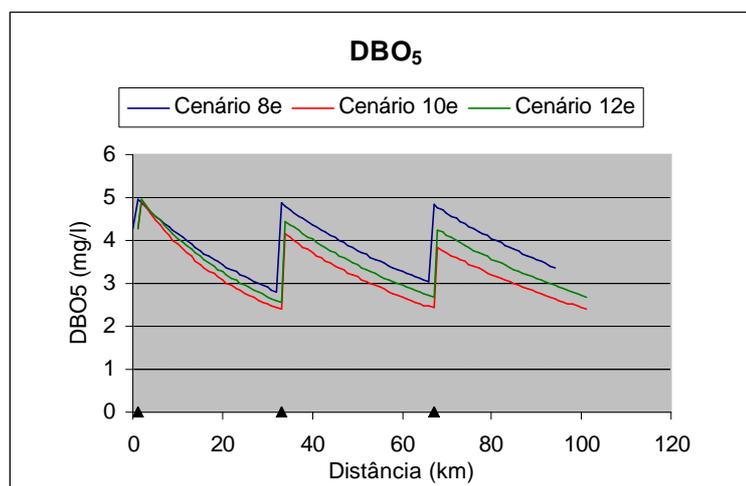


Figura 6.20 – Perfil de DBO – Cenários 8e, 10e e 12e.

A Tabela 6.13 demonstra que, caso cada lançamento atenda individualmente ao padrão de 5 mg/L na mistura, estarão garantidas as condições de enquadramento na bacia. Uma análise detalhada dos valores obtidos para as vazões de diluição leva às seguintes constatações: (i) os valores obtidos são compatíveis com a realidade dos córregos e ribeirões de Minas Gerais; (ii) para condição natural do corpo d'água, os valores de vazão de diluição dos lançamentos 2 e 3 são menores nos casos em que não se consideram os lançamentos anteriores do que quando esses são considerados. Porém, quando é considerada a situação atual do corpo d'água, este resultado se inverte. A razão é que o valor da DBO do rio, quando não se consideram os lançamentos anteriores, é o mesmo em todos os lançamentos (4,3 mg/L). Por outro lado, quando são considerados os lançamentos anteriores, o valor de DBO do rio é o valor do trecho anterior do perfil da DBO e, por considerar a capacidade de diluição do corpo d'água, é menor que o valor inicial para os cenários hipotéticos (4,3 mg/L).

Observa-se também que as eficiências requeridas, para se atender o padrão de corpo receptor para o tratamento, são altas e poucos tratamentos são capazes de remover 98% de DBO. Segundo von Sperling (2005), os lançamentos cuja eficiência do tratamento requerida é 96 e 92% exigem tratamentos tais como lodos ativados convencional ou com aeração prolongada.

6.2 ESTUDO DE CASO: SIMULAÇÕES NA BACIA DO RIBEIRÃO MARMELADA

Neste estudo de caso de uma bacia real, os cenários 1 a 12 foram empregados a fim de avaliar o comportamento das variáveis testadas na realidade de uma bacia com grande aporte de matéria orgânica.

6.2.1 Obtenção de dados de entrada

Os dados de entrada para o estudo de caso derivam de dados hidrológicos da Estação Fluviométrica Abaeté e de dados de monitoramento da qualidade das águas (IGAM, 1997-2004).

6.2.1.1 Medições hidrológicas no ribeirão Marmelada

A estação fluviométrica localizada no ribeirão Marmelada, nas coordenadas geográficas 19°09'46''S e 45° 26'31''W, é denominada Abaeté com código 40530000 (site: ANA), possui uma série histórica de 36 anos e é operada pela CPRM.

a) Dados pluviométricos da estação Abaeté

Os gráficos das Figuras 6.21 e 6.22 apresentam respectivamente a precipitação anual e a precipitação média mensal na bacia do ribeirão Marmelada. A série histórica dos dados pluviométricos abrange o período de 1975 a 2005.

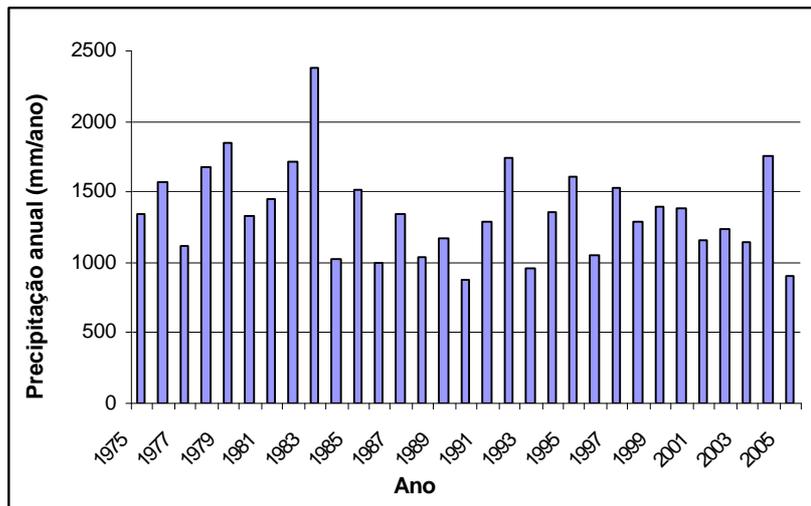


Figura 6.21 – Precipitação média anual no ribeirão Marmelada.

Na Figura 6.21, observa-se que a precipitação durante os anos monitorados não apresentou grandes variações, tendo um valor máximo no ano de 1983, quando foi 2377 mm, e um mínimo em 1990, com 881 mm. A precipitação média anual obtida nesta estação foi de 1361 mm.

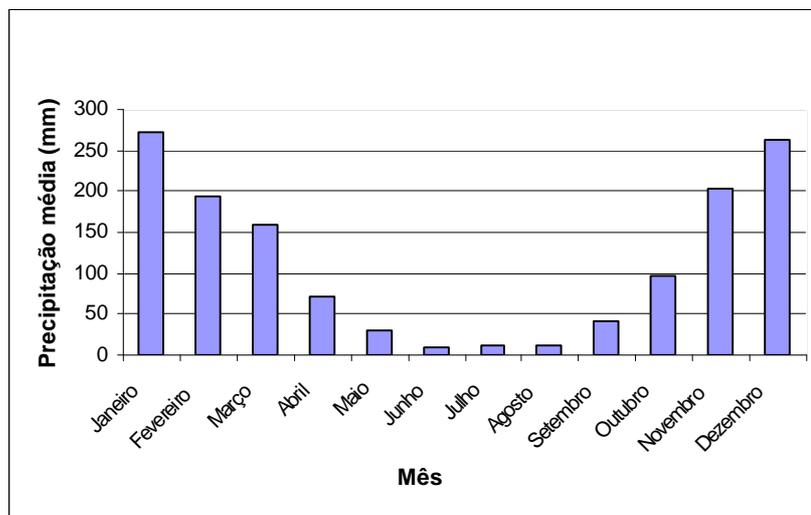


Figura 6.22 – Precipitação média mensal no período 1975-2005 no ribeirão Marmelada.

Na Figura 6.22 pode-se observar que a sazonalidade na região é bem definida, com o período de chuvas iniciando-se em outubro e cessando em março/abril.

A Tabela 6.14 apresenta a estatística básica das características do corpo d'água conforme dados da estação.

Tabela 6.14 – Características do ribeirão Marmelada – Estação Abaeté.

