

**AÉCIO ALVES PEREIRA**

**AVALIAÇÃO DA QUALIDADE DA ÁGUA: PROPOSTA DE NOVO ÍNDICE  
ALICERÇADO NA LÓGICA FUZZY**

Brasília  
2010

**UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA – UnB  
FACULDADE DE CIÊNCIAS DA SAÚDE  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIAS DA SAÚDE**

**AÉCIO ALVES PEREIRA**

**AVALIAÇÃO DA QUALIDADE DA ÁGUA: PROPOSTA DE NOVO ÍNDICE  
ALICERÇADO NA LÓGICA FUZZY**

“Tese apresentada como requisito parcial para a obtenção do Título de Doutor em Ciências da Saúde pelo Programa de Pós-Graduação em Ciências da Saúde da Universidade de Brasília”.

**ORIENTADOR: PROF. DR. CARLOS ALBERTO BEZERRA TOMAZ**

Brasília  
2010

**AÉCIO ALVES PEREIRA**

**AVALIAÇÃO DA QUALIDADE DA ÁGUA: PROPOSTA DE NOVO ÍNDICE  
ALICERÇADO NA LÓGICA FUZZY**

“Tese apresentada como requisito parcial para a obtenção do Título de Doutor em Ciências da Saúde pelo Programa de Pós-Graduação em Ciências da Saúde da Universidade de Brasília”.

Aprovado em 13/09/2010.

**BANCA EXAMINADORA**

---

**Prof. Dr. Carlos Alberto Bezerra Tomaz**  
Faculdade de Ciências da Saúde da Universidade de Brasília – UnB  
Presidente da Banca (Orientador)

---

**Prof. Dr. Pedro Sadi Monteiro**  
Faculdade de Ciências da Saúde da Universidade de Brasília – UnB

---

**Prof. Dr. Jurandir Rodrigues de Souza**  
Instituto de Química da Universidade de Brasília – UnB

---

**Prof. Dr. Alexandre Ricardo Soares Romariz**  
Faculdade de Tecnologia da Universidade de Brasília – UnB

---

**Prof. Dr. Tomás Daniel Menéndez Rodríguez**  
Universidade Federal de Rondônia – UNIR

---

**Prof. Dr. Marinaldo Felipe da Silva**  
Universidade Federal de Rondônia – UNIR  
(Suplente)

*Para os meus filhos **lara e lago**,  
por quem sinto amor em magnitude que não  
pode ser expressa em termos linguísticos.*

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço com profunda sinceridade a todas as pessoas ilustres ou não, que de forma direta e determinante contribuíram para a elaboração deste trabalho e com merecido destaque ao meu orientador, Prof. Dr. Carlos Alberto Bezerra Tomaz, pela paciência, atenção e pelas orientações seguras e esclarecedoras;

Aos amigos e sócios, Hildon de Lima Chaves e Ieda Pacheco Chaves pela amizade, paciência e apoio incondicional;

A toda equipe do Athenas Grupo Educacional, por executarem o seu trabalho com comprometimento e seriedade, o que me permitiu o tempo e a tranquilidade necessários para me dedicar à produção deste trabalho, em especial ao Prof. Ms. Elvys P. Ferreira de Oliveira, Prof. Ms. Alessandro Kraemer, Prof. Ms. Kueley Fernandes, Prof.<sup>a</sup> Paula Ramos de Souza, Prof. Éderson Garcia de Souza, Larissa Castro Nascimento, Rosângela A. Silva e Jussilaine Lyra Guimarães.

Ao amigo de jornada Prof. Ms. Genaldo Martins de Almeida, pelo exemplo de determinação e superação;

Ao Prof. Dr. Marinaldo Felipe da Silva, pela constante presença em minha trajetória acadêmica;

A Dra. Vivian Galvão, pelo direcionamento;

A minha querida irmã, Prof.<sup>a</sup> Eliene Alves Ferreira, por me acompanhar nesta travessia existencial;

A minha família, que perto ou longe, sempre me apoiaram e acreditaram no melhor que há em mim.

A Deus, que se fez homem e habitou entre nós, que me conhece pelo nome, que é o Senhor que diz e que faz.

*“Não vemos as coisas como elas são,  
nós as vemos como nós somos”.*

*Immanuel Kant.*

## RESUMO

PEREIRA, Aécio Alves. Avaliação da qualidade da água: proposta de um novo índice alicerçado na lógica fuzzy [tese]. Brasília: Universidade de Brasília, Faculdade de Ciências da Saúde; 2010.

Índices de Qualidade das Águas – IQA's são operadores matemáticos que processam um conjunto de indicadores analíticos, produzindo um resultado numérico indexado, capaz de expressar a qualidade da água. O IQA mais difundido e aceito mundialmente é o proposto pela *National Sanitation Foudantion - NSF*, estando fundamentado na lógica clássica. Na presente tese, apresenta-se um novo IQA, alicerçado na lógica *fuzzy*, cujos conjuntos não têm fronteiras rigidamente definidas e incluem variáveis linguísticas em sua matriz de decisão, produzindo estimativas de um sistema não linear complexo, sem recorrer a modelos matemáticos. Para validá-lo, comparou-se os seus resultados com os obtidos pela aplicação do IQA da *NSF* durante 24 meses, fazendo uso das amostras de água do Rio Pimenta Bueno (Rondônia, Brasil). As comparações realizadas indicam que o IQA *fuzzy* é mais sensível do que o IQA da *NSF* às variações dos valores dos parâmetros que os compõem. O IQA *fuzzy* configurado por meio do *software* MATLAB<sup>®</sup>, com as funções de agregação gaussianas, mostrou-se viável, seguro e mais flexível para avaliação da qualidade da água, podendo, portanto, ser considerado válido para classificação da qualidade da água de outros mananciais hídricos.

Palavras-chave: Lógica Fuzzy; Recursos Hídricos; Índice de Qualidade da Água.

## ABSTRACT

PEREIRA, Aécio Alves. Assessment of water quality: proposal for a new index grounded on fuzzy logic [thesis]. Brasília: Universidade of Brasilia, Faculty of Health Sciences; 2010.

Water Quality Index – WQI's are mathematics operators that process an analytics indicator set, producing a indexed numbered result, able to express the water quality. The WQI more broadcasted and accepted worldly is the one proposed by the *National Sanitation Foundation* – NSF, being reasoned in the classical logic. In the present thesis presents a new WQI, grounded in the *fuzzy* logic, which sets have not defined hard borders and include various linguistics in its decision matrix, producing estimates of a not complex linear system, not resort to mathematics models. To validates, it was compared to the results obtained from the application of WQI of NSF during 24 months, using samples from the Pimenta Bueno River (Rondônia- Brazil). The comparisons realized indicates that the WQI *fuzzy* is more sensible than the WQI of NSF to variation of the parameters that its compound. The WQI *fuzzy* configured through MATLAB<sup>®</sup> *software*, with Gaussians aggregations, showed itself as a viable, secure and more flexible to assessment the water quality, however, can be considered as a valid to classify the water quality and others water fountains.

Key words: Fuzzy Logic; Water Resources; Water Quality Index.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Curvas de valoração da condição dos parâmetros do IQA-NSF.....	25
Figura 2 – Local da coleta no rio Pimenta Bueno.....	40
Figura 3 – A máquina de inferência <i>fuzzy</i> .....	49
Figura 4 – Fluxograma dos sistemas <i>fuzzy</i> .....	52
Figura 5 – Curva de valoração do oxigênio dissolvido .....	69
Figura 6 – Curva de valoração dos coliformes fecais ou termotolerantes .....	70
Figura 7 – Curva de valoração potencial hidrogeniônico .....	72
Figura 8 – Curva de valoração da demanda bioquímica de oxigênio .....	73
Figura 9 – Curva de valoração dos nitratos totais .....	75
Figura 10 – Curva de valoração do fosfato total .....	76
Figura 11 – Curva de valoração da turbidez .....	78
Figura 12 – Curva de valoração dos sólidos totais .....	79
Figura 13 – Interface do <i>software</i> SICQA para cálculo do IQA.....	86
Figura 14 – SICQA com pesos modificados para os quatro primeiros parâmetros....	87
Figura 15 – Cálculo do $IQA_{NSF}$ do mês de setembro de 2007 utilizando o SICQA....	88
Figura 16 – IQA com resultado próximo a fronteira inferior do conjunto excelente....	89
Figura 17 – IQA com resultado próximo a fronteira superior do conjunto bom .....	89
Figura 18 – Fluxograma das atividades de pesquisa .....	92
Figura 19 – Fluxograma do sistema de inferência <i>fuzzy</i> .....	94
Figura 20 – Construção das regras de inferência .....	95
Figura 21 – Funções triangulares e trapezoidais do parâmetro oxigênio dissolvido..	96
Figura 22 – Funções gaussianas do parâmetro oxigênio dissolvido.....	96
Figura 23 – Funções triangulares e trapezoidais do parâmetro coliformes fecais.....	97
Figura 24 – Funções gaussianas do parâmetro coliformes fecais .....	97
Figura 25 – Funções triangulares e trapezoidais do parâmetro pH .....	98
Figura 26 – Funções gaussianas do parâmetro potencial hidrogeniônico .....	98
Figura 27 – Funções triangulares e trapezoidais do parâmetro temperatura.....	99
Figura 28 – Funções gaussianas do parâmetro temperatura.....	99
Figura 29 – Funções triangulares e trapezoidais do parâmetro DBO.....	100
Figura 30 – Funções gaussianas do parâmetro demanda bioquímica de oxigênio .	100
Figura 31 – Funções triangulares e trapezoidais do parâmetro nitratos totais.....	101

Figura 32 – Funções gaussianas do parâmetro nitratos totais .....	102
Figura 33 – Funções triangulares e trapezoidais do parâmetro turbidez .....	102
Figura 34 – Funções gaussianas do parâmetro turbidez.....	102
Figura 35 – Funções triangulares e trapezoidais do parâmetro fosfatos totais.....	103
Figura 36 – Funções gaussianas do parâmetro fosfatos totais .....	103
Figura 37 – Funções triangulares e trapezoidais do parâmetro sólidos totais .....	104
Figura 38 – Funções gaussianas do parâmetro sólidos totais .....	104
Figura 39 – Funções triangulares e trapezoidais do sistema de inferência <i>fuzzy</i> .....	105
Figura 40 – Funções gaussianas do sistema de inferência <i>fuzzy</i> .....	106
Figura 41 – Comparação das <i>mf</i> triangular <i>versus</i> gaussiana.....	107
Figura 42 – Comparação das <i>mf</i> 's triangulares e trapezoidais <i>versus</i> gaussianas.	107
Figura 43 – Funções triangulares e trapezoidais do sistema de inferência <i>fuzzy</i> .....	108
Figura 44 – Graus de pertinência a diferentes conjuntos triangulares .....	109
Figura 45 – Pertinência a diferentes conjuntos triangulares.....	109
Figura 46 – Funções gaussianas do sistema de inferência <i>fuzzy</i> .....	110
Figura 47 – Graus de pertinência à diferentes conjuntos gaussianos .....	111
Figura 48 – Pertinência a diferentes conjuntos gaussianos .....	111
Figura 49 – Tela principal do <i>software</i> IQA <sub>Fuzzy</sub> .....	112
Figura 50 – Tela de entradas de dados <i>software</i> IQA <sub>fuzzy</sub> .....	113
Figura 51 – Contribuição individual de cada parâmetro para o IQA final .....	114
Figura 52 – Contribuição de cada grupo para o IQA final.....	115
Figura 53 – Índice de participação em diferentes categorias .....	115
Figura 54 – Valores mensais dos parâmetros de peso alto .....	118
Figura 55 – Valores mensais dos parâmetros de peso médio .....	119
Figura 56 – Valores mensais dos parâmetros de peso baixo .....	119
Figura 57 – Cálculo do IQA do mês de setembro de 2007 .....	120
Figura 58 – Comparação dos valores dos IQA's ao longo do período estudado.....	122
Figura 59 – Contribuição dos parâmetros de alto peso para o IQA <sub>NSF</sub> .....	124
Figura 60 – Contribuição dos parâmetros de médio peso para o IQA <sub>NSF</sub> .....	125
Figura 61 – Contribuição dos parâmetros de baixo peso para o IQA <sub>NSF</sub> .....	125
Figura 62 – Contribuição dos subsistemas tritrap para obtenção do IQA.....	127
Figura 63 – Contribuição dos subsistemas gaussianos para obtenção do IQA.....	127
Figura 64 – Pertinência do IQA <sub>tritrap</sub> às categorias da tabela da NSF.....	129

Figura 65 – Pertinência do $IQA_{Gauss}$ às categorias da tabela da <i>NSF</i> .....	130
Figura 66 – Gráfico de “ <i>box &amp; whiskers</i> ” .....	132
Figura 67 – Média $\pm$ 1 desvio padrão ( $\mu \pm 1s$ ) .....	134
Figura 68 – Média $\pm$ 2 desvios padrão ( $\mu \pm 2s$ ) .....	134
Figura 69 – Média $\pm$ 3 desvios padrão ( $\mu \pm 3s$ ) .....	135
Figura 70 – Gráfico de controle do $IQA_{NSF}$ .....	136
Figura 71 – Gráfico de controle do $IQA_{tritrap}$ .....	136
Figura 72 – Gráfico de controle do $IQA_{Gauss}$ .....	137
Figura 73 – Histograma o $IQA_{NSF}$ .....	137
Figura 74 – Histograma do $IQA_{tritrap}$ .....	138
Figura 75 – Histograma do $IQA_{Gauss}$ .....	138
Figura 76 – Gráfico da correlação linear entre os $IQA$ 's .....	139

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Disponibilidade de água por habitante/região (1.000 m <sup>3</sup> ).....	33
Tabela 2 – Demandas hídricas no Brasil.....	33
Tabela 3 – Parâmetros que compõem o IQA e seus respectivos pesos.....	65
Tabela 4 – Classes de qualidade estabelecidas e seus respectivos intervalos.....	66
Tabela 5 – Classificação da água do Rio Pimenta Bueno em setembro de 2007.....	85
Tabela 6 – Valores médios dos 9 parâmetros de amostras de água do rio Pimenta Bueno, coletadas de setembro a dezembro de 2007.....	116
Tabela 7 – Valores médios dos 9 parâmetros de amostras de água do rio Pimenta Bueno, coletadas no primeiro semestre de 2008.....	116
Tabela 8 – Valores médios dos 9 parâmetros de amostras de água do rio Pimenta Bueno, coletadas no segundo semestre de 2008.....	117
Tabela 9 – Valores médios dos 9 parâmetros de amostras de água do rio Pimenta Bueno, coletadas de janeiro a agosto de 2009.....	117
Tabela 10 – Valores médios dos 9 parâmetros da água do rio Pimenta Bueno.....	118
Tabela 11 – Valores dos IQA's do rio Pimenta Bueno do período de setembro de 2007 a agosto de 2009.....	121
Tabela 12 – Contribuição dos parâmetros para o valor $IQA_{NSF}$ .....	123
Tabela 13 – Contribuição dos subsistemas para obtenção do IQA final.....	126
Tabela 14 – Percentuais de pertinência do $IQA_{NSF}$ e DO $IQA_{fuzzy}$ às categorias da tabela da <i>NSF</i> .....	128
Tabela 15 – Medidas Estatísticas dos IQA's.....	131
Tabela 16 – Intervalos de controle.....	133
Tabela 17 – Cálculo da ANOVA entre o $IQA_{NSF}$ x $IQA_{tritrap}$ utilizando excel.....	140
Tabela 18 – Cálculo da ANOVA entre o $IQA_{NSF}$ x $IQA_{Gauss}$ utilizando excel.....	141
Tabela 19 – Cálculo da ANOVA entre o $IQA_{tritrap}$ x $IQA_{Gauss}$ utilizando excel.....	141
Tabela 20 – Teste t para o $IQA_{NSF}$ x $IQA_{tritrap}$ .....	142
Tabela 21 – Teste t para o $IQA_{NSF}$ x $IQA_{Gauss}$ .....	142
Tabela 22 – Teste t para o $IQA_{tritrap}$ x $IQA_{Gauss}$ .....	142
Tabela 23 – Teste-t: duas amostras em par para médias.....	143
Tabela 24 – Teste-t: duas amostras em par para médias.....	143
Tabela 25 – Teste-t: duas amostras em par para médias.....	143