Medida	Cota (cm)	Vazão (m ³ /s)	Área molhada (m ²)	Largura (m)	Velocidade média (m/s)	Profundidade (m)
Mínimo	49,00	0,10	0,89	3,50	0,01	0,19
Média	237,44	6,74	24,18	13,53	0,32	1,37
Máximo	676,00	52,50	143,60	45,00	0,96	4,15
Desvio Padrão	131,45	9,25	28,75	7,85	0,17	0,95

Com as equações de velocidade, profundidade e largura em função da vazão (Chapra, 1997) e os dados da Estação Fluviométrica Abaeté, foram produzidos os gráficos para velocidade, profundidade e largura apresentados nas Figuras 6.23, 6.24 e 6.25. Os ajustes de uma curva $y = a \cdot Q^b$ para a largura e a profundidade apresentaram coeficientes de determinação (R^2) de 0,63 e 0,71, respectivamente, demonstrando assim uma razoável correlação destes parâmetros com a vazão. Contudo, o ajuste segundo o mesmo modelo para a velocidade resultou uma correlação muito ruim, com $R^2 = 0,04$. As equações obtidas foram utilizadas nas simulações, a fim de se obter os parâmetros em função da vazão.

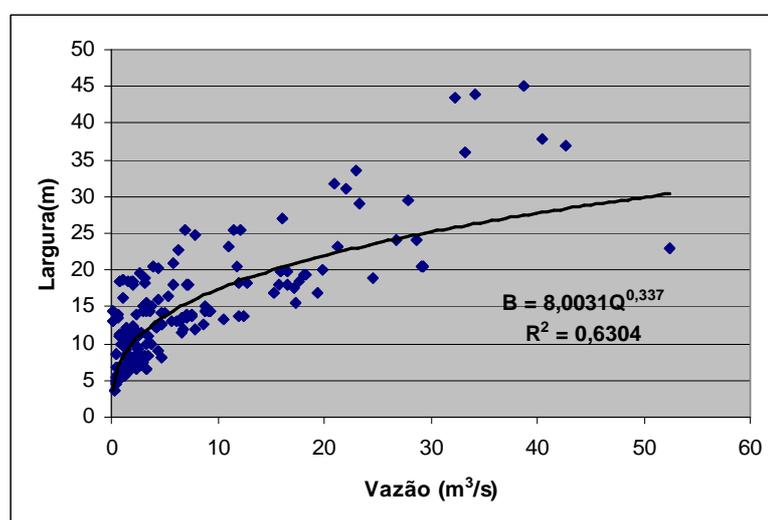


Figura 6.23 – Vazão x Largura – Estação fluviométrica Abaeté.

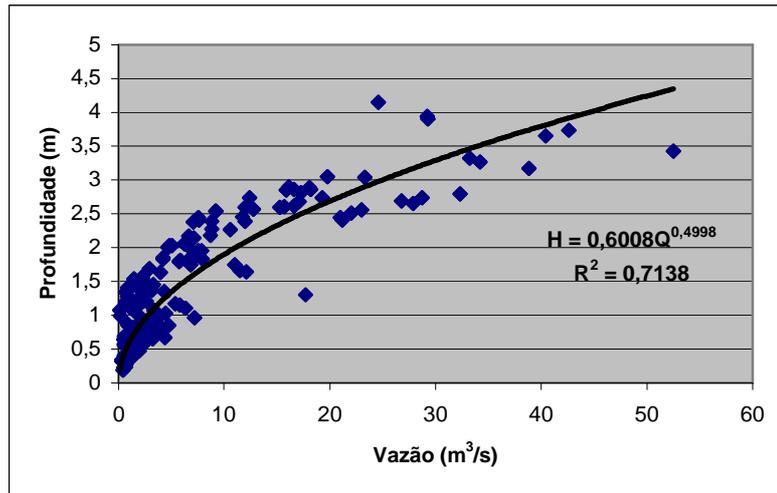


Figura 6.24 – Vazão x Profundidade – Estação fluviométrica Abaeté.

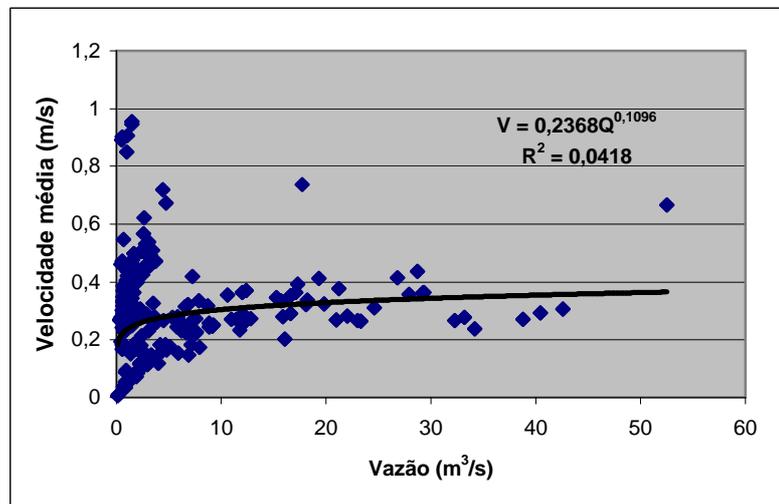


Figura 6.25 – Vazão x Velocidade – Estação fluviométrica Abaeté.

b) Dados de vazão da estação Abaeté

Para a simulação, calcularam-se as vazões $Q_{7,10}$, Q_{90} e Q_{95} da estação:

- (i) com a curva de permanência de vazões da estação (Figuras 6.26 e 6.27), que relaciona a vazão e a probabilidade de ocorrerem vazões maiores ou iguais ao valor da ordenada (Tucci, 2004), calcularam-se $Q_{90} = 0,81 \text{ m}^3/\text{s}$ e $Q_{95} = 0,55 \text{ m}^3/\text{s}$;

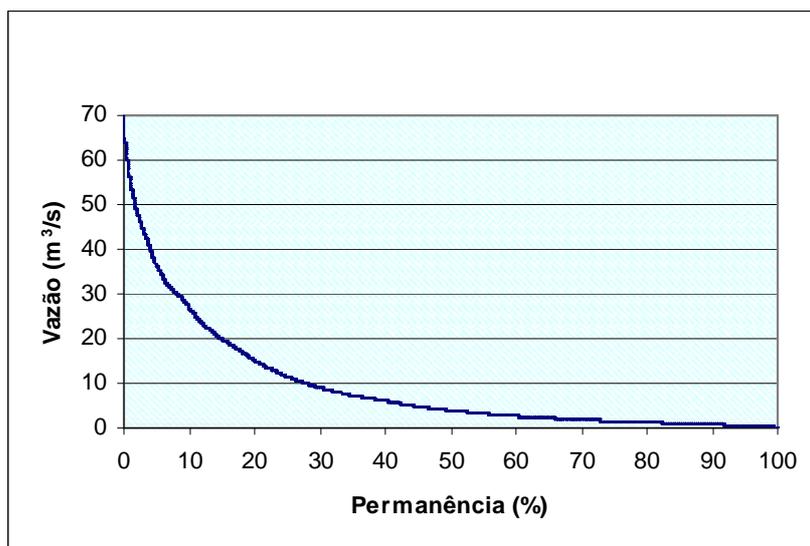


Figura 6.26 – Curva de permanência de vazões – Estação fluviométrica Abaeté.

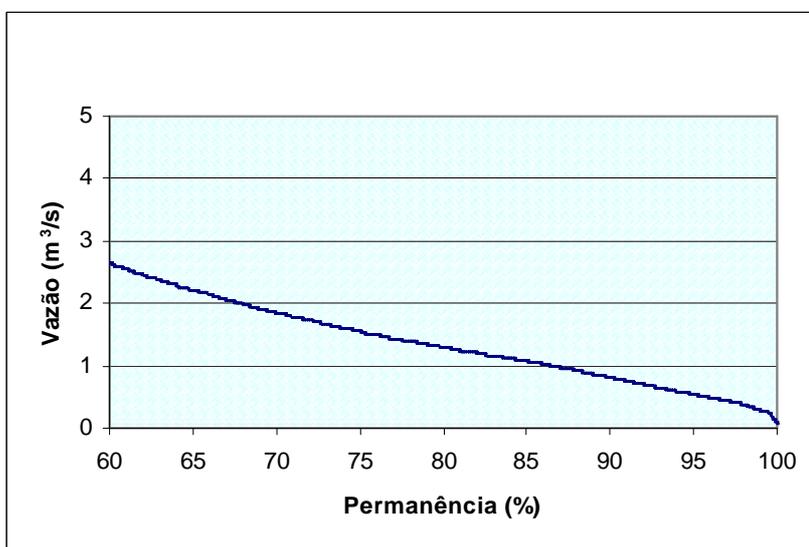


Figura 6.27 – Curva de permanência de vazões – Estação fluviométrica Abaeté – Detalhe: vazões mais baixas.

(ii) de acordo com a recomendação de Tucci (2004), a vazão $Q_{7,10} = 0,185 \text{ m}^3/\text{s}$ foi calculada com o método de Weibull para ajustar uma distribuição de probabilidade de vazões mínimas (Figura 6.28).

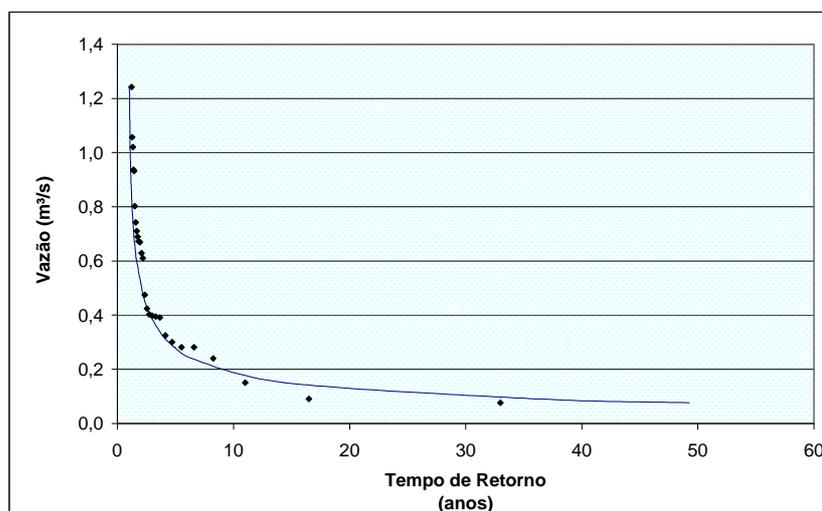


Figura 6.28 – Ajuste de Weibull para Q 7 mínimas – Estação fluviométrica Abaeté.

Os valores calculados para as vazões de referência dizem respeito ao ponto da estação de Abaeté, com área de drenagem de 466 km². Considerando a bacia como uma região homogênea, as vazões calculadas podem ser estendidas a todos os pontos da bacia em estudo. A Tabela 6.15 apresenta as vazões específicas.

Tabela 6.15 – Vazão específica para bacia do ribeirão Abaeté.

Vazão Específica	q _{7,10}	q ₉₅	q ₉₀
q (l/s.km)	0,39	1,18	1,74

Para efeitos da simulação, a fim de considerar o incremento de vazão em cada trecho do rio, ou seja, o incremento por unidade de área, assumiu-se um aumento linear da área com a distância de percurso. Para tal, dividiu-se a área total da bacia, A = 874 km², pelo comprimento do exutório à foz, L = 96 km e obteve-se uma relação A/L = 9,1 km²/km. Desta forma, considerou-se que a cada 1 km percorrido no rio, tem-se um aumento de 9,1 km² na área.

6.2.1.2 Monitoramento de qualidade das águas no ribeirão Marmelada

A estação de monitoramento da qualidade das águas no ribeirão Marmelada está localizada a jusante do município de Abaeté, nas coordenadas geográficas 19° 09'24''S e 45° 25'41''W, e é denominada SF007. São realizadas quatro campanhas anuais, a primeira no período

chuvoso, a segunda no período de seca e duas intermediárias. A série histórica das medições é de 8 anos.

O Índice de Qualidade das Águas - IQA é um índice que representa a variação ponderada de 9 parâmetros (oxigênio dissolvido, coliformes fecais, pH, demanda bioquímica de oxigênio, nitratos, fosfatos, temperatura, turbidez e resíduos totais) que refletem, principalmente, a contaminação das águas por lançamentos de esgotos domésticos. O valor do IQA varia de 0 a 100 e em função dos intervalos é classificado de “excelente” a “muito ruim” (IGAM, 2004).

O IQA para o ribeirão Marmelada, para os anos 1997-2004, é apresentado na Figura 6.29. A média anual vem diminuindo desde o ano 2000 (IQA₂₀₀₀ = 49,4, IQA₂₀₀₁ = 46,7, IQA₂₀₀₂ = 44,6, IQA₂₀₀₃ = 43,5, IQA₂₀₀₄ = 40,0) havendo a ocorrência de “muito ruim” na última campanha de 2004 (IGAM, 2004).

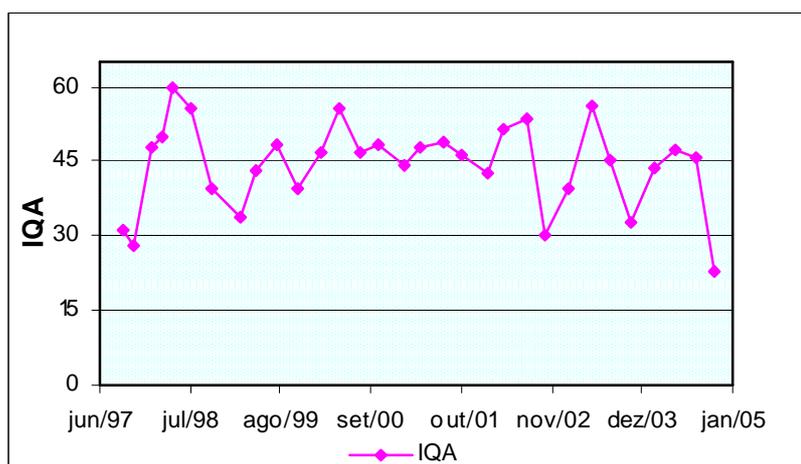


Figura 6.29 – Série de IQA no ribeirão Marmelada (Estação SF007 – Projeto Águas de Minas).

As águas do ribeirão Marmelada apresentaram, principalmente na quarta campanha de 2004, baixo nível de oxigenação (Figura 6.31), um dos menores do Estado de Minas Gerais (IGAM, 1997-2004), e elevada concentração de DBO (Figura 6.30), que podem ser atribuídos à presença de matadouros e frigoríficos no município de Abaeté e aos lançamentos de esgotos domésticos *in natura*.