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

IQA	Índice de Qualidade da Água
OD	Oxigênio Dissolvido
Tu	Turbidez
ST	Sólidos Totais
pH	Potencial Hidrogeniônico
FUNASA	Fundação Nacional de Saúde
DBO	Demanda Bioquímica de Oxigênio
CF	Coliformes Fecais ou Termotolerantes
NT	Nitrato Total
PT	Fosfato Total
$\Delta T$	Variação de Temperatura
CAERD	Companhia de Águas e Esgotos de Rondônia
IR	Conjunto dos números Reais
IR <sup>n</sup>	Conjunto dos Números Reais no espaço n-dimensional
OMS	Organização Mundial de Saúde
PCA	Análise de componentes principais
NSF	<i>National Sanitation Foundation</i>
ABNT/NBR	Associação Brasileira de Normas Técnicas
SCQA	Sistema de cálculo da qualidade da água
q <sub>s</sub>	Parâmetro
C <sub>s</sub>	Concentração de Saturação
NMP	Número mais provável
e	Número de Euler
sen ( $\alpha$ )	Seno do ângulo ( $\alpha$ )
mg/l	Miligramas por litro
mf	Funções de agregação ou pertinência
DNAEE	Departamento Nacional de Águas e Energia Elétrica
ANA	Agência Nacional das Águas
CONAMA	Conselho Nacional do Meio Ambiente

## SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO .....</b>	<b>16</b>
1.1 OBJETIVOS .....	17
<b>1.1.1 Objetivo Geral .....</b>	<b>17</b>
<b>1.1.2 Objetivos Específicos .....</b>	<b>17</b>
1.2 RELEVÂNCIA E VIABILIDADE .....	18
1.3 ORIGINALIDADE DO TRABALHO.....	19
1.4 PROBLEMATIZAÇÃO E JUSTIFICATIVA.....	21
1.5 HIPÓTESES.....	22
1.6 MATERIAIS E MÉTODOS.....	22
<b>1.6.1 Fonte de Dados .....</b>	<b>22</b>
<b>1.6.2 Amostragem .....</b>	<b>23</b>
<b>1.6.3 Organização da Coleta.....</b>	<b>23</b>
<b>1.6.4 Informações e Materiais para o Cálculo do IQA Convencional.....</b>	<b>24</b>
<b>1.6.5 Informações e Materiais para o Cálculo do IQA <i>Fuzzy</i> .....</b>	<b>26</b>
1.7 ESTRUTURA DO TRABALHO.....	27
<b>2 REFERENCIAL TEÓRICO .....</b>	<b>28</b>
2.1 OS PROBLEMAS DOS RECURSOS HÍDRICOS NO PLANETA.....	28
<b>2.1.1 Oferta e Demanda de Água no Planeta.....</b>	<b>30</b>
<b>2.1.2 Recursos Hídricos no Brasil .....</b>	<b>32</b>
<b>2.1.3 Qualidade da Água e Saúde .....</b>	<b>34</b>
2.1.3.1 Patógenos de Grande Veiculação Hídrica no Brasil.....	37
<b>2.1.4 Águas Subterrâneas.....</b>	<b>38</b>
2.1.4.1 Aquífero Guarani .....	39
<b>2.1.5 Recursos hídricos de Pimenta Bueno – RO.....</b>	<b>40</b>
2.2 A LÓGICA <i>FUZZY</i> .....	40
<b>2.2.1 Lógica Clássica <i>versus</i> Lógica <i>Fuzzy</i> .....</b>	<b>45</b>
<b>2.2.2 Aplicações da Lógica <i>Fuzzy</i>.....</b>	<b>46</b>
<b>2.2.3 Os Sistemas Baseados em Lógica <i>Fuzzy</i> .....</b>	<b>48</b>
2.2.3.1 Módulo de <i>Fuzzificação</i> .....	49
2.2.3.2 Módulo da Base de Regras .....	50
2.2.3.3 Módulo de Inferência .....	51
2.2.3.4 Módulo de <i>Defuzzificação</i> .....	51
<b>2.2.4 Utilização dos Sistemas <i>Fuzzy</i> para Avaliação da Qualidade da Água .....</b>	<b>52</b>
2.3 CARACTERÍSTICAS PRINCIPAIS DE UM IQA.....	60
<b>2.3.1 Fórmula para Cálculo do IQA da <i>National Sanitation Foudantion</i> .....</b>	<b>64</b>
2.3.1.1 Oxigênio Dissolvido (OD) .....	66

2.3.1.2 Coliformes Termotolerantes ou Fecais (CF) .....	69
2.3.1.3 Potencial Hidrogeniônico (pH).....	71
2.3.1.4 Demanda Bioquímica de Oxigênio (DBO).....	72
2.3.1.5 Nitrato Total (NO <sub>3</sub> ).....	74
2.3.1.6 Fosfato Total (PO <sub>4</sub> ) .....	76
2.3.1.7 Turbidez (Tu).....	77
2.3.1.8 Sólidos Totais (ST).....	79
2.3.1.9 Variação de Temperatura (ΔT).....	79
<b>3 CÁLCULO DOS FATORES DO IQA DO RIO PIMENTA BUENO.....</b>	<b>81</b>
3.1 OXIGÊNIO DISSOLVIDO .....	81
3.2 COLIFORMES FECAIS (CF) OU COLIFORMES TERMOTOLERANTES .....	82
3.3 POTENCIAL HIDROGENIÔNICO (PH).....	82
3.4 DEMANDA BIOQUÍMICA DE OXIGÊNIO (DBO) .....	82
3.5 NITRATO TOTAL (NO <sub>3</sub> ) .....	83
3.6 FOSFATO TOTAL (PO <sub>4</sub> ).....	83
3.7 TURBIDEZ (TU) .....	83
3.8 SÓLIDOS TOTAIS (ST).....	84
3.9 VARIAÇÃO DE TEMPERATURA.....	84
3.10 IQA <sub>NSF</sub> DO RIO PIMENTA BUENO DO MÊS DE SETEMBRO DE 2007 .....	84
3.11 CÁLCULO DO IQA USANDO O <i>SOFTWARE</i> SIMULADOR SICQA .....	85
<b>4 PROPOSTA DE UM NOVO IQA BASEADO NA LÓGICA FUZZY (IQA<sub>FUZZY</sub>).....</b>	<b>91</b>
4.1 FUNÇÕES DE AGREGAÇÃO DO IQA <i>FUZZY</i> .....	95
4.2 SOMATÓRIO DOS PERCENTUAIS DE PERTINÊNCIA DO IQA <sub>FUZZY</sub> AOS ESTADOS DOS PARÂMETROS .....	108
4.3 APRESENTAÇÃO DO <i>SOFTWARE</i> PARA CÁLCULO DO ÍNDICE DE QUALIDADE DE ÁGUA BASEADO NA LÓGICA <i>FUZZY</i> (IQA <sub>FUZZY</sub> ).....	112
<b>4.3.1 A Função Contribuição de cada Parâmetro para o IQA Final.....</b>	<b>113</b>
<b>4.3.2 A Função Contribuição de Cada Grupo para o IQA Final .....</b>	<b>114</b>
<b>4.3.3 A Função Índices Percentuais .....</b>	<b>115</b>
4.4 VALORES DOS PARÂMETROS DO IQA DO RIO PIMENTA BUENO .....	116
4.5 CÁLCULO DO IQA <sub>FUZZY</sub> DO RIO PIMENTA BUENO O MATLAB® .....	120
4.6 CONTRIBUIÇÃO INDIVIDUAL DOS PARÂMETROS PARA O IQA .....	123

4.7 CONTRIBUIÇÃO DOS SUBSISTEMAS <i>FUZZY</i> PARA O VALOR DO IQA .....	126
4.8 PERTINÊNCIA DO $IQA_{NSF}$ E DO $IQA_{FUZZY}$ ÀS CLASSES DE QUALIDADE ....	128
<b>4.8.1 Pertinência do <math>IQA_{tritrap}</math> às Classes de Qualidade da Água .....</b>	<b>129</b>
<b>4.8.2 Pertinência do <math>IQA_{Gauss}</math> às Classes de Qualidade da Água .....</b>	<b>129</b>
<b>5 AVALIAÇÃO ESTATÍSTICA DOS RESULTADOS DOS IQA'S .....</b>	<b>131</b>
5.1 INFERÊNCIAS ESTATÍSTICAS .....	131
5.2 GRÁFICOS DE <i>BOX &amp; WHISKERS</i> PARA AS MEDIDAS SEPARATRIZES ....	131
5.3 GRÁFICOS DE <i>BOX &amp; WHISKERS</i> PARA A MÉDIA E DESVIO PADRÃO .....	132
5.4 GRÁFICOS DE CONTROLE DOS IQA'S .....	135
5.5 HISTOGRAMA DOS VALORES DOS IQA'S .....	137
5.6 COEFICIENTE DE CORRELAÇÃO LINEAR ENTRE OS IQA'S .....	139
5.7 TESTES DE HIPÓTESES .....	140
<b>5.7.1 Análise de Variância .....</b>	<b>140</b>
5.7.1.1 Cálculo da Anova: Fator Único .....	140
<b>5.7.2 Teste – T: Duas Amostras Presumindo Variâncias Diferentes .....</b>	<b>141</b>
<b>5.7.3 Teste – T: Duas Amostras em Par para Médias .....</b>	<b>143</b>
<b>6 CONSIDERAÇÕES FINAIS .....</b>	<b>144</b>
6.1 DIFICULDADES ENCONTRADAS .....	146
6.2 RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS .....	147
<b>REFERÊNCIAS .....</b>	<b>148</b>
<b>APÊNDICE A – VALORES MENSIS GERADOS PELO MATLAB® .....</b>	<b>155</b>
<b>APÊNDICE B – REGRAS DE INFERENCIA IMPLEMENTADAS NO MATLAB® ..</b>	<b>164</b>
<b>ANEXO A – LAUDO DE ANÁLISE DE ÁGUA (SET A DEZ/2007) .....</b>	<b>167</b>
<b>ANEXO B – LAUDO DE ANÁLISE DE ÁGUA (1º SEMESTRE 2008) .....</b>	<b>168</b>
<b>ANEXO C – LAUDO DE ANÁLISE DE ÁGUA (2º SEMESTRE 2008) .....</b>	<b>169</b>
<b>ANEXO D – LAUDO DE ANÁLISE DE ÁGUA (JAN A AGO 2009) .....</b>	<b>170</b>
<b>ANEXO E – CERTIFICADO DO COMITÊ DE ÉTICA EM PESQUISA .....</b>	<b>170</b>

## 1 INTRODUÇÃO

A água é considerada um recurso ou bem econômico, sendo finita, vulnerável e essencial para a conservação da vida e do meio ambiente. Por outro lado, é também tida como um recurso ambiental, pois a alteração adversa desse recurso pode contribuir para a degradação da qualidade ambiental. Já a degradação ambiental afeta, direta ou indiretamente, a saúde, a segurança e o bem-estar da população; as atividades sociais e econômicas; a fauna e a flora; as condições estéticas e sanitárias do meio e a qualidade dos recursos ambientais (1).

A água pura é um líquido incolor, inodoro, insípido e transparente. Entretanto, por ser um ótimo solvente, nunca é encontrada em estado de absoluta pureza. Contendo várias impurezas que vão desde alguns miligramas por litro na água da chuva, a mais de 30 mil miligramas por litro na água do mar. A natureza e a composição do solo sobre ou através do qual a água escoar, determinam suas impurezas adicionais (2), fato agravado pela expansão demográfica e das atividades econômicas na indústria e agricultura, fazendo com que não se considere segura nenhuma fonte de água superficial, sendo obrigatória outra forma de tratamento.

O tratamento que necessita ser dispensado a degradação ambiental reúne e equaciona os valores que devem ser construídos visando à superação do conjunto dos problemas das sociedades humanas. Dimensões como a dos direitos humanos, direito à heterogeneidade cultural e pluralidade política, eliminação da pobreza, gestão coletiva dos recursos disponíveis, entre outras, são considerados componentes da nova racionalidade ambiental vigente (3). O fornecimento de água para a humanidade articula-se estreitamente às prioridades estabelecidas pelos homens. Os usos dados à água refletem, no fim das contas, os valores mais profundos das próprias sociedades (4).

A água é um recurso natural escasso, insubstituível, não ampliável por mera vontade do homem, irregular em sua forma de apresentação no tempo e no espaço, facilmente vulnerável e susceptível de usos sucessivos (5). Constitui-se em um recurso unitário que se renova através do ciclo hidrogeológico e que conserva, a efeitos práticos, uma magnitude quase constante dentro de cada uma das bacias

hidrográficas.

Para Merrett & Gray *apud* Tundisi (6), o suprimento de água para as casas pode ser considerado uma “função reprodutiva” porque permite a reprodução da espécie humana e, portanto, a sobrevivência da espécie.

A água é uma das principais preocupações mundiais no que diz respeito aos seus usos preponderantes e a sua manutenção como um bem de todos, em quantidade e qualidade adequadas (7).

## 1.1 OBJETIVOS

Apresenta-se a seguir o objetivo geral e os objetivos específicos desta pesquisa.

### 1.1.1 Objetivo Geral

Elaborar e propor um índice de qualidade da água – IQA alicerçado na lógica *fuzzy* para avaliar a qualidade da água do rio Pimenta Bueno, localizado no município de mesmo nome.

### 1.1.2 Objetivos Específicos

- Classificar a água do rio Pimenta Bueno, a partir dos resultados análises das amostras coletadas, utilizando o índice de qualidade de água – IQA, que leva em consideração as características físicas, químicas e biológicas da água e que é baseado na lógica clássica;
- Desenvolver um novo índice de qualidade da água baseado na lógica *fuzzy* para avaliação da água do Rio Pimenta Bueno;
- Testar o IQA elaborado e proposto;
- Comparar os resultados obtidos pelo IQA clássico e pelo IQA baseado na lógica *fuzzy*;
- Validar o IQA elaborado e proposto.

## 1.2 RELEVÂNCIA E VIABILIDADE

Uma das grandes ameaças à sobrevivência da humanidade, nos próximos séculos, é a contaminação química das águas. O aumento da fabricação de substâncias químicas logo após a segunda guerra mundial produziu enorme variedade de compostos químicos e sintéticos. Essas substâncias desenvolvidas para controlar as doenças aumentaram a produção de alimentos e a expectativa de vida, mas, ironicamente, tornaram-se uma ameaça à saúde pública, à saúde humana e à biodiversidade, colocando em risco os sistemas de suporte à vida, incluindo a biodiversidade do planeta.

Os recursos hídricos poluídos por descargas humanas e de animais transportam grande variedade de patógenos, entre eles bactérias, vírus, protozoários ou organismos multicelulares, que podem causar doenças gastrointestinais. Outros organismos podem infectar os seres humanos por intermédio do contato com a pele ou pela inalação por dispersão no ar, a partir de aerossóis contaminados (6).

Para Ocampo-Duque (8) os indicadores de qualidade de água têm sido geralmente agrupados em três grandes categorias: física, química e biológica, cada um deles contendo um número significativo de variáveis. A aceitabilidade da qualidade da água para seu uso pretendido depende da magnitude destes indicadores que são regidos por normas e resoluções oficiais. Relatórios tradicionais sobre a qualidade da água tendem a ser demasiadamente técnicos e detalhados, apresentando dados de controle de substâncias individualmente, sem fornecer uma visão de conjunto para interpretação da qualidade da água. Para resolver esta lacuna, diferentes índices de qualidade têm sido desenvolvidos em todo o mundo, objetivando integrar as diferentes variáveis de qualidade da água.

O efetivo monitoramento em tempo real da qualidade da água e controle ambiental pode diminuir consideravelmente os riscos e as incertezas no tratamento de água, dando melhores condições de operação às estações de tratamento e estabilizando a qualidade da água servida à população (6).

É incontestável a importância de se conhecer a qualidade sanitária da água . Para tanto, é necessária a existência de mecanismos que auxiliem na avaliação e classificação da qualidade da água de forma segura e eficiente, tais como ferramentas computacionais e índices de qualidade, bem como, de ferramentas que simulem as consequências dos possíveis acontecimentos relacionados a água.

A manutenção das reservas de água doce potável vem se tornando objeto de grande preocupação do homem. Na atualidade já é insuficiente ou ausente para milhões de seres humanos que se obrigam a consumir água de qualidade não recomendada. Dentro de poucas décadas, será um dos elementos de maior escassez (9), podendo render divisas para aqueles que compreenderem antecipadamente a necessidade da correta gestão e tratamento sanitário, e miséria e doenças para os que assim não o fizerem.

A validação e consagração mundial da aplicação de sistemas de controle *fuzzy*, baseado nesta mesma lógica, abre precedentes enormes para novas aplicações. Ora, o que se pretende fazer, é exatamente uma aplicação da lógica *fuzzy* tendo em vista melhorar os padrões de classificação de um bem ambiental de grande preciosidade para a humanidade, que é a água.

Malutta (10) apresenta como recomendação para trabalhos futuros, em sua tese de doutoramento, a aplicação da lógica *fuzzy* para outros empreendimentos de responsabilidade pública ou privada (sistema de tratamento de esgoto, tratamento de água, etc.);

### 1.3 ORIGINALIDADE DO TRABALHO

O ineditismo deste trabalho está sustentado pela aplicação de uma lógica matemática relativamente nova, estabelecendo novos critérios para classificação da qualidade da água, contrapondo e comparando os resultados com os resultados provenientes dos procedimentos atuais que são baseados na aplicação do cálculo do Índice de Qualidade da Água – IQA da *National Sanitation Foundation* - NSF.

A aplicação da lógica *fuzzy* permite que os resultados obtidos por intermédio do sistema implementado, sirvam como parâmetro e orientação para os dirigentes municipais, gestores de sistemas de tratamento e abastecimento de água, órgãos governamentais, e por fim, o consumidor final, fortalecendo o processo de efetivo controle social da qualidade da água.

Em situações detectadas como de risco à saúde, decorrente da má qualidade da água, é importante o estabelecimento de mecanismos de controle, monitoramento e avaliação da água, visando o controle ou a eliminação dos riscos. Algumas ações de controle poderão ser realizadas pelo setor de saúde, no entanto, este ainda carece de ferramental metodológico para efetivo controle. A prova cabal deste acontecimento é o fato de que, de acordo com Borsoi (1), entre 8 milhões e 11 milhões de pessoas morrem anualmente no mundo por causa de problemas relacionados ao controle da qualidade da água (doenças provenientes da contaminação) ou da quantidade (inundações e secas).

De acordo com Icajá (11), a avaliação convencional da qualidade da água contém as classes de qualidade, que usam conjuntos “*crisp*<sup>1</sup>”, e os limites entre as diferentes classes têm uma inerente imprecisão. Os métodos que contém limites superiores e inferiores apresentam ambiguidades, sendo que o método da avaliação tradicional da qualidade da água utiliza a forma discreta. Esta classificação técnica pode causar uma aproximação grosseira e imprecisa de dados, assim, nesta abordagem, o fato do valor de um parâmetro estar perto ou longe do limite tem igual importância para avaliação da concentração.

As limitações e complexidades dos modelos deterministas, bem como as aproximações envolvidas nos métodos tradicionais utilizados para calcular os índices de qualidade da água motivaram o desenvolvimento de métodos de avaliação mais avançados, capazes de integrar e contabilizar o impreciso, o vago, o qualitativo, o difuso, envolvendo muitas vezes informações relacionadas com a qualidade da água (12).

---

<sup>1</sup>Subconjunto de um conjunto universo convencional; sua tradução significa puro, decidido.

Neste sentido, a apresentação de uma proposta que se mostre capaz de melhorar a eficácia dos sistemas de classificação e avaliação da qualidade da água, vai de encontro a uma necessidade preeminente de controle dos padrões de potabilidade, utilizando um lógica que se faz cada vez mais presente através de suas aplicações em diversos ramos do conhecimento, inclusive na elaboração de novos índices de qualidade da água.

#### 1.4 PROBLEMATIZAÇÃO E JUSTIFICATIVA

A utilização de um modelo de classificação da qualidade da água baseado na lógica clássica, que considera que um elemento pertence ou não a um conjunto de forma absoluta, faz com que a variação ínfima na quantidade de um dos elementos constituintes do índice de qualidade da água – IQA altere a pertinência da qualidade da água de uma classe para outra. Assim, se o resultado do IQA for, por exemplo, 50, a qualidade da água avaliada seria definida como pertencente à categoria “ruim”. Se porventura o IQA fosse 50,00001, a água seria considerada como pertencente a categoria “média”. Entende-se então que essa mudança abrupta de uma categoria para outra é uma forma inadequada de classificação.

Um sistema de classificação baseado na lógica *fuzzy* permite a passagem de uma categoria para outra de forma suave e gradual, atribuindo o grau de pertinência dos corpos d’água analisados em uma e outra categoria. Assim, um mesmo resultado permitirá uma classificação de alta pertinência na categoria “ruim” e baixa pertinência na categoria “média”, por exemplo, ou seja, uma relativização do resultado do IQA, renegando uma forma de julgamento absoluta.

O município de Pimenta Bueno, de acordo com o zoneamento socioeconômico ecológico do Estado de Rondônia (13), está situada na Zona 1, subzona 1.4, que compreende ecossistemas de relevante interesse para a preservação dos recursos naturais, em especial os hídricos, já que alguns rios desta subzona apresentam expressivo potencial para aproveitamento hidrelétrico com pequenas centrais de produção.

## 1.5 HIPÓTESES

As hipóteses formuladas são:

1. Índices de qualidade da água baseados na lógica *fuzzy* são mais eficazes do que os índices vigentes baseados na lógica clássica.
2. A utilização de índice de qualidade baseado na lógica *fuzzy* melhora os padrões de avaliação e classificação da qualidade da água.

## 1.6 MATERIAIS E MÉTODOS

Os métodos definidos para execução desta pesquisa, assim como os materiais necessários, estão apresentados nesta secção.

### 1.6.1 Fonte de Dados

O Decreto Federal n. 5.440 (14), prevê em seu artigo 3º que os órgãos e as entidades dos Estados, Municípios, Distrito Federal e Territórios, deverão enviar as informações aos consumidores sobre a qualidade da água. Seu artigo 8º assegura ainda, que o consumidor poderá ter acesso aos resultados dos demais parâmetros de qualidade de água para consumo humano estabelecidos pelo Ministério da Saúde. Os parâmetros que por força deste decreto devem ser divulgados ao consumidor dos sistemas de abastecimento e distribuição de água são: Turbidez, Potencial Hidrogeniônico, Cor, Cloro residual, Flúor e Coliformes Totais.

Esta obrigatoriedade diz respeito ao fornecimento de dados sobre a água já tratada, e o objetivo deste trabalho inclui a avaliação da água do Rio Pimenta Bueno, ou seja, há a necessidade de informações sobre o manancial onde é captada a água. Assim, a Companhia de Águas e Esgotos de Rondônia (CAERD) não é obrigada a monitorar os parâmetros necessários para o cálculo do IQA deste trabalho, não possuindo, portanto, os dados requeridos.

Diante da inexistência dos dados necessários, todos os valores dos parâmetros utilizados para o cálculo do IQA, adiante apresentados, foram obtidos através da análise de amostras coletadas pelo próprio pesquisador de acordo com a

Associação Brasileira de Normas e técnicas/Normas ABNT/NBR 9898 (15), que trata da preservação e técnicas de amostragem de efluentes líquidos e corpos receptores.

Antes da realização da pesquisa, submeteu-se o projeto a apreciação do comitê de ética em pesquisa da Faculdade de Ciências Biomédicas de Cacoal – RO, que o julgou adequado à legislação pertinente e o considerou aprovado, conforme certificado cujo número do protocolo é 213/2007 (documento anexo).

### **1.6.2 Amostragem**

Conforme a ABNT/NBR (15), o programa de amostragem deve ser planejado em função do objetivo do estudo proposto, com a escolha dos pontos e do número mínimo de amostras que sejam representativas do corpo d'água em observação, não estabelecendo, no entanto quantidades de amostras que devem ser coletadas.

Ao todo, realizou-se a coleta de 48 amostras, durante um período de 24 meses, obedecendo ao protocolo de coleta, transporte e armazenamento da ABNT/NBR (15). A definição deste número de amostras, não seria representativa, caso o objetivo do estudo fosse monitorar o padrão de potabilidade da água do manancial, o que, definitivamente não é o propósito deste trabalho e sim, o de propor um novo índice de qualidade de água. Esta amostragem gerou valores para os 09 parâmetros que compõe o IQA da NSF.

Não sendo o objetivo principal deste trabalho, emitir pareceres quanto a qualidade da água oferecida a população, mas sim, o de propor um modelo mais eficiente de avaliação baseado na lógica *fuzzy*, o tamanho da amostragem realizada confere viabilidade e segurança aos resultados alcançados, permitindo a obtenção de dados que permitam comparar os dois modelos de avaliação.

### **1.6.3 Organização da Coleta**

O itinerário de coleta definido levou em conta o determina a ABNT (15) já citada, sendo que entre a coleta e a entrega das amostras para análise transcorreu um tempo máximo de 2 horas, quando se dispunha de pelo menos 24 horas, para os

parâmetros cuja análise é mais urgente e até mesmo de dias, para os parâmetros cujos prazos são mais elásticos.

Coletou-se amostras do Rio Pimenta Bueno, sempre num mesmo local, a aproximadamente 100 metros abaixo do ponto de captação de água da CAERD, sendo que entre estes dois pontos não há lançamento direto de efluentes. O ponto de coleta situa-se nas coordenadas S 11° 40' 23" e 061° 11' 18". A coleta foi realizada sempre por volta das sete horas da manhã, na primeira e terceira segunda feira de cada mês, no período de setembro de 2007 a agosto de 2009. Desta forma obteve-se duas amostras mensais, das quais calculou-se média aritmética dos valores de cada um dos parâmetros, gerando vinte e quatro valores diferentes, obtidos de 48 observações quinzenais.

As amostras foram estocadas em frascos de plástico resistentes e autoclaváveis com capacidade de 2.500 ml cada um, que foram submetidos ao processo de autoclave, a 121°, com 1 atm, durante 30 minutos. O frasco e a tampa eram do mesmo material. Os frascos foram preenchidos em sua totalidade.

As análises das amostras foram realizadas por laboratório idôneo e registrado no Conselho Regional de Química, localizado na sede do município, cujo profissional responsável tem registro neste mesmo conselho. Os protocolos de análise utilizados foram Lei de Henry (água analisada a 15 °C), Winkler, Gooch e Titulações.

#### **1.6.4 Informações e Materiais para o Cálculo do IQA Convencional**

O Índice mais largamente utilizado em diversos países do mundo avaliar a qualidade dos corpos d'água é o IQA desenvolvido pela *National Sanitation Foundation*, *NSF*, dos Estados Unidos – conforme pode ser confirmado em (9,12, 16-30) –, que tem como característica principal o poder de refletir a situação ambiental dos corpos hídricos de maneira acessível aos não técnicos.

Este IQA foi desenvolvido, através de pesquisa de opinião junto a vários especialistas da área ambiental, quando cada técnico selecionou, a seu critério, os parâmetros relevantes para avaliar a qualidade das águas e estipulou, para cada um

deles, um peso relativo na série de parâmetros especificados. O tratamento destes dados definiu um conjunto de nove parâmetros considerados mais representativos para a caracterização da qualidade das águas: oxigênio dissolvido, coliformes fecais, pH, demanda bioquímica de oxigênio, nitrato, fosfato total, variação de temperatura da água, turbidez e sólidos totais. A cada parâmetro foi atribuído um peso, de acordo com a sua importância relativa no cálculo do IQA, e traçadas curvas médias de variação da qualidade das águas em função da concentração do mesmo (18).

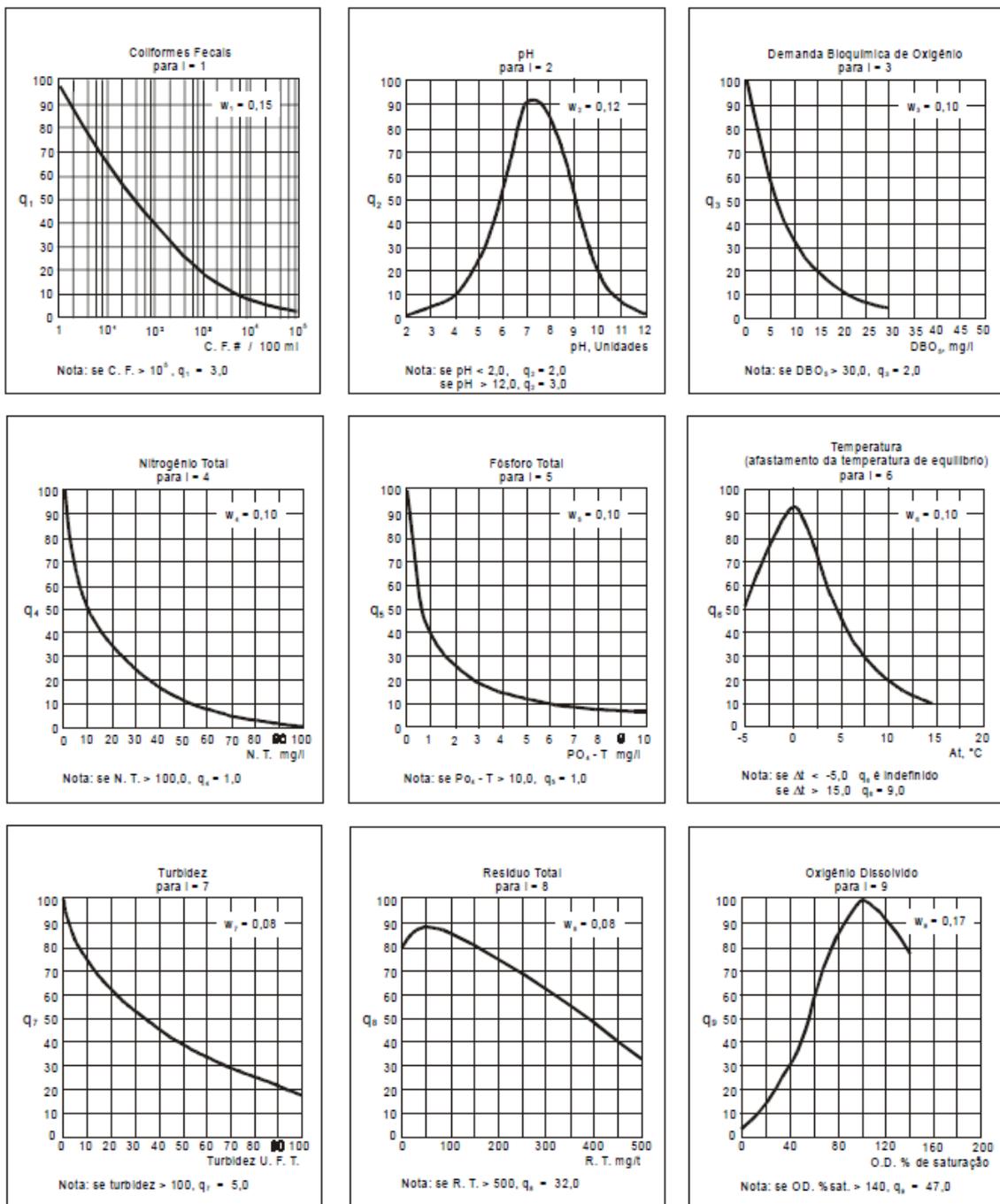


Figura 1 – Curvas de valoração da condição dos parâmetros do IQA-NSF (19)

Quanto aos interferentes endócrinos – que são substâncias químicas exógenas que alteram uma ou mais funções no sistema endócrino, bem como sua estrutura, causando efeitos adversos tanto sobre um organismo e sua descendência, como em populações de organismos, incluindo seres humanos (31) – não foram considerados como parâmetros componentes do IQA proposto.