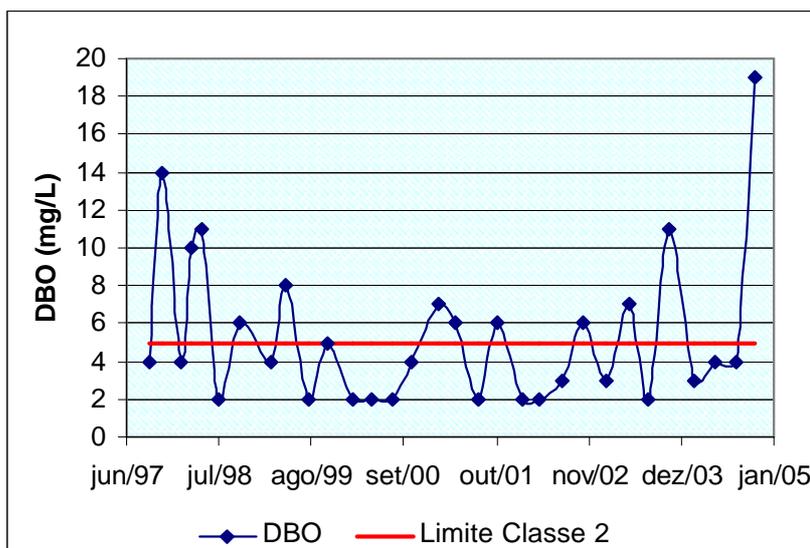


Figura 6.30 – Série temporal de DBO no ribeirão Marmelada (Estação SF007 – Projeto Águas de Minas).

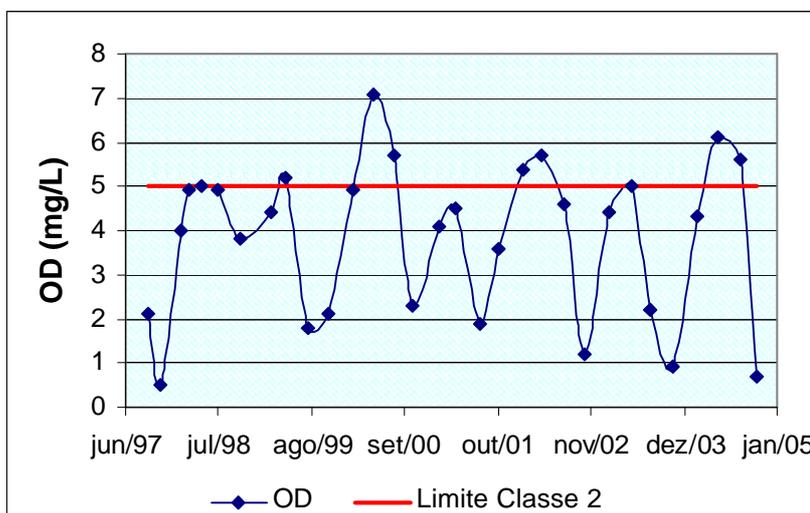


Figura 6.31 – Série temporal de OD no ribeirão Marmelada (Estação SF007 – Projeto Águas de Minas).

Analisando-se os resultados de coliformes termotolerantes (Figura 6.32), pode-se verificar que, por causa do lançamento *in natura* de grande parte do esgoto sanitário do município de Abaeté (IGAM, 2004), somente em quatro campanhas o parâmetro não esteve em desacordo com o limite estabelecido pela legislação.

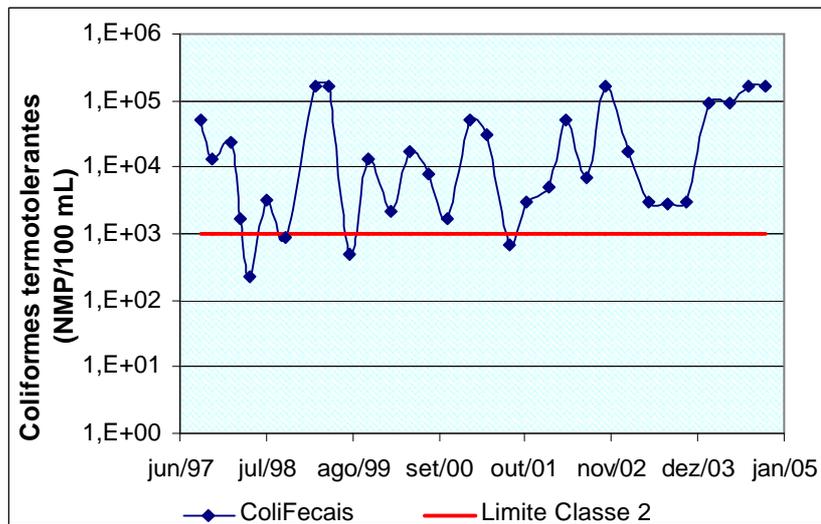


Figura 6.32 – Série temporal de coliformes Termotolerantes (Estação SF007 – Projeto Águas de Minas).

As águas do ribeirão Marmelada apresentam, ao longo da série histórica de dados, a pior condição de IQA dentre os afluentes monitorados no trecho sul da bacia do rio São Francisco (IGAM, 2004).

6.2.1.3 Coeficientes do modelo de Streeter-Phelps

a) Coeficiente de desoxigenação, K_1

O valor de K_1 utilizado foi de $0,22 \text{ d}^{-1}$, valor típico adotado na literatura para efluentes de tratamentos secundários (von Sperling, 2005).

b) Coeficiente de remoção de DBO efetiva no rio, K_d

O valor de K_d foi calculado segundo as proposições da EPA (1985) e de Thomann e Mueller (1987) em função da profundidade H, conforme a Equação 6.2.

$$K_d = 0,3 \cdot (H/2,5)^{-0,434} \quad (\text{para } H \leq 2,5 \text{ m}) \quad (6.2)$$

A profundidade H provém do modelo ajustado aos valores de profundidade x vazão, apresentados na Figura 6.20.

6.2.1.4 DBO no rio - Qualidade atual do corpo d'água

Nos cenários em que é considerado o rio com lançamentos anteriores, empregaram-se os dados do projeto Águas de Minas (IGAM, 1997-2004) como um indicativo da qualidade atual das águas do ribeirão Marmelada. Foi calculada a média das séries históricas dos resultados de medição da DBO no período 1997-2004 (Tabela 6.16).

Tabela 6.16 – DBO média para a bacia do ribeirão Abaeté.

Parâmetro	Valor médio (1997-2004)
DBO (mg/L)	5,4

6.2.1.5 Dados dos lançamentos

Ao ser realizado o cadastro de lançamentos na bacia do ribeirão Marmelada, foi observado que os lançamentos pontuais (Capítulo 4) encontram-se concentrados no município de Abaeté. Para facilitar as análises dos cenários, os pontos de lançamento foram identificados na Tabela 6.17, que apresenta um resumo dos dados dos lançamentos.

Tabela 6.17 – Resumo dos dados de DBO dos efluentes considerados na simulação.

Ponto de Lançamento		Q efluente (L/s)	DBO (mg/L)	
número	usuário		Afluente	Efluente
1	Empreendimento 2	5,6	4716	236
2	Empreendimento 1	0,058	1257	125
3	Empreendimento 4 (ETE São Simão)	29,21	326	17
4	Lançamentos de esgotos <i>in natura</i> do município de Abaeté	9,3	-	390

Dada a proximidade dos quatro locais de lançamento, o valor das vazões de referência foi calculado considerando-se que todos os lançamentos foram efetuados no ponto médio entre os mesmos, isto é, a 42,5 km a partir da nascente. A área de drenagem para este ponto, obtida, por meio da relação apresentada anteriormente ($9,1 \text{ km}^2/\text{km}$), foi de $386,7 \text{ km}^2$. Dadas as vazões específicas apresentadas, obtém-se $Q_{7,10} = 139 \text{ L/s}$, $Q_{95} = 456 \text{ L/s}$ e $Q_{90} = 673 \text{ L/s}$.