Este IQA da NSF foi utilizado para calcular a qualidade da água do Rio Pimenta Bueno, servindo de padrão de comparação com o IQA proposto neste trabalho, uma vez que já é aceito e validado mundialmente. Foram utilizados os mesmos valores dos parâmetros tanto para o cálculo do IQA convencional como para o cálculo do IQA que se propõe no presente trabalho.

#### **1.6.5 Informações e Materiais para o Cálculo do IQA *Fuzzy***

Para a elaboração no novo IQA alicerçado na lógica *fuzzy*, foram utilizadas as mesmas informações coletadas para o IQA convencional, com o propósito de fazer inferências, comparações e testes estatísticos, tendo como parâmetro esta mesma medida que já foi definida, testada e utilizada mundialmente.

Foi utilizado o MATLAB<sup>®</sup> versão 7.6.0, que é tanto uma linguagem de programação quanto um ambiente de computação técnica e científica, que permite a interação com o usuário através de uma janela, denotada por Janela de Comando, onde os comandos devem ser fornecidos pelos usuários para que os cálculos e resultados, realizados através da linguagem FORTRAN, sejam exibidos (32).

O MATLAB<sup>®</sup> dispõe de vários *toolbox*, cada um constando de uma coleção de arquivos destinados a tratar certas classes de problemas científicos. Dentre estes, encontra-se o ***Fuzzy Logical Toolbox***, que é de interesse deste estudo e onde estão disponibilizados arquivos e funções destinadas ao uso da teoria de conjuntos *fuzzy*. Para Wen (33), este *software* também se mostra altamente conveniente para processar os mais diversos tipos de gráficos.

## 1.7 ESTRUTURA DO TRABALHO

Este trabalho é composto por 6 capítulos, acrescidos de apêndice e de anexos. No capítulo 1 foi feita uma exposição geral acerca do assunto a ser explorado, definiu-se os objetivos, delimitou-se a área de estudo, estabeleceu-se as hipóteses e delineou-se os passos metodológicos da pesquisa.

O segundo capítulo é destinado à apresentação do referencial teórico, que procura trazer o estado da arte para os três pilares no qual se apóia esta pesquisa: água, saúde e lógica *fuzzy*.

No terceiro capítulo, é apresentado o cálculo de todos os fatores que compõe o índice de qualidade da água IQA da *National Sanitation Foudantion - NSF*, bem como, do próprio IQA.

No quarto capítulo é feita a proposta do novo IQA fundamentado na lógica *fuzzy*, sendo neste capítulo, que reside o ineditismo, que pode caracterizar esta proposta como tese de Doutorado.

No quinto capítulo são feitas as inferências estatísticas com o objetivo de validar novo IQA *fuzzy* proposto.

No sexto e último capítulo são feitas as considerações finais, apresenta-se as conclusões e recomendações para trabalhos futuros.

## 2 REFERENCIAL TEÓRICO

### 2.1 OS PROBLEMAS DOS RECURSOS HÍDRICOS NO PLANETA

Como os bens fluídos são renováveis, enquanto a demanda for inferior ao seu suprimento, os problemas de seu uso são controláveis e resolvíveis. Contudo, quando a demanda supera a oferta, começam a surgir os conflitos de uso, havendo necessidade de se estabelecer a publicização destes bens, para os quais deverão ser estabelecidos controles (34).

Quando a água é abundante e o volume *per capita* é muito alto, como nas regiões da bacia amazônica ou em alguns lagos africanos, os vários aspectos dos usos múltiplos podem coexistir sem graves problemas. Entretanto, é na escassez que os conflitos sobre a água emergem e a competição se acirra. Essa escassez pode ser resultado de avidez no uso e desequilíbrio permanente no ciclo hidrológico ou pode resultar do excesso de poluição e contaminação que limita os usos múltiplos e somente permite certos tipos de usos.

Através dos séculos, a complexidade dos usos múltiplos da água pelo homem aumentou e produziu enorme conjunto de degradação e poluição. Por outro lado, os usos múltiplos excessivos e as retiradas permanentes para diversas finalidades têm diminuído consideravelmente a disponibilidade de água, gerando inúmeros problemas de escassez em muitas regiões e países (6).

De acordo com Tundisi (6), no limiar do século XXI, entre outras crises sérias, a crise da água é uma ameaça permanente à humanidade e à sobrevivência da biosfera como um todo. Esta crise tem grande importância e interesse geral: além de colocar em perigo a sobrevivência do componente biológico, incluindo o *Homo sapiens*, ela impõe dificuldades ao desenvolvimento, aumenta a tendência a doenças de veiculação hídrica, produz estresses econômicos e sociais e aumenta a desigualdade entre regiões e países. A água sempre foi recurso estratégico à sociedade. O crescimento populacional e as demandas sobre os recursos hídricos

superficiais e subterrâneos são algumas das causas fundamentais da crise.

De acordo com Rebouças (35), a água não é como os demais recursos naturais da terra, nem somente uma matéria prima. Ela é primordialmente um bem ambiental. É a única matéria-prima ambiental cuja utilização tem um efeito de retorno sobre o manancial utilizado. Desta forma, deve-se envidar esforços para o uso cada vez mais eficiente da água disponível, ou seja, a obtenção de cada vez mais benefícios com o uso de cada vez menos água e proteção da sua qualidade.

Para que um bem possa ser considerado ambiental, ele deve ser, além de uso comum do povo, essencial à sadia qualidade de vida. Os bens essenciais à sadia qualidade de vida são aqueles fundamentais à garantia da dignidade da pessoa humana, que constitui um dos fundamentos do Estado Democrático de Direito. São ambientais todos os bens que adquirem essencialidade para a manutenção da vida de todas as espécies (biodiversidade) e de todas as culturas (sociodiversidade) (36).

O processo de interação entre os homens individualmente e/ou em grupo e os seus respectivos meios ambientes é dialético. Esse processo pode ser definido nos seguintes termos: toda a prática social tende a modificar (ou a adaptar-se a) um ecossistema do qual faz parte o tipo de ator que a exprime. As relações entre atores sociais e meio ambiente são recíprocas, e os fenômenos de *feedback* são a regra, e não a exceção.

Para a manutenção de um desenvolvimento sustentável é necessário que sejam preservados os recursos hídricos tanto em quantidade como em qualidade. As futuras gerações terão as mesmas necessidades fundamentais que as atuais para a sua manutenção, embora provavelmente desenvolvam técnicas mais adequadas para o manejo e a utilização dos recursos hídricos.

As principais fontes de poluição da água são: descargas industriais de resíduos químicos e derivados, descarga mal tratada ou sem tratamento de esgoto, escoamento superficial contendo pesticidas, práticas agrícolas envolvendo corte e

queima, escoamento superficial contendo produtos de petróleo derramado, restos de obras, fazendas, superfícies impermeáveis ou pavimentadas, água aquecida ou utilizada em processos industriais, chuvas ácidas causadas por descargas industriais de dióxido de enxofre, excesso de nutrientes arrastados por enxurrada contendo detergentes ou fertilizantes, vazamento de tanques subterrâneos de armazenamento (37).

### **2.1.1 Oferta e Demanda de Água no Planeta.**

De todo o consumo per capita apenas 2 ou 3 litros de água são utilizados, em um país tropical, como bebida ou no preparo dos alimentos. Essa parcela, bem como a água destinada à higienização corporal, deve ser objetivo da mais rigorosa padronização de qualidade, de forma a não se tornar comprometedora da saúde pública.

De acordo com Borsoi (1), a demanda das populações por água depende dos padrões e costumes de uso, da renda, de sua localização urbana ou rural, da disponibilidade de água e outros fatores. Segundo a Organização Mundial de Saúde (OMS) *apud* Borsoi (1), as populações rurais de países em desenvolvimento consomem entre 35 e 90 litros de água por habitante/dia. Entretanto, a demanda de água das populações urbanas, mesmo em países em desenvolvimento, é bastante superior, podendo variar de uma demanda de 150 litros por habitante/dia, nas zonas urbanas desprovidas de esgoto, até 1.500 litros por habitante/dia, em zonas urbanas de edifícios de apartamentos.

A demanda total de água no mundo é de apenas cerca de 11% da vazão média dos rios, 70% dos quais utilizados pelas atividades agrícolas, 20% pelas indústrias e 10% referentes à demanda do consumo doméstico e ao uso consumptivo (35).

Embora seja antiga a noção de que a Terra tem a maior parte de sua superfície coberta por água, o conhecimento da verdadeira dimensão de seu volume é relativamente recente. Mais recente ainda é a percepção de que, apesar de

abundante, uma parcela muito pequena dessa água, cerca de 2,5%, é doce e que bem menos de 1% está acessível para o consumo humano nos rios, nos lagos e no subsolo (36). A superfície de nosso planeta é constituída de 29% de terra firme e 71% de área superficial líquida. Deste volume, 97% é de água salgada e 3% de água doce, com apenas 0,6% de águas superficiais, onde pouco mais da metade está disponível nos lagos e rios (4, 38-40). Informações próximas a estas são fornecidas por Tundisi (6) que apresenta como falsa a aparente concepção de que a água doce é abundante. Somente 3% da água do planeta é disponível como água doce. Destes 3%, cerca de 75 % estão congelados nas calotas polares e cerca de 10% estão reservados nos aquíferos. Portanto, somente 15% dos 3% de água doce do planeta estão disponíveis. Corroborando com estas informações, Borsoi (1) afirma que da quantidade de água existente sobre a terra (1.370 milhões de km<sup>3</sup>), 97,2% são de água salgada. A água presente na neve ou no gelo corresponde a 2,1%, a água doce equivale a 0,6% do total e o restante da água apresenta-se na forma de vapor atmosférico. A água doce, portanto, tem reservas estimadas em 8,2 milhões de km<sup>3</sup>, sendo que, desse total, somente 1,2% (98.400 km<sup>3</sup>) apresenta-se na forma de rios e lagos e os restantes 98,8% constituem águas subterrâneas ou aquíferos.

De acordo com Branco (41) uma prática que vem sendo adotada em quase todo o mundo é a que entende que a água dita potável deve não apenas ser inócua à saúde, como também, portadora de substâncias protetoras desta última, como é o caso da aplicação de compostos de flúor como preventivos da cárie dentária. Porém, não sendo viável a instalação de diversos sistemas de abastecimento, destinados aos vários usos da água, todo volume *per capita* recebe igual tratamento, mesmo que, na maior parte dos usos, não seja necessário um elevado grau de qualidade ou, no caso do flúor, este não apresente qualquer utilidade ou benefício, por exemplo, na lavagem de ruas, na extinção de incêndios ou no uso industrial.

De acordo com Salati (42), em virtude do crescimento populacional e da urbanização nos países em desenvolvimento, a demanda pela água vai aumentar em pelo menos 50% no próximos vinte anos. A competição pela água poderá limitar significativamente sua disponibilidade para irrigação e, conseqüentemente, reduzir a

produção de alimento no mundo.

A escassez de água pode cada vez mais agir como catalisador no conjunto de causas ligadas a qualquer conflito futuro. A diminuição dos recursos hídricos, associada a uma maior demanda por água potável, ameaça transformar esta matéria em uma explosiva questão geopolítica, já que aproximadamente 200 bacias hidrológicas se localizam em áreas de fronteiras de vários países. Muitos especialistas prevêem que as guerras do próximo século serão pela posse da água e não pelo petróleo ou motivos políticos (42).

### **2.1.2 Recursos Hídricos no Brasil**

A América do sul é responsável pela drenagem de 27% de toda a água que escoar pelo planeta (6). A região com maior abundância e disponibilidade de recursos hídricos é a região norte, principalmente levando-se em conta a baixa densidade populacional. Entretanto, as precárias condições sanitárias agravam o problema da saúde humana, com incidência sobre mortalidade infantil. A região amazônica detém de 12% a 15% das reservas de água doce do planeta (1, 4 e 34). A bacia amazônica concentra de 72% a 73% do potencial hídrico nacional (1 e 6). Já o Estado de Rondônia, unidade da federação onde está localizado o município em que se realizou esta pesquisa, é responsável pelo escoamento de 2,67% da água doce escoada no Brasil.

A região mais árida do Brasil, o Nordeste, onde vivem cerca de 28% da população, possui somente 5% da água doce do País. A alta densidade populacional, a poluição e a agricultura, aliadas a visão de que a água é um recurso infinito, já provocam o aumento na escassez de água de qualidade em quantidade para as regiões Sul e Sudeste do país, onde vivem 60% da população (4).

O Brasil tem uma disponibilidade de 35 mil metros cúbicos de água *per capita* por ano, o que significa quase 17 vezes o que tem a Alemanha e quase 10 vezes a França, que é gasta de forma irresponsável, gerando crises de abastecimento em várias regiões do País. Até mesmo regiões metropolitanas cercadas por mananciais vêm sofrendo com a escassez de água, decorrente da diminuição da sua qualidade,

comprometida por desmatamentos, poluição e ocupação irregular. Cerca de 90% dos esgotos domésticos não tratados são lançados nos rios, os quais, degradam a qualidade das águas, que fluem por centenas de quilômetros rio abaixo (35).

Tabela 1 – Disponibilidade de água por habitante/região (1.000 m<sup>3</sup>)

Região	1950	1960	1970	1980	2000
África	20,6	16,5	12,7	9,4	5,1
Ásia	9,6	7,9	6,1	5,1	3,3
América Latina	105,0	80,2	61,7	48,8	28,3
Europa	5,9	5,4	4,9	4,4	4,1
América do Norte	37,2	30,2	25,2	21,3	17,5
Total	178,3	140,2	110,6	89,0	58,3

Fonte: (6)

A Tabela 2 apresenta as demandas hídricas das regiões brasileiras

Tabela 2 – Demandas hídricas no Brasil

Unidade/Região	Demanda Urbana (km <sup>3</sup> /ano)	Demanda Irrigação (km <sup>3</sup> /ano)	Demanda Industrial (km <sup>3</sup> /ano)
Norte	0,36	0,06	0,10
Nordeste	2,06	3,91	0,55
Sudeste	5,17	4,29	5,56
Sul	1,74	7,25	1,45
Centro-Oeste	0,59	0,45	0,14
Brasil	9,92	15,96	7,8
Rondônia	0,03	0,00	0,01

Fonte: (6)

O Brasil ostenta, desde a constituição federal de 1988, pelo menos um arcabouço legal-institucional dos mais avançados do mundo (35). Além disso, o país tem a lei federal n. 9433/97, os planos estaduais de recursos hídricos, as suas leis correlatas e a lei federal n. 9984/00 que criou a Agência Nacional das Águas (ANA).

O texto da lei Federal n. 9433/97 proclama, com clareza, os cinco princípios básicos praticados hoje em todos os países que avançaram na gestão de seus recursos hídricos:

- Adoção da bacia hidrográfica como unidade de planejamento;
- Usos múltiplos da água, quebrando a hegemonia do setor hidrelétrico sobre os demais;
- Reconhecimento da água como um bem finito e vulnerável;

- Reconhecimento do valor econômico da água;
- Gestão descentralizada e participativa.

E é justamente sobre o princípio do “*Reconhecimento da água como um bem finito e vulnerável*” que está pautada a proposta do trabalho que adiante se apresenta, e, de forma mais precisa ainda, em sua “*vulnerabilidade*”.