Com os dados das vazões de referência podem-se obter as razões de diluição requeridas (Tabela 6.18).

Tabela 6.18 – Razão de diluição requerida.

Vazão de referência	Razão de diluição requerida ($R = Q_r/Q_e$)			
	1	2	3	4
Pontos de lançamentos				
$Q_{7,10}$	25	2396	4,7	15
Q_{95}	81	7862	16	49
Q_{90}	120	11603	23	72

6.2.2 Análise das simulações na bacia do ribeirão Marmelada

6.2.2.1 Simulação com a Equação da Mistura

Nos cenários 1 a 6 foi utilizada a equação da mistura, fazendo-se K_1 igual a zero, ou seja, não foi considerada a capacidade de autodepuração do corpo d'água.

A Tabela 6.19 apresenta os resultados obtidos para as vazões de diluição, além dos valores inicial e final do perfil de DBO considerado após o primeiro lançamento, e as condições iniciais de cada cenário. As Figuras 6.33 e 6.34 apresentam os perfis de DBO no trecho do rio, para cada um dos cenários. Nesses e nos demais gráficos de perfil de DBO, os pontos de lançamento são representados, nas abscissas, por triângulos cheios.

Tabela 6.19 – Vazão de diluição e DBO para os cenários 1 a 6 (Equação da Mistura).

Cenários	Vazão de referência	Qualidade do corpo d'água	DBO (mg/L)		Vazão de diluição requerida (m ³ /s)							
			inicial	final	Cenários sem lançamentos anteriores				Cenários com lançamentos anteriores			
					Ponto 1	Ponto 2	Ponto 3	Ponto 4	Ponto 1	Ponto 2	Ponto 3	Ponto 4
1	Q _{7,10}	Natural	1,0	27	1,68	0,002	0,016	0,88	1,68	-0,0002	-0,002	-0,11
2		Atual	5,4	27	-16,85	-0,018	-0,16	-8,87	1,73	-0,0002	-0,002	-0,11
3	Q ₉₀	Natural	1,0	7,4	1,68	0,002	0,016	0,88	1,68	-0,001	-0,011	-0,64
4		Atual	5,4	7,4	-16,85	-0,018	-0,16	-8,87	1,73	-0,001	-0,011	-0,64
5	Q ₉₅	Natural	1,0	10	1,68	0,002	0,016	0,88	1,68	-0,001	-0,006	-0,37
6		Atual	5,4	10	-16,85	-0,018	-0,16	-8,87	1,73	-0,001	-0,006	-0,37

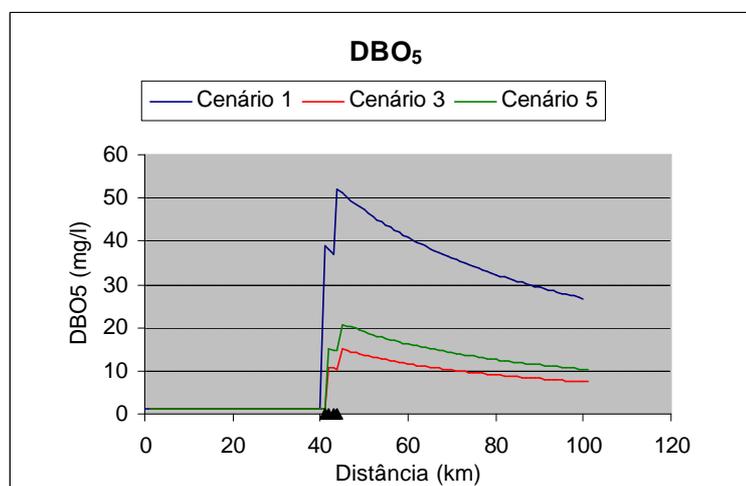


Figura 6.33 – Perfil de DBO – Cenários 1, 3 e 5.

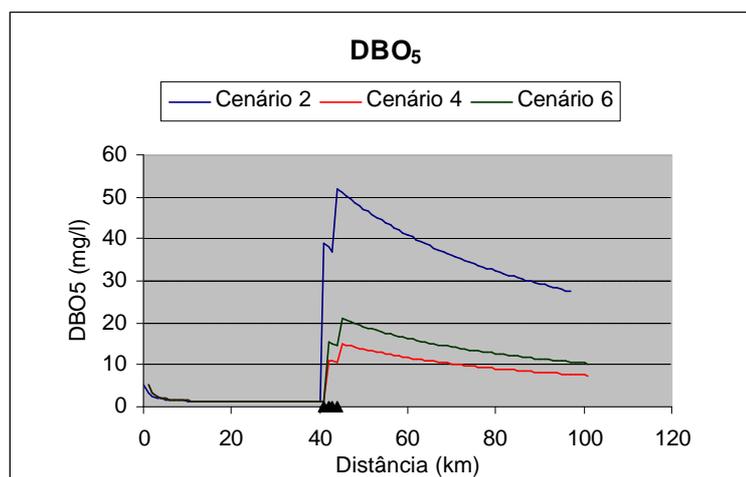


Figura 6.34 – Perfil de DBO – Cenários 2, 4 e 6.

Na Tabela 6.19 é possível observar que os valores finais do perfil de DBO apresentam grande variação com a vazão de referência, de 27 mg/L para $Q_{7,10}$ a 7,4 mg/L para Q_{90} . A partir do segundo lançamento, essa variação tem influência direta nos valores da vazão de diluição. Quando se levam em conta os lançamentos anteriores, a vazão de diluição para os mesmos pontos decresce da $Q_{7,10}$, para Q_{95} e desta para Q_{90} . Nos cenários sem lançamentos anteriores, para condição natural do corpo d'água, os valores da vazão de diluição são positivos. Porém, comparando-os com as vazões de referência, apenas os pontos 2 e 3 são passíveis de outorga. Os valores para o ponto 1 são os mesmos em condições naturais, independentemente dos lançamentos anteriores, pois o valor de DBO no perfil após o lançamento é igual a 1,0 mg/L. Entretanto, nas condições atuais, o valor de DBO anterior ao lançamento 1 é menor (1,1 mg/L) que a DBO atual (5,4 mg/L) do ribeirão Marmelada. Tanto para a condição atual do ribeirão, sem considerar os lançamentos anteriores, quanto para os pontos 2, 3 e 4, quando os lançamentos anteriores são levados em conta, independentemente da condição do corpo d'água, os valores de vazão de diluição obtidos são negativos. Ou seja, o ribeirão já chega neste ponto com DBO acima de 5 mg/L, fora dos padrões, e nenhum lançamento pode ser outorgado. O resultado confirma o diagnóstico apresentado pelo monitoramento da qualidade das águas (IGAM, 1997-2004) que esta é uma bacia crítica em termos de contaminação por matéria orgânica.

6.2.2.2 Simulação com o modelo de Streeter-Phelps

Nos cenários 7 a 12 foi utilizado o modelo de Streeter-Phelps. A Tabela 6.20 apresenta os resultados obtidos para cada um dos cenários, e as Figuras 6.35 e 6.36, os perfis de DBO.

Tabela 6.20 – Vazão de diluição e DBO para os cenários 7 a 12 (Streeter-Phelps).

Cenários	Vazão de referência	Qualidade do corpo d'água	DBO (mg/L)		Vazão de diluição requerida (m ³ /s)							
			inicial	final	Cenários sem lançamentos anteriores				Cenários com lançamentos anteriores			
					Ponto 1	Ponto 2	Ponto 3	Ponto 4	Ponto 1	Ponto 2	Ponto 3	Ponto 4
7	Q _{7,10}	Natural	1,0	3,0	1,68	0,002	0,016	0,88	1,46	-0,0002	-0,002	-0,13
8		Atual	5,4	3,0	-16,85	-0,018	-0,16	-8,87	1,46	-0,0002	-0,002	-0,13
9	Q ₉₀	Natural	1,0	1,7	1,68	0,002	0,016	0,88	1,5	-0,001	-0,01	-0,84
10		Atual	5,4	1,7	-16,85	-0,018	-0,16	-8,87	1,5	-0,001	-0,01	-0,84
11	Q ₉₅	Natural	1,0	2,0	1,68	0,002	0,016	0,88	1,49	-0,001	-0,007	-0,45
12		Atual	5,4	2,0	-16,85	-0,018	-0,16	-8,87	1,49	-0,001	-0,007	-0,45

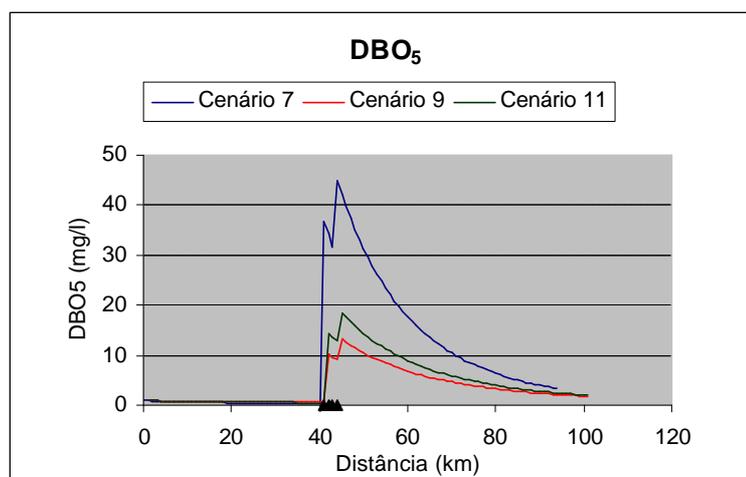


Figura 6.35 – Perfil de DBO – Cenários 7, 9 e 11.

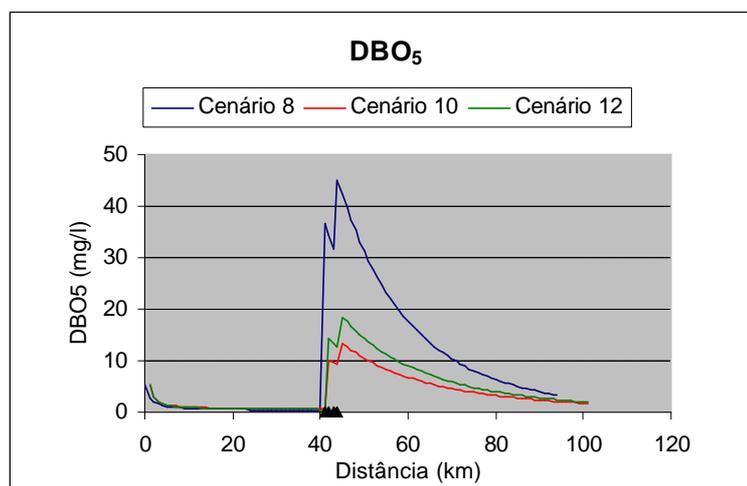


Figura 6.36 – Perfil de DBO – Cenários 8, 10 e 12.

A observação conjunta dos perfis (Figuras 6.35 a 6.36) e dos valores finais de DBO (Tabela 6.20) permite concluir que esses valores são notavelmente menores que aqueles produzidos pela Equação da Mistura. Este fato tem influência direta nos valores das vazões de diluição dos cenários com lançamentos anteriores. Nos pontos 1 e 4 os valores da vazão de diluição são inferiores àqueles obtidos ao se utilizar a Equação da Mistura. Já nos pontos 2 e 3, a vazão de diluição é a mesma daquela calculada com a Equação da Mistura, pois, pela proximidade do ponto 1, o processo de autodepuração não é suficiente para que se tenham mudanças significativas no valor de DBO do perfil. Nos cenários sem lançamentos anteriores os valores da vazão de diluição permanecem constantes.

7. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

Os resultados deste trabalho sugerem as seguintes conclusões e recomendações para a definição de critérios para outorga de lançamentos de efluentes:

a) nas simulações realizadas com lançamentos anteriores para os cálculos das vazões de diluição, pôde-se observar que a Equação da Mistura para DBO resulta em valores requeridos para a vazão de diluição maiores que aqueles obtidos com o modelo de Streeter-Phelps, o que pode inviabilizar a outorga de lançamento para outros usuários. O modelo de Streeter-Phelps (decaimento da DBO), embora mais complexo que a equação da mistura, aproxima-se mais da real condição do corpo d'água, uma vez que reflete sua capacidade de autodepuração. Assim, é recomendada a utilização desse modelo no critério adotado para outorga de lançamentos;

b) devem ser sempre levados em conta os lançamentos anteriores para cálculo da vazão de diluição, a fim de revelar-se a real situação da bacia e fazerem-se respeitar os padrões e o enquadramento do corpo d'água em questão. Embora a localização do lançamento influa nos casos em que os lançamentos anteriores são importantes, sua interferência pode ser minimizada se forem analisados em conjunto os diversos lançamentos em uma bacia. Dessa forma, a eficiência dos tratamentos estabelecidos para cada um dos lançamentos deve ser tal que a concentração dos parâmetros de poluição de um usuário localizado a montante não inviabilize os demais usuários;

c) os resultados obtidos permitem concluir que a vazão de referência influencia os valores da vazão de diluição requerida, quando se utilizam lançamentos anteriores para o cálculo da mesma. Isto é devido à influência da vazão de referência no valor da DBO no perfil, utilizado para o cálculo da vazão de diluição. As vazões de diluição calculadas são sucessivamente maiores quanto menor for o valor da vazão de referência;

d) a definição da vazão de referência a ser utilizada, assim como o seu percentual máximo reservado no rio para fins de diluição de efluentes, passa por um estudo detalhado das condições climáticas e geomorfológicas de cada região, de interesse para a descrição do

comportamento hidrológico do corpo d'água. Por analogia, esta mesma recomendação se aplica para os parâmetros de qualidade de um corpo d'água específico;

e) para mensurar a verdadeira vazão de diluição que deverá ser alocada para um determinado lançamento, dever-se-ia levar em consideração a condição atual do corpo d'água. Os resultados deste trabalho demonstram que a influência de se empregar a DBO atual do rio é maior quando se desconhecem os demais lançamentos na bacia. Dado que muitos corpos d'água não têm a sua qualidade monitorada, recomenda-se que se adote, de forma geral, o valor de 1 mg/L para a DBO dos rios. Caso o órgão regulador opere uma rede de monitoramento que abranja todas as bacias, recomenda-se adotar a condição atual do corpo d'água;