### **2.1.3 Qualidade da Água e Saúde**

A qualidade da água se tornou uma questão de interesse para a saúde pública no final do século XIX, início do século XX. Anteriormente, a qualidade era associada apenas a aspectos estéticos e sensoriais, tais como a cor, o gosto e o odor. Métodos para melhorar o aspecto estético e sensorial da água já foram encontrados há 4000 anos a.C. em documentos escritos em sânscrito. Entretanto, na Grécia antiga, utilizava-se técnicas como a filtração, a exposição ao sol e a fervura para melhorar a qualidade da água. Mesmo que motivados mais pela aparência turva que a água apresentava, os gregos apontavam empiricamente para a existência de relações causais entre água e enfermidades (43).

O propósito primário para exigência de qualidade da água é a proteção à saúde pública. Os critérios adotados para assegurar essa qualidade têm por objetivo fornecer uma base para o desenvolvimento de ações que, se propriamente implementadas junto à população, garantirão a segurança do fornecimento de água através da eliminação ou redução da concentração aceitável de constituintes na água conhecidos por serem perigosos à saúde (44).

A água e a saúde das populações são duas coisas inseparáveis. A disponibilidade de água de qualidade é uma condição indispensável para a própria vida e mais que qualquer outro fator, a qualidade da água condiciona a qualidade de vida. Portanto, o entendimento de como a água e saúde estão relacionadas permitirá a tomada de decisões com mais efetividade e impacto (45).

A proteção de contaminações no fornecimento de água é a primeira linha de defesa à manutenção da vida. Quase invariavelmente o melhor método de

assegurar água adequada para o consumo consiste em formas de proteção, evitando-se contaminações por dejetos animais e humanos (44).

Spanos (47) destaca que, tendo em vista a importância da água para a saúde pública, é necessário estabelecer vários padrões de qualidade da água para consumo humano que devem ser obedecidos. Estudos criteriosos sobre a qualidade da água destinados ao consumo humano podem contribuir significativamente para a criação de uma estratégia comum para avaliação da água potável. Os programas e ações para controle de qualidade da água devem observar os limites estabelecidos e toleráveis para os parâmetros físicos, químicos e biológicos, presentes na água destinada ao consumo humano e os correspondentes aos diferentes usos da água.

Um estudo conduzido por Yassin (46), Faixa de Gaza, objetivando avaliar a qualidade microbiológica da água e sua relação com a saúde humana revelou a existência de uma forte correlação entre os elevados níveis de presença de coliformes fecais na água e a prevalência de giardíase e as doenças diarréicas na população abastecida.

Para que um processo de acompanhamento regular da qualidade da água para o consumo humano seja utilizado, grandes conjuntos de dados devem ser coletados. Os conjuntos de dados contêm informações ricas sobre o comportamento da qualidade da água analisada. A classificação, a modelagem e a interpretação dos dados de acompanhamento constituem um passo muito importante para a avaliação completa da qualidade da água destinada ao consumo humano (47).

Embora a qualidade da água possa ser comprometida em qualquer componente do sistema de tratamento e de abastecimento, a falha na distribuição pode ser extremamente crítica, pois é o ponto mais próximo da entrega e, com a rara exceção da existência de um dispositivo de filtragem em nível do consumidor, não há praticamente barreiras de segurança antes do consumo (48).

Nos países em desenvolvimento, como o Brasil, em virtude das precárias condições de saneamento e da má qualidade das águas, as doenças diarréicas de

veiculação hídrica, como, febre tifóide, salmonelose, shigelose e outras gastroenterites, poliomielite, hepatite A, verminoses, amebíase e giardíase, tem sido responsáveis por vários surtos epidêmicos e pelas elevadas taxas de mortalidade infantil, relacionadas a água de consumo humano (Leser *et al.*, 1985, *apud* (49)).

A avaliação do Programa das Nações Unidas para o Meio Ambiente identifica 80 países com sérias dificuldades para manter a disponibilidade de água. Esses 80 países representam 40% da população mundial. Mais de 1 bilhão de pessoas tem problemas de acesso à água potável; 2,4 bilhões não têm acesso a saneamento básico. A falta de acesso à água de boa qualidade e ao saneamento resulta em centenas de milhões de casos de doenças de veiculação hídrica e mais de 5 milhões de mortes a cada ano. Para Borsoi (1), este número é ainda maior, ficando entre 8 e 11 milhões de mortes anuais. Estima-se que entre 10.000 e 20.000 crianças morrem, todos os dias, vítimas de doenças de veiculação hídrica.

Nos países em desenvolvimento, a água poluída é responsável por 80% das doenças e 33% das mortes. A poluição da água atinge particularmente as crianças, sendo a causa de grande parte da mortalidade infantil. Cerca de 1,2 bilhão de pessoas sofrem de doenças causadas pela água poluída ou transmitidas por saneamento inadequado. Na América Latina, quase 30% da população vive sem acesso a fontes seguras de água (39).

Na classificação ambiental das infecções relacionadas a água, destacam-se pelo menos quatro categorias (7):

- a. aquelas de transmissão hídrica ou relacionadas com a higiene, da categoria feco-oral, onde podemos assinalar as diarréias, febres entéricas, poliomielite, hepatite A, leptospirose, ascaridíase e tricuriase;
- b. a transmissão relacionada com a higiene propriamente dita, como as infecções dos olhos e pele;
- c. aquela baseada na água, quando o organismo patogênico desenvolve parte do seu ciclo vital em um animal aquático, como no caso da esquistossomose, por exemplo; e
- d. a transmissão por um inseto vetor que procria na água ou cuja picada

ocorre próxima a ela – nesta categoria, destacam-se a malária, a filariose e as arboviroses (dengue e febre amarela).

A qualidade da água, por si só, tem uma grande influência sobre a saúde. Se não for adequada, pode ocasionar surtos de doenças e causar sérias epidemias. Os riscos à saúde, associados à água, podem ser de curto prazo (quando resultam da poluição de água causada por elementos microbiológicos ou químicos) ou de médio e longo prazos (quando resultam do consumo regular e contínuo, durante meses ou anos, de água contaminada com produtos químicos, como certos metais ou pesticidas).

Independentemente do imenso sofrimento que representa o não-acesso a fontes seguras de água, o custo de se garantir água limpa para todos é incomparavelmente menor do que os custos adicionais que resultam das doenças, sem falar da imensa perda da capacidade de trabalho e do impacto sobre a produtividade social (39).

#### 2.1.3.1 Patógenos de Grande Veiculação Hídrica no Brasil

Ao serem despejados em rios, lagos, represas e tanques, muitos desses patógenos apresentam persistência que dependem da concentração de matéria orgânica e dependem da capacidade de autodepuração do sistema aquático, podendo persistir nos sistemas aquáticos por horas, dias, semanas ou meses, dependendo destes fatores. As doenças de veiculação hídrica de maior incidência em nosso continente são diarreia, ascaridíase, triquiurase e malária. No Brasil, 27% dos municípios têm problemas de poluição e de contaminação nos pontos de captação de mananciais/nascentes superficiais e 7,2% do volume de água distribuído não recebem nenhum tipo de tratamento (50).

Dados da Fundação Nacional de Saúde – FUNASA (51) mostram a hospitalização por doenças relacionadas com o saneamento ambiental inadequado por região geográfica, entre 1995-2002: a região sudeste apresentou 1,58 internações/1000 habitantes; a região sul, 2,73 internações/1000 habitantes a região

centro-oeste 3,62 internações/1000 habitantes; a nordeste 6,26 internações/1000 habitantes e a região norte 7,35 internações/1000 habitantes.

No Brasil, verifica-se que 25% dos municípios, com rede de abastecimento de água, convivem com racionamento e intermitência no abastecimento de água. Onze capitais têm este mesmo problema, especialmente no nordeste e sudeste. As causas são escassez de fontes de água e condições físicas do sistema (52).

A malária, também de veiculação hídrica, é uma doença endêmica da região norte, que compreende 40% do território nacional; atinge 20 milhões de pessoas em 800 municípios e a média anual de casos é de 350 mil (51).

#### **2.1.4 Águas Subterrâneas**

Água subterrânea é toda a água que ocorre abaixo da superfície da Terra, preenchendo os poros ou vazios intergranulares das rochas sedimentares, ou as fraturas, falhas e fissuras das rochas compactas. Desempenham um papel essencial na manutenção da umidade do solo, do fluxo dos rios, lagos e brejos, sendo aproximadamente 100 vezes mais abundantes que as águas superficiais dos rios e lagos (53).

Ao contrário do que muitos supõem, não existem rios subterrâneos, a não ser em cavernas calcárias. Os termos lençol subterrâneo e lençol freático referem-se a terra encharcada de água como um esponja e, não a água circulando livremente em regiões ocas do subsolo, o que é um conceito medieval (54).

Durante o percurso no qual a água percola entre os poros do subsolo e das rochas, ocorre a depuração da mesma através de uma série de processos físico-químicos (troca iônica, declínio radioativo, remoção de sólidos em suspensão, neutralização de pH em meio poroso, entre outros) e bacteriológicos (eliminação de microorganismos devido à ausência de nutrientes e oxigênio que os viabilizem) que agindo sobre a água, modificam as suas características adquiridas anteriormente, tornando-a particularmente mais adequada ao consumo humano (55).

A utilização de águas subterrâneas é ainda relativamente modesta quando comparada a outros países. De acordo com Borsoi (1), são perfurados no Brasil, de 8 a 10 mil poços por ano. Em países como a Arábia Saudita, a Dinamarca e Malta, as águas subterrâneas são o único recurso hídrico disponível. Em outros, como a Áustria, Alemanha, Bélgica, França, Hungria, Itália, Holanda, Marrocos, Rússia e Suíça, mais de 70% da demanda são atendidos por mananciais subterrâneos.

No Brasil o aquífero subterrâneo abastece 19% do total de domicílios, e, destes, 68,78% estão localizados na área rural. O Estado de São Paulo é o maior usuário de águas subterrâneas do Brasil (36), tendo cerca de 65% de seus núcleos urbanos e, aproximadamente, 90% das indústrias abastecidas, parcial ou totalmente por poços (56).

#### 2.1.4.1 Aquífero Guarani

O Aquífero Guarani é a maior reserva de água doce subterrânea do mundo. Está localizado na região centro-leste da América do Sul e ocupa uma área de 1,2 milhões de km<sup>2</sup>, estendendo-se pelo Brasil (840.000 km<sup>2</sup>), Paraguai (58.500 km<sup>2</sup>), Uruguai (58.500 km<sup>2</sup>) e Argentina (255.000 km<sup>2</sup>) (57).

A qualidade da água e a possibilidade de captação nos próprios locais onde ocorrem as demandas fazem com que o aproveitamento das águas do aquífero Guarani assumam características econômicas, sociais e políticas destacadas para abastecimento da população (55).

A combinação dos aspectos da água ser, em regra geral, de boa qualidade, com o fato de o aquífero apresentar boa proteção contra os agentes de poluição que afetam rapidamente as águas dos rios e outros mananciais de água de superfície, aliado ao fato de haver uma possibilidade de captação nos locais onde ocorrem as demandas e serem grandes as suas reservas de água, faz com que o Aquífero Guarani seja o manancial mais econômico, social e flexível para abastecimento do consumo humano na área em que se localiza.

Sua recarga natural anual (principalmente pelas chuvas) é de 160 km<sup>3</sup>/ano, sendo que desta, 40 km<sup>3</sup>/ano constitui o potencial explotável sem riscos para o sistema aquífero (57).

### 2.1.5 Recursos hídricos de Pimenta Bueno – RO

O Município de Pimenta Bueno está contemplado com uma potencial rede hidrográfica, suportada por importantes e volumosos rios. Tal Município tem seu espaço geográfico cortado longitudinalmente pelos rios: Machado ou Ji-Paraná, *Roosevelt*, Pimenta Bueno ou Apediá e, Comemoração ou Barão de Melgaço. Da junção destes dois últimos, onde está situada a sede do Município, nasce o Rio Machado. Seu curso tem uma extensão de 800 quilômetros, atravessando a região central do Estado.

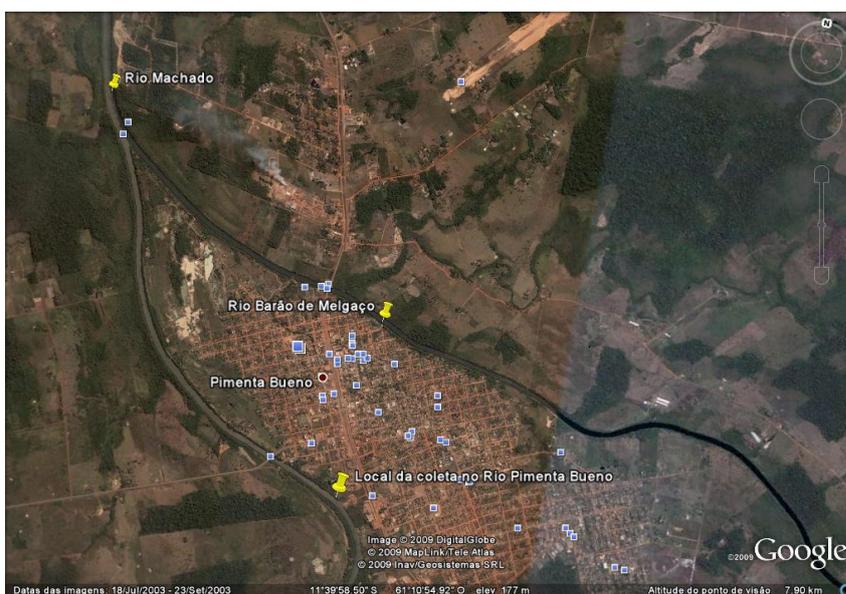


Figura 2 – Local da coleta no rio Pimenta Bueno (58)

Neste município, a água destinada ao consumo humano é quase que em sua totalidade captada de recursos superficiais e o desenvolvimento do município, aliado ao consumo de forma insustentável, vem acarretando um crescente comprometimento de tais recursos.

## 2.2 A LÓGICA FUZZY

Aristóteles, filósofo grego (384-322 a.C.), foi o fundador da ciência da lógica e estabeleceu um conjunto de regras rígidas para que conclusões pudessem ser

aceitas, logicamente válidas (10). O emprego da lógica de Aristóteles levava a uma linha de raciocínio lógico baseado em premissas e conclusões. Desde então, a lógica ocidental, assim chamada, tem sido binária, isto é, uma declaração é falsa ou verdadeira, não podendo ser ao mesmo tempo parcialmente verdadeira e parcialmente falsa.

O conceito de dualidade, estabelecendo que algo pode e deve coexistir com o seu oposto, faz a lógica *fuzzy* parecer natural, até mesmo inevitável. A lógica de Aristóteles trata com valores "verdade" das afirmações, classificando-as como verdadeiras ou falsas. Não obstante, muitas das experiências humanas não podem ser classificadas simplesmente como verdadeiras ou falsas, sim ou não, branco ou preto. Um sim ou um não como resposta a estas questões é, na maioria das vezes, incompleto. Neste contexto, emerge a lógica difusa, permitindo a possibilidade de teoricamente as proposições não necessariamente serem "pretas ou brancas", pois muitas vezes enxerga-se em graus de "cinza".

Na verdade, entre a certeza de ser e a certeza de não ser, existem infinitos graus de incerteza. Esta imperfeição intrínseca à informação representada numa linguagem natural foi tratada matematicamente, no passado, com o uso da teoria das probabilidades (10).

Os seres humanos tomam decisões considerando não valores exatos, mas sim utilizando uma lógica que leva em conta um certo "grau de pertinência" das variáveis envolvidas no processo decisório. Não se liga, por exemplo, o ar condicionado em 27°C, às 09h57min, e umidade relativa do ar em 77%, mas sim, quando está "quente", no "começo da manhã" e quando o ar está "abafado". Estas variáveis linguísticas podem ser melhor descritas e manipuladas num conjunto *fuzzy*. A Lógica *fuzzy* é assim, uma generalização da lógica clássica que permite incluir a imprecisão nos processos decisórios, permitindo criar sistemas especialistas utilizando variáveis linguísticas para criar uma base de regras. Expressões linguísticas são típicas da natureza humana de tomar decisões. Por exemplo: "Se estiver *quente* vou ligar o ar condicionado no *máximo*". *Quente* e *máximo* não significam um valor particular de temperatura e potência, mas podem assumir uma

faixa considerável de valores. Pessoas diferentes também podem ter diferentes acepções para o mesmo conceito linguístico (59).

A teoria *fuzzy* foi apresentada em 1964 por Lotfi A. Zadeh, professor no departamento de engenharia elétrica e ciências da computação da Universidade da Califórnia, em Berkeley, quando ele trabalhava com problemas de classificações de conjuntos que não possuíam fronteiras bem definidas (ou seja, a transição entre os conjuntos é suave e não abrupta). É importante, porém, ressaltar, que no decurso da ciência outros pesquisadores demonstraram seu desconforto com relação à lógica binária, relatando sua fragilidade para lidar com situações mais realistas (10, 11, 59 e 60). A tradução do termo *fuzzy* é dada por difuso, nebuloso.

No entendimento de Lermontov (29), duas razões motivaram o desenvolvimento da lógica nebulosa. Primeiro, a lógica nebulosa aponta para um alívio nas dificuldades do desenvolvimento e análise de sistemas complexos encontrados nas ferramentas matemáticas convencionais. Segundo, é motivada pela observação do raciocínio humano em utilizar conceitos e conhecimentos desprovidos de fronteiras bem definidas como, por exemplo, conceitos vagos. A primeira motivação está diretamente relacionada com a solução dos problemas do mundo real, enquanto a segunda está relacionada com a Inteligência Artificial. A conjunção destas motivações não só torna a lógica nebulosa única e diferente de outras metodologias, como forma uma ponte natural entre o mundo quantitativo e o qualitativo.

A força da lógica *fuzzy* deriva da sua habilidade em inferir conclusões e gerar respostas baseadas em informações vagas, ambíguas e qualitativamente incompletas e imprecisas. Neste aspecto, os sistemas de base *fuzzy* têm habilidade de raciocinar de forma semelhante à dos humanos. Seu comportamento é representado de maneira simples e natural, levando à construção de sistemas compreensíveis e de fácil manutenção.

Em áreas onde é necessário lidar com a imprecisão, como a engenharia, a química e com a subjetividade e o desconhecimento, como a biologia, a medicina, a

epidemiologia, a psicologia, as ciências sociais, a educação e a saúde pública, a teoria dos conjuntos *fuzzy*, tem demonstrado grande capacidade de aplicação, ajudando os profissionais a produzir modelos mais de acordo com a suas necessidades e realidades, sendo que esta teoria enfrentou forte resistência por parte da comunidade científica no seu início, entretanto, a despeito de todo preconceito, muitos pesquisadores vislumbraram as possibilidades que esta teoria oferecia e, trabalhos surgiram em todo o mundo, particularmente no Japão onde a lógica *fuzzy* encontrou um solo fértil para desenvolver-se rapidamente (60).

A lógica *fuzzy* é uma generalização da teoria dos conjuntos tradicionais para resolver os paradoxos gerados a partir da classificação “verdadeiro ou falso” da Lógica Clássica. Tradicionalmente, uma proposição lógica tem dois extremos: ou “completamente verdadeiro” ou “completamente falso”. Entretanto, na lógica *fuzzy*, uma premissa varia em grau de verdade entre 0 e 1 inclusive, o que leva a ser parcialmente verdadeira ou parcialmente falsa.

Com a incorporação do conceito de “grau de verdade”, a teoria dos conjuntos *fuzzy* estende a teoria dos conjuntos tradicionais. Os grupos são rotulados qualitativamente (usando termos linguísticos, tais como: *alto*, *morno*, *ativo*, *pequeno*, *perto*, etc.) e os elementos destes conjuntos são caracterizados variando o grau de pertinência (valor que indica o grau em que um elemento pertence a um conjunto). Por exemplo, um homem de 1,80 metros e um homem de 1,75 metros são membros do conjunto “*alto*”, embora o homem de 1,80 metros tenha um grau de pertinência maior a este conjunto.

A lógica *fuzzy* pode ser considerada uma das mais poderosas ferramentas para lidar com imprecisão, incertezas e verdade parcial com o objetivo de tratabilidade, robustez e baixo custo de soluções para os problemas do mundo real. Além disso, os modelos híbridos que combinam a lógica *fuzzy*, neural, redes e processamento distribuído tem um enorme potencial de aplicações práticas (61).

Os conjuntos *fuzzy* são conjuntos que não possuem fronteiras bem definidas e que foram introduzidos devido ao fato dos conjuntos clássicos apresentarem

limitações para lidar com problemas onde as transições de uma classe para outra acontecem de forma suave. Sua definição, propriedades e operações são obtidas da generalização da teoria de conjuntos clássicos, recaindo esta em um caso particular da teoria de conjuntos *fuzzy*. A teoria de conjuntos clássicos está baseada na função característica clássica, dada por:

$$U_{(A)}x = \begin{cases} 1 & \text{se e somente se } x \in A \\ 0 & \text{se e somente se } x \notin A \end{cases}$$

onde  $U$  é o conjunto Universo,  $A$  é um subconjunto de  $U$  e  $x$  é um elemento de  $U$ , ou seja, a função característica é um mapeamento do conjunto universo no conjunto  $\{0, 1\}$ . Essa função característica discrimina entre todos os elementos de  $U$  aqueles que, segundo algum critério, pertencem ou não ao subconjunto  $A$ , dividindo o conjunto universo em duas partes com fronteiras bem definidas.

Para obtenção dos conjuntos *fuzzy* e suas operações, basta generalizar a função característica da lógica clássica para o intervalo  $[0, 1]$ , ou seja,  $\mu_A(x) : U \rightarrow [0, 1]$ , o que implica em considerarmos um contínuo de valores de pertinência e não apenas pertence e não-pertence. O elemento  $x$  pertencerá ao subconjunto  $A$  com um grau de pertinência que é um valor no intervalo  $[0, 1]$ .

Em última análise, um conjunto *fuzzy* é caracterizado por uma função de pertinência, e o grau de pertinência pode ser considerado como uma medida que expressa a possibilidade de que um dado elemento seja membro de um conjunto *fuzzy* (60).

A lógica *fuzzy* pode ser vista como uma linguagem que permite uma tradução sofisticada das declarações da linguagem natural em um formalismo matemático podendo lidar com muitos dados, variáveis, termos linguísticos, dados vagos e incertos e, portanto, tem a capacidade de permitir por meio de uma lógica, obter informação confiável e transparente ao tratar dados relacionados a aplicações ambientais.

Um conjunto *fuzzy* é composto de elementos que têm diferentes graus de participação nos diversos conjuntos. Esta idéia está em contraste com a teoria clássica dos conjuntos, porque para os conjuntos *crisp* um elemento ou é um membro desse conjunto ou não é (62).

Para Massad (61), entre as várias mudanças paradigmáticas na ciência matemática no presente século, uma das principais alterações diz respeito ao conceito de incerteza. De acordo com visão tradicional, a ciência deve se esforçar para ter segurança em todas as suas manifestações (precisão, especificidade, nitidez, coerência, etc.), ou seja, a incerteza, a imprecisão (e não-especificidade, inconsistência, incoerência, etc.) é considerada como não-científico. De acordo com a visão alternativa, a incerteza é considerada essencial para a ciência.

### 2.2.1 Lógica Clássica *versus* Lógica *Fuzzy*

A lógica *fuzzy* incorpora regras simples baseadas em: se  $X$  e  $Y$  então  $Z$ , utilizados para resolver um problema de controle, em vez da tentativa de modelar um sistema matematicamente.

Para representar apropriadamente o conhecimento do mundo com algum formalismo, é necessário poder expressar não somente proposições verdadeiras - V ou falsas - F, mas também expressar ou descrever objetos e generalizações sobre classes de objetos. A lógica clássica satisfaz esses objetivos. A maior vantagem dessa forma de representação é a facilidade de manipular e deduzir novos fatos a partir de fatos já conhecidos. A maior desvantagem dessa representação é a dificuldade para determinar quais fatos podem ser relevantes durante um processo ou não (63).

A dificuldade de ser encontrada uma regra decisória na abordagem implicitamente estocástica determina que num terceiro momento haja uma análise e “sintonia fina” da regra preliminarmente obtida por simulação. Neste caso, um modelo de simulação é desenvolvido para testar a regra decisória. De forma interativa ela é ajustada até que sejam melhorados os resultados (64).

A teoria dos conjuntos difusos surgiu para modelar imprecisões do raciocínio humano implementando classes ou grupos de dados com limites que são marcadamente definidos. Qualquer metodologia ou teoria de implementação de definição “*crisp*” assim como teoria de conjuntos clássicos, aritméticos e programação podem ser *fuzzificados* através da generalização de conceitos de conjuntos *crisp* para conjuntos difusos com limites nebulosos (63).

A abordagem *fuzzy* apresenta as seguintes vantagens em relação à abordagem clássica: a naturalidade de sua abordagem a torna conceitualmente fácil de entender; sua flexibilidade; sua tolerância com dados imprecisos; a possibilidade de modelar as funções não-lineares; pode ser construída com base na experiência de especialistas; pode ser integrada às técnicas convencionais de controle; em muitos casos, simplifica ou amplia as possibilidades e recursos dos métodos convencionais de controle e; é baseada na linguagem natural, base da comunicação humana.

A modelagem *fuzzy* tem sido bastante empregada em vários campos de pesquisa, por ser capaz de modelar e descrever processos reais desconhecidos, com características não lineares e variáveis no tempo (65).

Um benefício significativo dos modelamentos baseados em lógica *fuzzy* é a habilidade de codificação de conhecimentos inexatos, numa forma que se aproxima muito aos processos de decisão. Os sistemas de inferências baseados em lógica *fuzzy* possibilitam, assim, a captura do conhecimento próximo ao “modelo cognitivo” utilizado na análise de problemas. Isto significa que o processo de aquisição do conhecimento é mais fácil, mais confiável e menos sujeito a erros não identificados (66).

### **2.2.2 Aplicações da Lógica *Fuzzy***

Ao longo dos últimos 30 anos, o desenvolvimento de inúmeros métodos matemáticos e conceitos têm ajudado a dar o salto quântico em termos da aplicação prática da lógica *fuzzy*, sendo notadamente suas maiores aplicações na concepção de controladores de processos industriais complexos (61).

Segundo Martins (67) os japoneses foram os pioneiros no uso da lógica *fuzzy*, e adquiriram grande conhecimento de sua utilização e o aplicam com frequência, aperfeiçoando aparelhos como aspiradores de pó, que usam controladores *fuzzy* nos sensores de pó, ajustando o poder de sucção por meio de complexos mecanismos. Nas câmeras fotográficas inteligentes, também há dispositivos que medem a claridade das imagens em seis regiões do campo de visão, e essas informações determinam o foco, rastreiam a taxa de mudança no movimento da lente, procurando o melhor foco. Outro exemplo são as máquinas de lavar *Hitachi*, que usam controladores *fuzzy* para a verificação de peso, do tipo de tecido, de sujeira, e automaticamente adapta os ciclos de lavagem para o uso otimizado de potência, água e detergente.

O sistema *fuzzy* não é utilizado apenas para facilitar o dia-a-dia, mas também para diminuir gastos nas execuções de tarefas, como no caso do ar-condicionado industrial projetado pela empresa *Mitsubishi*, o qual usa vinte e cinco regras de aquecimento e vinte e cinco regras de refrigeração. Comparado com outros tipos de ar-condicionado, o controlador *fuzzy* aquece e esfria cinco vezes mais rápido, reduz o consumo de potência, além de manter a temperatura duas vezes mais estável, usando sensores menores. A implementação da lógica vem crescendo a cada dia, nas diversas áreas, e várias empresas aplicam a lógica nebulosa no reconhecimento de caracteres (*scanners*); na indústria automotiva, destacam-se nas transmissões automáticas (*Nissam, Lexus*), na injeção eletrônica, na suspensão ativa, nos freios antibloqueantes (*ABS*). Sistemas industriais incluem controle de grupo de elevadores (*Hitachi, Toshiba*), veículos autoguiados e robôs móveis (*Nasa, IBM*), ventilação de túneis urbanos (*Toshiba*), controle de tráfego urbano (*Sendai*).

Existem várias empresas (*Siemens, Daimler-Benz, Klockner-Moeller, SGS-Thomson, General Motors, Motorola, Hewlett-Packard, etc.*) que possuem laboratórios de pesquisa em lógica *fuzzy* para desenvolvimento de seus produtos (60). No Brasil, algumas indústrias e empresas vêm desenvolvendo produtos e serviços, como *Otis* (com elevadores inteligentes), *Villares* (peças para guindastes e empilhadeiras), *IBM* (na área de computação), *Yokogawa* (com medidores de umidade) e *Robertshaw* (controles eletromecânicos, termostatos, *timers*) (66).

As aplicações da lógica *fuzzy* são ainda incipientes, ou insuficientemente desenvolvidas apesar de todo seu potencial de aplicação. Para Massad (61), somente uma abordagem interdisciplinar poderá orientar e motivar os profissionais de diferentes áreas para comporem equipes a fim de contornarem as dificuldades matemáticas que ainda limitam as aplicações de lógica *fuzzy*. Embora o consenso sobre a necessidade de técnicas de representação de incerteza, o debate sobre a metodologia mais adequada ainda está longe de ser encerrado.

### 2.2.3 Os Sistemas Baseados em Lógica *Fuzzy*

Os sistemas *fuzzy* podem produzir estimativas de um sistema não linear complexo sem recorrer a modelos matemáticos. Nesse escopo, a metodologia *fuzzy* é um método de estimativa de entrada e saída livre de modelos matemáticos. A lógica de tomada de decisões, incorporada na estrutura de inferência da base de regras, usa implicações *fuzzy* para simular tomada de decisão humana.

Os sistemas *fuzzy* são, via de regra, o resultado de uma generalização dos sistemas clássicos, ou seja, nessa abordagem os conceitos nebulosos são incorporados a esses sistemas. Os sistemas difusos estimam funções com descrição parcial do comportamento do sistema, onde especialistas podem prover o conhecimento heurístico, ou esse conhecimento pode ser inferido a partir de dados de entrada-saída do sistema. Desta forma, pode-se dizer que os sistemas difusos são sistemas baseados em regras que utilizam variáveis linguísticas difusas para executar um processo de tomada de decisão (63).

O conhecimento não é um valor ou conceito preciso, exato, ele pode refletir ao mesmo tempo o quanto se sabe e o quanto não se sabe, sem que ambos sejam complementares. Quanto maior o número de informações com qualidade, mais certo e preciso ele é, contudo, a expressar um desconhecimento ou incerteza.

A Figura 3 apresenta um modelo esquemático da máquina de inferência *fuzzy*.