f) não há garantia de que o enquadramento do corpo d'água seja respeitado na eventualidade de cada lançamento atender ao padrão de lançamento de 60 mg/L, prescrito pela legislação ambiental. Em todos os casos, é necessário que se tenha uma visão global da bacia nos processos de outorga, uma vez que deve ser preservado o enquadramento do corpo d'água onde será disposto o efluente. A exigência da legislação ambiental de que cada lançamento atenda individualmente ao padrão de corpo receptor na mistura resulta na preservação do enquadramento em toda a bacia. Em vista dos custos geralmente envolvidos na redução de altos valores de DBO para níveis que atendam à legislação, é razoável seguirem-se as recomendações da Resolução CONAMA 375/2005, que prevê a definição de metas intermediárias e final para atendimento do enquadramento. O escalonamento em metas do tratamento exigido possibilita ao órgão gestor embutir nos critérios de outorga, mecanismos de atendimento de metas intermediárias e final, em consonância com o enquadramento e com o plano de recursos hídricos da bacia;

g) as vazões dos lançamentos utilizadas nos cenários hipotéticos, 200, 100 e 50 L/s, referem-se a lançamentos de cidades com população de 100.000, 50.000 e 25.000 respectivamente. Desta forma, considerando a realidade de Minas Gerais, em que 10 cidades possuem população superior 200 mil habitantes e 13 municípios, entre 100 e 200 mil habitantes, e 687 municípios possuem população inferior a 20 mil habitantes (Atlas IDH, 2001), pode-se concluir que as vazões utilizadas nas simulações hipotéticas representam as situações

extremas no Estado, uma vez que, a maior parte dos municípios possui populações menores que aquelas simuladas. Desta forma, os resultados obtidos devem ser interpretados dentro desta perspectiva, e as conclusões acerca das dificuldades de outorga, ainda que possam ocorrer em um grande número de bacias, devem estar circunscritas a este cenário hipotético;

h) a implementação da gestão de recursos hídricos no Brasil é bastante recente, e desta forma alguns de seus instrumentos não se encontram implantados nos diversos estados. Este estudo buscou, de forma simples, iniciar uma discussão sobre a outorga de lançamento de efluentes, para tanto, somente foi analisado o parâmetro DBO. Porém a implementação da gestão e seu aprimoramento devem ocorrer de forma contínua. Desta forma, recomenda-se que estudos seguintes sejam realizados com o objetivo de aprimorar os critérios, testando, para tanto, outros parâmetros importantes para o controle da poluição hídrica, tais como oxigênio dissolvido.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS. *Dados de estações fluviométricas em Sistemas de Informações Hidrológica - Hidroweb*. Disponível em: <www.ana.gov.br>. Acesso em 16 abril de 2005.

ARCEIVALA, S.J.. *Wastewater treatment and disposal. Engineering and ecology in pollution control*. New York, Marcel Dekker,1981. 892 p.

ASSEMBLÉIA LEGISLATIVA DO ESTADO DE MINAS GERAIS. *Dados sobre os municípios mineiros*. Disponível em: <www.almg.gov.br>. Acesso em 20 abril de 2005.

BRASIL. Lei nº 9.433, de 8 de janeiro de 1997. Institui a Política Nacional de Recursos Hídricos, cria o Sistema Nacional de Gerenciamento de Recursos Hídricos, regulamenta o inciso XIX do art. 21 da Constituição Federal e altera o art. 1º da Lei nº 8.001, de 13 de março de 1990, que modificou a Lei nº 7.990, de 28 de dezembro de 1989. Coletânea de legislação de direito ambiental. Odete Medauar (Organizadora). 5. ed. São Paulo, 2006. 1183 p.

BRASIL. Ministério das Cidades. Secretaria Nacional de Saneamento Ambiental. *Sistema Nacional sobre informações sobre saneamento: Diagnóstico dos serviços de água e esgoto – 2004*. Brasília, 2005. 434p.

BRASIL. Ministério do Meio Ambiente. Agência Nacional de Águas. *Outorga de direito de usos de recursos hídricos: Diretrizes e prioridades*. Brasília, 2005. 153 p.

CHAPRA, S.C. *Surface water quality modeling*. WCB/McGraw-Hill, 1997. 844p.

COMISSÃO EUROPÉIA. *A diretiva-quadro da água: Algumas informações*. Serviços das Publicações Oficiais das Comunidades Europeias, Luxemburgo, 2002.12p.

COMPANHIA DE TECNOLOGIA DE SANEAMENTO AMBIENTAL. *Ecologia aplicada e proteção do meio ambiente*. (curso por correspondência). São Paulo, 1976. 449 p.

CONSELHO DE POLÍTICA AMBIENTAL. Altera a alínea “h” do artigo 15 da Deliberação Normativa COPAM no 10 de 16 de dezembro de 1986. Deliberação Normativa nº 32 de 18 de dezembro de 1998. Coletânea de Legislação Ambiental do Estado de Minas Gerais. Augusto Henrique Lio Horta (Organizador). Belo Horizonte, 2005.

CONSELHO DE POLÍTICA AMBIENTAL. Estabelece alteração no limite de eficiência de remoção em termos de Demanda Bioquímica de Oxigênio para os sistemas de tratamento de esgotos domésticos e de percolado de aterros sanitários municipais e dá outras providências. Deliberação Normativa nº 46 de 09 de agosto de 2001. Coletânea de Legislação Ambiental do Estado de Minas Gerais. Augusto Henrique Lio Horta (Organizador). Belo Horizonte, 2005.

CONSELHO DE POLÍTICA AMBIENTAL. Estabelece normas e padrões para qualidade das águas, lançamento de efluentes nas coleções de água e dá outras providências. Deliberação Normativa nº 10 de 16 de dezembro de 1986. Coletânea de Legislação Ambiental do Estado de Minas Gerais. Augusto Henrique Lio Horta (Organizador). Belo Horizonte, 2005.

CONSELHO DE POLÍTICA AMBIENTAL. Estabelece o limite de DQO para lançamentos de efluentes líquidos, gerados pelas indústrias têxteis, direta ou indiretamente nos corpos de água e dá outras providências. Deliberação Normativa nº 47 de 09 de agosto de 2001. Coletânea de Legislação Ambiental do Estado de Minas Gerais. Augusto Henrique Lio Horta (Organizador). Belo Horizonte, 2005.

CONSELHO ESTADUAL DE PROTEÇÃO AMBIENTAL. Aprova a Nota Técnica NT-002/2000, que estabelece os padrões de lançamentos para efluentes sanitários nos corpos hídricos na Região Metropolitana de Salvador e demais e demais municípios do Estado da Bahia, gerados a partir da implantação de empreendimentos imobiliários habitacionais. Resolução nº 2288 de 28 de abril de 2000. Diário Oficial do Estado da Bahia em 03 de maio de 2000.

CONSELHO ESTADUAL DE RECURSOS HÍDRICOS. Estabelece as unidades de gestão e planejamento de recursos hídricos do Estado de Minas Gerais. Deliberação Normativa nº 04 de 04 de outubro de 2002. Legislação de Recursos Hídricos. Marley Caetano de Mendonça (Organizador). Belo Horizonte, 2002. 420p.

CONSELHO NACIONAL DE MEIO AMBIENTE. Estabelece a classificação de águas doces, salobras e salinas. Resolução CONAMA nº 357, de 17 de março de 2005. Coletânea de legislação de direito ambiental. Odete Medauar (Organizadora). 5. ed. São Paulo, 2006. 1183 p.