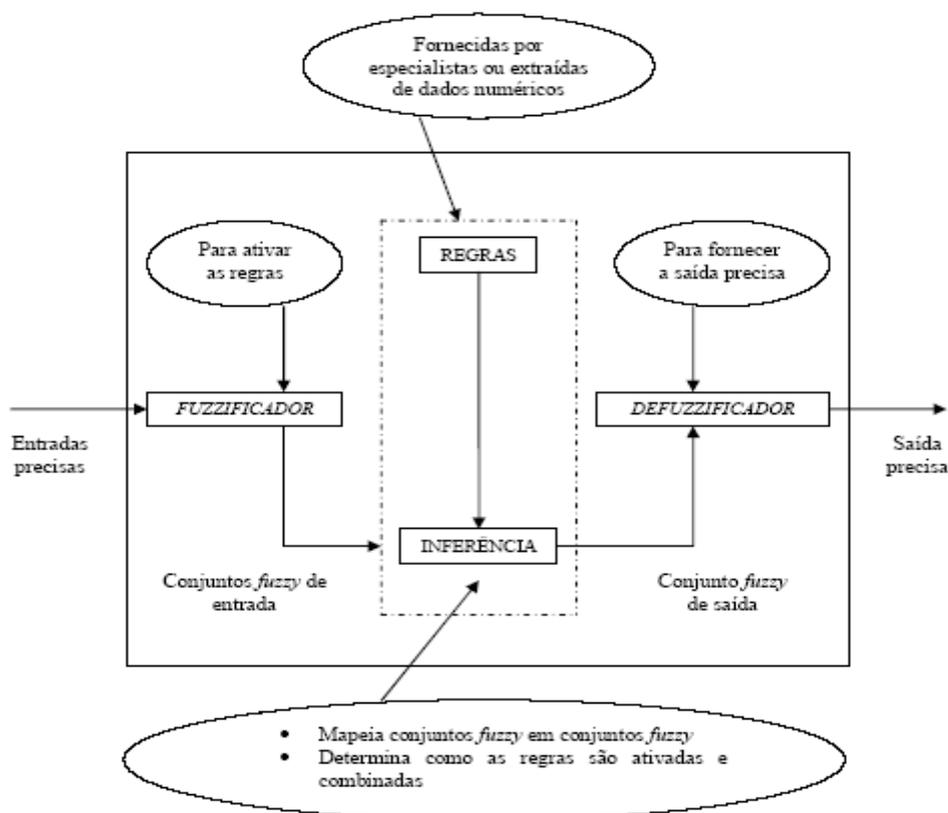


Figura 3 – A máquina de inferência *fuzzy* (60)

Um modelo linguístico *fuzzy* é um sistema baseado em regras que usa a teoria de conjuntos *fuzzy* para lidar com um fenômeno particular (68). Em geral, um sistema *fuzzy* faz corresponder a cada entrada *fuzzy* uma saída *fuzzy*. Espera-se que a cada entrada (um número real, ou par de números reais, ou n-upla de números reais) faça corresponder uma saída. Neste caso, um sistema *fuzzy* é uma função de  $\mathbb{R}^n$  em  $\mathbb{R}$ , construída de alguma maneira específica. A estrutura básica de um sistema *fuzzy* inclui quatro componentes (ou módulos) principais: um *fuzzificador*; um mecanismo de inferência; uma base de regras e um *defuzzificador*.

### 2.2.3.1 Módulo de *Fuzzificação*

O módulo *fuzzificador* é número clássico valorado, que se traduz por entradas em valores *fuzzy*. É ele quem modela matematicamente a informação das variáveis de entrada por meio de conjuntos *fuzzy*. É neste módulo que se mostra a grande importância do especialista no processo a ser analisado, pois a cada variável de

entrada devem ser atribuídos termos linguísticos que representam os estados desta variável e, a cada termo linguístico, deve ser associado um conjunto *fuzzy* por uma função de pertinência.

A *fuzzificação* é o processo de associar ou calcular um valor para representar um grau de pertinência da entrada em um ou mais grupos qualitativos, chamados de conjuntos difusos. O grau de pertinência é determinado por uma função de pertinência que foi definida com base na experiência ou intuição. Funções de pertinência são o meio pelo qual um controlador é sintonizado para alcançar respostas desejadas a determinadas entradas (69).

O processo de *fuzzificação* envolve a definição de entradas e saídas, bem como as respectivas funções de pertinência que transformam o valor numérico de uma variável em um grau de adesão a um conjunto difuso, que descreve uma propriedade da variável. Uma vez que nem todas as variáveis têm a mesma importância, é necessário estabelecer uma forma de orientar a influência de cada variável na pontuação final (8). Existem diferentes métodos de inferência *fuzzy* com diferentes propriedades.

### 2.2.3.2 Módulo da Base de Regras

Este módulo é o que constitui o núcleo do sistema e é nele onde “se guardam” as variáveis e suas classificações linguísticas; A regra *fuzzy* é uma unidade capaz de capturar algum conhecimento específico, e um conjunto de regras é capaz de descrever um sistema em suas várias possibilidades. Cada regra *fuzzy*, da mesma forma que uma afirmação clássica, é composta por uma parte antecedente (a parte Se) e uma parte consequente (a parte Então), resultando em uma estrutura do tipo Se {antecedentes} Então {consequentes}.

Os antecedentes descrevem uma condição (premissas), enquanto a parte consequente descreve uma conclusão ou uma ação que pode ser esboçada quando as premissas se verificam. A diferença entre os antecedentes de uma regra *fuzzy* e uma regra clássica é que os primeiros descrevem uma condição elástica, ou seja,

uma condição que pode ser parcialmente satisfeita, enquanto os últimos descrevem uma condição rígida (a regra não funciona se os antecedentes não são completamente satisfeitos).

A construção do módulo de regras inclui a aplicação de operações *fuzzy* para variáveis antecedentes, a definição dos métodos de implicação do antecedente para o consequente de cada regra e a utilização de um método de agregação para participar em todos os consequentes das regras (8).

#### 2.2.3.3 Módulo de Inferência

É um mecanismo de inferência, que aplica uma estrutura de raciocínio para obter uma saída *fuzzy*.

É neste módulo onde se define quais são os conectivos lógicos usados para estabelecer a relação *fuzzy* que modela a base de regras. É dele que depende o sucesso do sistema *fuzzy*, já que fornecerá a saída (controle) *fuzzy* a ser adotado pelo controlador a partir de cada entrada *fuzzy*. Uma vez construído o conjunto de regras *fuzzy* necessita-se de uma “máquina de inferência” para extrair dela a resposta final.

Existem vários métodos de inferência possíveis e a escolha por um deles depende do sistema que está sendo analisado. No entanto, a inferência mais comum, e amplamente utilizada no controle de sistemas, é o Método de *Mamdani*.

#### 2.2.3.4 Módulo de Defuzzificação

O resultado da operação de um sistema *fuzzy* é um conjunto *fuzzy* e, portanto, requer *defuzzificação* para chegar a um valor *crisp*, que é exigido pelo usuário não especialista (62). É neste módulo que a saída *fuzzy* é traduzida ou transformada em um valor *crisp*. A *defuzzificação* consiste em transformar a saída *fuzzy* em um valor numérico que pode ser usado em contextos não-*fuzzy* (8).

Na *defuzzificação*, o valor da variável linguística de saída, inferida pelas

regras *fuzzy*, é traduzida num valor real. O objetivo é obter um único número real que melhor represente os valores *fuzzy* inferidos da variável linguística de saída.

Três métodos de *defuzzificação* são predominantes na literatura sobre sistemas *fuzzy*: o Método do Centro de Área, o Método do Centro de Máxima e o Método da Média Máxima. O centro da área é um dos métodos mais utilizados para encontrar o número que melhor representa a saída *fuzzy*. Os outros dois métodos tendem a reforçar, no processo de *defuzzificação* a influência dos valores máximos. Em contraste, o método do Centro de Área considera a área sob o gráfico da função de pertinência e os resultados em um único valor que poderia ser interpretado como um valor esperado da variável em estudo.

A Figura 4 apresenta como se processam as informações em um sistema *fuzzy*, destacando-se que as entradas e saídas são valores *crisp*.

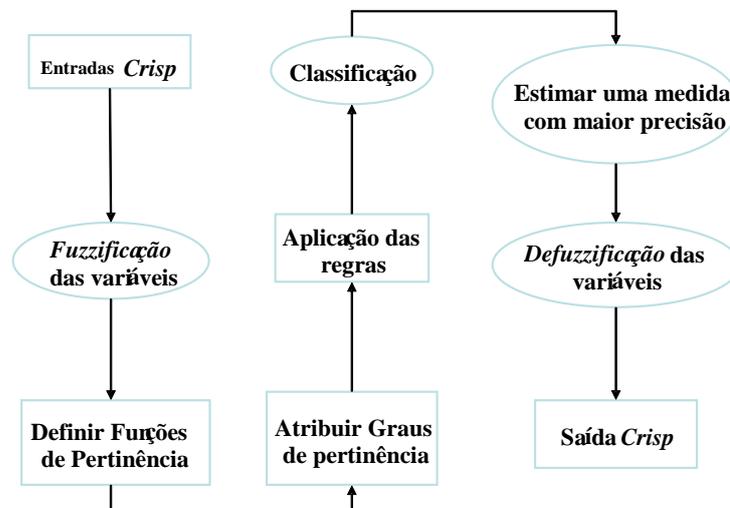


Figura 4 – Fluxograma dos sistemas *fuzzy* (63)

#### 2.2.4 Utilização dos Sistemas *Fuzzy* para Avaliação da Qualidade da Água

Nos sistemas de gestão de recursos de água, incertezas existem em grande número dos componentes do sistema, bem como em suas inter-relações. As incertezas estão frequentemente associadas à diversas complexidades em termos de qualidade da informação. As características aleatórias de processos naturais (por exemplo, precipitação e alterações climáticas) e condições de fluxo (por exemplo, a

entrada de fluxo de abastecimento de água, capacidade de armazenamento e qualidade do rio), os erros na estimativa da modelagem dos parâmetros (por exemplo, benefícios e parâmetros de custos), e da imprecisão dos objetivos do sistema e das restrições são todas as possíveis fontes de incertezas. Além disso, as incertezas podem existir em vários níveis: imprecisão e / ou imprecisões nos resultados de uma amostra aleatória e, aleatoriedade e / ou imprecisão na parte inferior e superior dos limites de um intervalo (70).

Em muitos problemas de gestão de recursos hídricos, alguns parâmetros podem apresentar simplesmente como intervalos, enquanto outros podem estar associados com a informação probabilística. Assim, se métodos individuais *fuzzy* ou estocásticos são empregadas em tais complexidades, a robustez dos resultados de otimização podem ser influenciados significativamente devido aos problemas de excesso de simplificação ou sobre-especificação de incertezas (70).

Muitas abordagens alternativas para controlar o padrão da qualidade das águas superficiais têm sido apresentadas. A maioria delas relaciona o efeito da incidência de resíduos para a qualidade da água e o custo do tratamento antes da sua eliminação no rio (71).

As observações dos parâmetros relacionados a qualidade da água têm pouco significado por si só. Um parâmetro de poluição, que tem um valor específico é geralmente significativo somente no contexto do conhecimento dos níveis dos demais parâmetros que definem a qualidade da água.

A deficiência mais crítica dos índices convencionais de qualidade da água é a incapacidade de lidar com a incerteza e a subjetividade presente no complexo problema ambiental. A necessidade de técnicas mais apropriadas para gerenciar a importância das variáveis de qualidade da água, a interpretação de limites aceitáveis para cada parâmetro, e o método utilizado para integrar diferentes parâmetros envolvidos na avaliação do processo é claramente reconhecida. Nesse sentido, algumas metodologias alternativas surgiram a partir da inteligência artificial. Estas metodologias, principalmente, a lógica *fuzzy* e conjuntos *fuzzy*, estão sendo testados

com problemas ambientais reais. O objetivo final é reduzir a incerteza e imprecisão nos critérios utilizados nos instrumentos decisórios (8).

No entendimento de Icajá (11), a lógica *fuzzy* pode ser aplicada para o desenvolvimento de índices ambientais de uma forma que resolve vários problemas comuns, incluindo a incompatibilidade das observações e da necessidade de juízos de valor implícito.

Já a classificação da qualidade da água de rios usando a teoria *fuzzy* começou na década de 1980. A maioria das pesquisas neste campo está centrada na avaliação sintética *fuzzy* e análise *fuzzy* de agrupamento. Avaliação sintética é usada para classificar as amostras dentro de um conhecido centro de classificação, já a análise de agrupamento é utilizado para classificar as amostras de acordo com seus relacionamentos quando este centro de classificação é desconhecido (72).

Bárdossy (1995) *apud* Lermontov (29), defende que os modelos baseados em regras nebulosas têm-se apresentado como instrumentos adequados para representar incertezas e imprecisões de conhecimento e de dados. Esses modelos podem representar aspectos qualitativos do conhecimento e dos processos de inferência humana, sem empregar análise quantitativa precisa. São, portanto, menos precisos do que os modelos numéricos convencionais. Entretanto, o ganho em simplicidade, velocidade computacional e flexibilidade que resultam do uso desses modelos, podem compensar uma possível perda de precisão.

O sucesso com o qual os sistemas baseados em regras nebulosas têm sido utilizados para modelar sistemas dinâmicos em outros campos da ciência e da engenharia sugere que esta abordagem possa mostrar-se um efetivo e eficiente caminho para modelar a criação de um IQA, principalmente, quando o conhecimento explícito dos subprocessos internos do processo de indexação não é requerido (29).

O conceito da teoria dos conjuntos nebulosos foi descrito por Chau *apud* Lermontov (29) como sendo útil na modelagem da qualidade das águas, uma vez que lida com uma aproximação alternativa em torno dos problemas em que os

objetivos e fronteiras não estão bem definidos ou são imprecisos.

Embora a análise de agrupamento *fuzzy* classifique amostras para os padrões desconhecidas pelo relacionamento, ela exige uma grande quantidade de dados. As amostras devem ter um alto grau de semelhança, além de categorizar fatores. Por sua vez a avaliação sintética *fuzzy* classifica amostras para os padrões conhecidos. É uma versão modificada e correta de avaliação sintética convencional, que contém defeitos criados pela lógica binária (72).

Num estudo realizado por Lu (72) definiu-se um conjunto de padrões do estado trófico dos reservatórios de água, e utilizou os padrões determinados pela avaliação sintética *fuzzy* para analisar e comparar a qualidade da água do Reservatório *Fei-Tsui*, situado no norte de Taiwan. Foram medidos e analisados um total de 18 itens diferentes, tais como temperatura, pH, oxigênio dissolvido, suspensão sólida, nitrato e nitrito, fósforo total, clorofila, a profundidade.

Os modelos de avaliação de qualidade da água foram usados extensivamente para apoio à gestão ambiental em bacias hidrográficas. Diversos modelos de qualidade da água foram desenvolvidos nas últimas décadas, e muitos esforços foram feitos para lidar com as incertezas e as não-linearidades na gestão da qualidade da água, através de programas de intervalo, estocástica e *fuzzy* (73).

Outra abordagem para a otimização da incerteza na gestão da qualidade da água é baseada no conjunto da teoria *fuzzy*. Este método facilita a análise de sistemas com incertezas provenientes da indefinição de seus componentes. É adequado para situações em que a incerteza não pode ser expressa como funções de densidade de probabilidade, de tal forma que a adoção das funções de pertinência *fuzzy* torna-se uma alternativa atraente (73).

Cada rio tem sua própria capacidade assimilativa da poluição, seja pela atividade biológica nele existente, seja pelas características físicas próprias de cada corpo d'água, ou seja, cada manancial hídrico tem uma capacidade de autodepuração diferente (74).

No seu estudo de Lee (74) objetivou encontrar a capacidade assimilativa máxima e o custo mínimo de tratamento da água de um manancial utilizando a lógica *fuzzy*, o que pôde ser realizado com sucesso por meio de um modelo *fuzzy* clássico da programação com objetivos múltiplos.

Os problemas de avaliação de qualidade da água, por apresentarem muitas incertezas e aleatoriedade, devem ser abordados em modelos de otimização *fuzzy*. Em situações práticas, diferentes normas para indicar a qualidade das águas superficiais são aplicadas. Por exemplo, as normas para o abastecimento público, usos industriais, agrícolas, a reprodução de peixes e vida selvagem podem ser todas diferentes para o mesmo indicador de qualidade da água. Isso resulta em uma incerteza na parte inferior e superior dos limites das funções de pertinência, levando a um segundo nível de imprecisão (75).

Para Zarghami (76), os problemas de decisão na gerência dos recursos hídricos geralmente são relacionados a critérios múltiplos, assim é necessário considerar implicações técnicas, ambientais, e sociais da água além dos critérios econômicos que assegurem decisões sustentáveis e resultados favoráveis do processo de decisão.

Iliev (77) construiu um sistema para testar continuamente amostras de certo tipo de elemento (por exemplo, água da torneira) e decidir se a qualidade deste elemento está dentro dos limites especificados. Concluiu-se daí que a qualidade pode variar dentro dos limites, ou seja, os resultados do sistema com entradas *crisp* não indicam necessariamente que a amostra pode ser definitivamente aprovada ou não. Com base nesta limitação dos sistemas com entradas *crisp*, agrupou as medições de acordo com suas semelhanças e definiu as propriedades do sistema. As amostras que claramente não pertenciam a nenhum dos dois conjuntos foram consideradas como "incertas".