CONSELHO NACIONAL DE RECURSOS HÍDRICOS. Estabelece critérios gerais para a outorga de direito de uso de recursos hídricos. Resolução do CNRH nº 16, de 08 de maio de 2001. Recursos hídricos: conjunto de normas legais. 3. ed. Brasília, 2004. 243p.

CONSELHO NACIONAL DE RECURSOS HÍDRICOS. Estabelece diretrizes para análise e emissão de outorga de direito de uso de recursos hídricos para fins de lançamento de efluentes. Resolução do ANA nº 219, de 06 de junho de 2005. BRASIL. Resolução do CNRH nº 12, de 19 de julho de 2000. Estabelece procedimentos para o enquadramento de corpos de água em classes segundo os usos preponderantes. Recursos hídricos: conjunto de normas legais. 3. ed. Brasília, 2004. 243p.

DERISIO, J. C. *Introdução ao Controle de Poluição Ambiental*. São Paulo: Signus, 2000. 160p.

EUCLYDES, Humberto Paulo (Coord.). *Atlas Digital das Águas de Minas*. Belo Horizonte: RURALMINAS; Viçosa: UFV, 2005.

FAIR, G.M., GEYER, J.C., OKUN, D.A. *Purificación de aguas y tratamiento y remoción de aguas residuales [Water and wastewater engineering]*. Trad. Salvador Ayanegui j. México, Editorial Limusa, v.2. air et al, 1973. 764 p.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. *Pesquisa Nacional de Saneamento Básico*. Brasília, 2000. Disponível em: <www.ibge.gov.br>. Acesso em 29 de abril de 2005.

INSTITUTO MINEIRO DE GESTÃO DAS ÁGUAS. *Monitoramento das Águas Superficiais no Estado de Minas Gerais: Projeto Águas de Minas*. Belo Horizonte. 1997-2004.

KELMAN, J. Gerenciamento de Recursos Hídricos. Parte I: Outorga. In: *XII Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos*, **12**. Vitória, ES, 1997.

MACHADO, E. S., PORTO, M. F. A., RAMON, N., FILL, A. V. Um avanço na gestão de qualidade da água: A outorga para lançamento de efluentes. In: *Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos*, **15**. Curitiba, PR, 2003.

MINAS GERAIS. Decreto nº 41.578 de 08 de março de 2001. Regulamenta a Lei nº 13.199, de 29 de janeiro de 1999, que dispõe sobre a Política Estadual de Recursos Hídricos. Legislação de Recursos Hídricos. Marley Caetano de Mendonça (Organizador). Belo Horizonte, 2002. 420p.

MINAS GERAIS. Instituto Mineiro de Gestão das águas. Regulamenta os procedimentos de outorga do IGAM. Portaria nº 10 de 30 de dezembro de 1998. Legislação de Recursos Hídricos. Marley Caetano de Mendonça (Organizador).. Belo Horizonte, 2002. 420p.

MINAS GERAIS. Lei nº 13.199 de 29 de janeiro de 1999. Dispõe sobre a Política Estadual de Recursos Hídricos e dá outras providências. Legislação de Recursos Hídricos. Marley Caetano de Mendonça (Organizador).. Belo Horizonte, 2002. 420p.

NAGHETTINI, M.. *Notas de aula de hidrologia aplicada*. Escola de Engenharia da UFMG, Papelaria Oficial, Belo Horizonte, 1997.

NASCIMENTO, L.V., VON SPERLING, M.. Padrões nacionais e internacionais de lançamentos de efluentes líquidos em corpos d'água. In: *Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos*, **13**. Belo Horizonte, MG, 1999.

NATIONAL RIVERS AUTHORITY *Discharge consents and compliance. The NRA's approach to control of discharges to water*. Water quality Series Nº. 17. Londres, 1994.76P.

PARLAMENTO E CONSELHOS EUROPEU. Diretiva Quadro Água. Diretiva 2000/60/CE,. 2000.

PEREIRA, T.V. e MENDONÇA, A.S.F. Outorga de lançamento de efluentes: Cenário Atual no Brasil e no Exterior. In: *Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos*, **16**. João Pessoa, PB, 2005.

- PEREIRA, T.V. e MENDONÇA, A.S.F.. Outorga de lançamento de efluentes: Comparação de alternativas. In: *Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos*, **16**. João Pessoa, PB, 2005.
- RIBEIRO, M.M.; LANNA, A.E. A outorga Integrada das Vazões de Captação e Diluição. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*. vol. 8, n. 3, jul/set 2003. p. 151-168.
- RIO GRANDE DO SUL. Lei 10.350 de 30 de dezembro de 2004. Institui o Sistema Estadual de Recursos Hídricos, regulamentando o artigo 171 da Constituição do Estado do Rio Grande do Sul. Diário oficial do Estado do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 01 de janeiro de 2005.
- RODRIGUES R. B. *Metodologia de apoio à concessão de outorgas para lançamento de efluente e cobrança pelo uso da água – Modelo RMI*. 2000 140p.. *Dissertação (Mestrado em Hidrologia)* - Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2000.
- SILVA, L. M C.; MONTEIRO, R. A. Outorga de Direito de Uso de Recursos Hídricos: uma das possíveis abordagens. In.: MACHADO, C. J. S. (Organizador). *Gestão de Águas Doces*. Rio de Janeiro: Interciência, 2004. cap. 5, p. 135-178.
- STREETER, H.W. & PHELPS, E.B. *A study of the pollution and natural purification of the Ohio River*. *Public Health Bulletin*. Washington, 1925. 146p.
- SYME, G.J. NANCARROW B. E., MCCREDDIN J. A. Defining the components of fairness in the allocation of water to environmental and human uses. *Journal of Environmental Management*, v. 57 p. 51-70. 1999.
- THOMANN R. V. & MUELLER J.A. *Principles of Surface Water Quality Modeling and Control*. Harper & Row. New York. 1987. 644p.
- TUCCI, C. E. M. *Hidrologia: Ciência e Aplicação*. 3^a ed., primeira reimpressão. – Porto Alegre: Editora da UFRGS/ABRH. 2004. 943p.
- TUCCI, C. E. M. Regionalização de vazões. Porto Alegre, ANEEL/UFRGS/IPH. 2000.
- UNITED STATES ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY. *Rates, constants, and kinetics formulations in surface water quality modeling*. 2. ed. Athens,1985. 455p.
- UNITED STATES ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY. *The enhanced stream water quality models QUAL2E and QUAL2E-UNCAS*. Documentation and user model. Athens, 1987. 189p.
- VON SPERLING M.. *Apostila do curso Modelagem matemática da qualidade das águas*. FEAM, Belo Horizonte, 2004.
- VON SPERLING M.. *Princípios do tratamento biológico de águas residuárias. Vol.1. Introdução à qualidade das águas e ao tratamento de esgotos.- 3^a ed.-* Belo Horizonte: Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental da UFMG; Universidade Federal de Minas Gerais.2005. 452p.

WORD HEALTH ORGANIZATION. *Water Quality Monitoring. A Practical Guide to the Design and Implementation of Freshwater Quality Studies and Monitoring Programmes*. Capítulo 1 Geneva, 1996.

YASSUDA, E.A., DAVIE S. R, MENDELSON D. L., ISAJI T. PENNEE S.J.. Development of a Water Load Allocation Model for the Charleston Harbor Estuary, Phase II: Water quality. *Estuarine, coastal and Shelf Science*. 2000. v. 50. p. 99-107.