Existem vários algoritmos de agrupamento conhecidos na literatura, que podem ser divididos com base no tipo de partição em rígidos ou difusos, no entanto, o sistema *fuzzy* é o que fornece a forma mais flexível de representar as relações

entre amostras e *clusters* (77).

Ao contrário dos extremos altamente valorizados pela Lógica *booleana*, a lógica *fuzzy* é multi-valorada, lidando com diferentes graus de adesão e diferentes graus de verdade (78).

Segundo Lermontov (12), os modelos mais utilizados para representar o processo de classificação das águas e organismos são chamados modelos conceituais determinísticos. Eles são deterministas porque ignoram as propriedades estocásticas do processo e, conceitual, porque tentam dar uma interpretação física aos sub-processos envolvidos. Modelos baseados em regras *fuzzy* são vistos como ferramentas adequadas para representar as incertezas e imprecisões no conhecimento de dados. Estes modelos podem representar os aspectos qualitativos do conhecimento e processos de inferência humana sem uma análise quantitativa precisa. Os sistemas, baseado em regras *fuzzy* são usados com sucesso para modelar sistemas dinâmicos diversos campos da ciência e da engenharia, decorrendo daí o entendimento de que esta abordagem pode tornar-se eficaz e eficiente para construir um IQA significativo.

Os sistemas *fuzzy* são caracterizados por serem conceitualmente fáceis de serem entendidos, e com base na linguagem natural, foram utilizados com sucesso no modelo de funções não-lineares, para construir sistemas de inferência e para lidar com dados imprecisos. Essas vantagens têm sido aplicadas para enfrentar os complexos problemas relacionados com a água do ambiente (8).

A gestão da qualidade da água está relacionado a muitos fatores tecnológicos, socioeconômicos e ambientais. Em um sistema tão complexo, a não-linearidades existente no ambiente econômico, as inter-relações e as incertezas diversas, expressas em intervalos com fronteiras *fuzzy* devem ser seriamente consideradas (79).

A principal vantagem da metodologia *fuzzy* é que o sistema de inferência é construído com palavras. Nenhuma equação é usada para representar o modelo de

inferência, que se caracteriza por ser altamente não-linear (8). Isto é especialmente importante em processos de gestão de decisão que envolva água, onde os indivíduos envolvidos quase sempre não possuem uma base matemática sólida.

A flexibilidade da lógica *fuzzy* para desenvolver modelos de classificação simplificados, construídos com a linguagem natural, deve ser recomendada no desenvolvimento de índices ambientais em que informações altamente subjetivas devem ser correlacionadas. A computação com palavras dentro do sistema de inferência *fuzzy* melhora a tolerância para os dados imprecisos (8).

Dentre as técnicas estatísticas, a análise de regressão é a mais frequentemente utilizada para a avaliação da qualidade da água, levando-se em consideração vários fatores relacionados, tais como tamanho da população, o preço da água, renda média, precipitação anual e demanda. No entanto, esta análise inclui também muito pressupostos rigorosos, como a distribuição normal, variância constante. Neste contexto, metodologias de avaliação baseadas na lógica *fuzzy*, que utilizam expressões linguísticas de incerteza, em vez de incluir critérios estatísticos probabilísticos, são ferramentas muito úteis para a tomada de decisão das autoridades (62).

A análise de componentes principais (PCA) é a ferramenta favorita para a realização da análise ambiental, para compressão de dados e para extração de informações, no entanto, a PCA, como com qualquer outro método de estatística multivariada, é pouco sensível a análise de poucos dados. Neste sentido, uma abordagem mais poderosa para melhorar os resultados da PCA parece ser a *fuzzificação* dos dados da matriz de análise (80).

Em seu trabalho, Sârbu (80), defendeu a aplicação de um algoritmo robusto PCA *fuzzy* (FPCA). A utilização deste novo algoritmo e de seu respectivo método de análise *fuzzy* foi ilustrada por meio de sua aplicação a um conjunto de dados de qualidade da água do rio Danúbio por um período de 11 anos consecutivos e a conclusão a que chegou foi que o método que incluía a lógica *fuzzy* (FPCA) obteve melhores resultados, principalmente por ser mais compressível do que o PCA

clássico. Esses fatos devem encorajar a aplicação de metodologia de análise *fuzzy* a outras situações, incentivando a "*fuzzificação*" de outros importantes métodos, tornando possível explicar algumas discrepâncias, encontrados na literatura, em termos de eficiência, de capacidade de ajuste, poder preditivo e robustez.

Sadiq (48) aplicou a metodologia de análise *fuzzy* para avaliar os riscos e identificar falhas numa rede de distribuição de água. Neste estudo, cada elemento de risco teve base numa estrutura hierárquica expressa por um número *fuzzy* triangular, que é derivado da composição do risco de falha de um evento e o fracasso consequente associado. Um processo de hierarquia analítica foi usado para estimar os pesos necessários para o agrupamento das fontes de risco.

Num problema típico da avaliação da qualidade da água surgem incertezas em decorrência da aleatoriedade própria das variáveis da natureza (vazão de efluentes, fluxo, temperatura, eutrofização, autodepuração, etc.). A aproximação probabilística e abordagem *fuzzy* são duas maneiras de tratar as incertezas. O primeiro tipo de incerteza decorre da aleatoriedade, advinda principalmente das variações dos parâmetros do modelo, o segundo tipo de incerteza deve-se às imprecisões, proveniente da definição incerta das normas e dos objetivos (75).

Karmakar (75) defende que, o conceito de conjuntos *fuzzy* é extensivamente utilizado em problemas de gestão da qualidade da água.

Os principais problemas relacionados às operações *booleanas* são os limiares nítidos e rígidos, que nem sempre representam os fenômenos naturais corretamente. Sabe-se que na natureza os fenômenos não são representados por limites estáticos ou rígidos. Partindo destas considerações, utilizou-se da inferência *fuzzy*, que tem como característica a indefinição de fronteiras ou limiares entre as classes.

No presente estudo os recursos da lógica *fuzzy* foram utilizados para desenvolver um IQA através da implementação de um modelo de inferência baseado no raciocínio difuso.

### 2.3 CARACTERÍSTICAS PRINCIPAIS DE UM IQA

Os padrões de qualidade da água referem-se, a um certo numero de parâmetros capazes de refletir direta ou indiretamente a presença efetiva ou potencial de algumas substâncias ou microorganismos que possam comprometer a qualidade da água do ponto de vista de sua estética e sua salubridade.

Do ponto de vista da salubridade, exige-se que a água não contenha patogênicos ou substâncias químicas em concentrações tóxicas ou que possam tornar-se nocivas à saúde pelo uso continuado da água. Do ponto de vista estético, as exigências se referem os aspectos físicos e organolépticos que tornem a água repugnante ao consumidor, induzindo-o a usar águas de melhor aparência, porém sem controle de salubridade (81).

Índice de qualidade das águas (IQA) é um facilitador na interpretação geral da condição de qualidade dos corpos de águas, indicando o grau de contaminação das águas devido aos materiais orgânicos, fecais, nutrientes e sólidos, que normalmente são indicadores de poluição causado pelos despejos domésticos.

As condições presentes no processamento manual de grande número de dados analíticos, praticamente impedem a rápida interpretação dos resultados, de modo que muitas tentativas foram feitas para apresentar dados compreensíveis e formas aceitáveis usando o IQA. Este, por sua vez, é um instrumento matemático utilizado para transformar grandes quantidades de dados em um único número que representa o nível de qualidade da água, enquanto elimina a avaliação subjetiva e os desvios individuais (22).

Para Stambuk (22), o denominador comum de todos os índices de qualidade da água reside no seguinte princípio básico: um índice de qualidade deve sintetizar os dados como resultados analíticos por meio de um vetor de qualidade simples. Este método faz com que as informações sejam mais rápida e facilmente interpretadas que uma lista de valores numéricos. Por conseguinte, um índice de qualidade da água é uma ferramenta de comunicação para transmissão de

informações. Os utilizadores desta informação podem estar ou não intimamente associados ao assunto (por exemplo, o público em geral, usuários, cientistas, gestores, parlamentares, engenheiros, etc.)

Para caracterizar a qualidade da água, são utilizados diversos parâmetros, os quais representam as suas características físicas, químicas e biológicas. Estes, são indicadores da qualidade da água e representam impurezas quando alcançam valores superiores aos estabelecidos para determinado uso. Uma metodologia que pondera estes diversos parâmetros é o Índice de Qualidade de Água. Por meio deste índice, é possível estabelecer níveis e padrões de qualidade que possibilita o enquadramento de cursos d'água em classes ou níveis de qualidade (16).

A ideia da utilização de um índice para representar, por meio de um único valor numérico um conjunto de diversas variáveis não é um conceito inovador, e tem sido utilizado em diversos campos do conhecimento para representar diversos atributos, tais como: riqueza, diversidade, a equidade, as variações, a qualidade, etc.

Geralmente os sistemas de classificação de água emitem valores isolados, ou graus de restrição de uso da água, os quais avaliam os parâmetros individualmente. Os índices de qualidade de água têm uma proposição diferenciada, pois associam os parâmetros e seus valores mediante um referencial numérico único. Comumente, os índices são específicos para abastecimento de água (82).

Índices baseados em técnicas estatísticas favorecem a determinação dos indicadores mais característicos do corpo d'água em estudo, embora não permitam generalizações para outros corpos d'água.

Cada sistema lótico possui características próprias, o que torna difícil estabelecer uma única variável como indicador padrão para qualquer sistema hídrico. Neste sentido, a busca em trabalhos de campo é a obtenção de índices de qualidade de água que reflitam resumidamente e objetivamente as alterações, com ênfase para as intervenções humanas, como o uso agrícola, urbano e industrial (28).

Para uma interpretação ecológica da qualidade das águas superficiais e/ou para estabelecer um sistema de monitoramento, é necessário a utilização de métodos simples que dêem informações objetivas e interpretáveis, partindo para critérios próprios que considerem as características peculiares dos recursos hídricos.

No intuito de traduzir de forma concisa e objetiva, para as autoridades e o público, a influência que as atividades ligadas aos processos de desenvolvimento provocam na dinâmica ambiental dos ecossistemas aquáticos, foram criados os indicadores de qualidade de águas. Estes índices contemplam um grau de subjetividade, pois dependem da escolha das variáveis que constituirão os indicadores principais das alterações da qualidade da água (20).

O IQA, por reunir em um único resultado, os valores de nove diferentes parâmetros, oferece ao mesmo tempo vantagens e limitações (20). A vantagem reside no fato de sumarizar a interpretação de nove variáveis em um único número, facilitando a compreensão da situação para o público leigo. A limitação relaciona-se à perda na interpretação das variáveis individuais e da relação destas com as demais. Soma-se a isto o fato de que este índice foi desenvolvido visando avaliar o impacto dos esgotos domésticos nas águas utilizadas para abastecimento público, não representando efeitos originários de outras fontes poluentes.

Marques (26), afirma que os índices e indicadores ambientais surgiram como resultado da crescente preocupação social com os aspectos ambientais do desenvolvimento. Esse processo requer um número cada vez maior de informações com distintos graus de complexidade. Por outro lado, os indicadores tornaram-se fundamentais no processo decisório das políticas públicas e no acompanhamento de seus efeitos. Essa dupla vertente tem o desafio permanente de gerar indicadores e índices que transmitam um número cada vez maior de informações, de forma sintética e acessível, para os tomadores de decisão.

O objetivo de um índice de qualidade das águas (IQA) é comunicar a qualidade de um determinado corpo hídrico aos atores institucionais de uma bacia hidrográfica, sejam eles a população, as prefeituras, os órgãos de controle

ambiental, os comitês das bacias hidrográficas, as organizações não-governamentais, entre outros. Desse modo, o índice de qualidade das águas colabora na construção de um sistema de suporte à tomada de decisão em uma bacia hidrográfica (83).

Uma dificuldade na elaboração de um índice de qualidade das águas é sintetizar em um único número (que pode estar relacionado a um estado da qualidade: ótima, boa, regular, ruim e péssima, por ex.) uma realidade complexa, onde inúmeras variáveis ambientais têm influência.

Soma-se a isso, o fato que a qualidade da água é uma função direta de seu uso proposto. Portanto, uma definição clara dos objetivos que se desejam alcançar com este índice de qualidade se faz necessária, pois entre os usos da água estão a irrigação, a recreação, o industrial, o abastecimento público, a manutenção da vida aquática, etc. Um índice de qualidade das águas pode ser projetado para uma situação específica, inserido no contexto de uma bacia hidrográfica, trazendo consigo a diversidade urbano-industrial presente, a prática de uso e ocupação do solo e o padrão de desenvolvimento tecnológico (83) .

Conforme Abbasi (25), a formulação e utilização de índices tem sido fortemente defendida pelos organismos responsáveis pelo abastecimento controle de poluição da água, uma vez que, a avaliação da qualidade da água é obtida através da coleta de amostras que são analisadas. Decorre daí, uma necessidade de traduzir tais dados em uma forma que seja facilmente compreendida. O IQA serve como instrumento conveniente para examinar para avaliar as condições ambientais e de qualidade da água, colaborando com o processo de decisão por parte dos gestores governamentais.

O IQA pode ser empregado como uma ferramenta para traduzir múltiplas variáveis em um único critério adequado e, fixando os níveis de qualidade da água baseadas nas normas estabelecidas para um determinado sistema aquático. Isso simplifica o relatório de qualidade da água e melhora a compreensão das questões da qualidade, através da integração complexa de dados, gerando uma pontuação

que descreve e avalia o estado de qualidade da água.

O propósito de uma atribuição de pesos para as variáveis de qualidade da água é para denotar a importância de cada variável para a qualidade final da água. Um valor maior no peso implica uma maior importância da variável (30). Na atribuição do peso de cada variável, o maior desafio é o fato de que pessoas diferentes podem ter opiniões diferentes sobre o peso de uma mesma variável. Assim, um IQA deve ser concebido, combinando os pareceres de um grupo de peritos. Por exemplo, a atribuição do peso do IQA da *NSF* reflete a opinião de 142 especialistas em qualidade da água. Cada perito avalia a importância de cada variável com base em sua experiência.

Quando os relatórios de qualidade da água são gerados, eles são escritos por especialistas, que mostram dados da pesquisa, com ênfase nos parâmetros individuais, sem os atores institucionais (gestores e tomadores de decisão), que raramente são especialistas, com uma visão superficial da qualidade de um recurso hídrico. Métodos para integrar diversas variáveis relacionadas à qualidade da água em um determinado índice são cada vez mais necessários (12).

Para Lermontov (12) a finalidade de um índice não é descrever separadamente a concentração de um poluente, ou a evolução de certo parâmetro. Sintetizar uma realidade complexa em um único número é o maior desafio para o desenvolvimento de um IQA, uma vez que, é diretamente afetado por um grande número de variáveis ambientais. Assim, a clara definição de metas a serem atingidas através da utilização de tal índice é necessária. A formulação de um IQA pode ser simplificada, se forem consideradas apenas as variáveis que são críticas para um certo corpo d'água. Um problema com o processo de indexação é a possibilidade de que alguns parâmetros tenham uma influência desproporcional sobre o resultado final, produzindo um viés no índice.

### **2.3.1 Fórmula para Cálculo do IQA da *National Sanitation Foundation***

O IQA desenvolvido pela *National Sanitation Foundation* – *NSF* constitui-se numa ferramenta prática, de comunicação eficiente, obtida por meio da indexação

das informações de diversos parâmetros ou variáveis analisadas. O mesmo índice foi utilizado como parâmetro para definição do sistema de cálculo da qualidade da água (SCQA), e estabelecimento das Equações do Índice de Qualidade das Águas (IQA) do Estado de Minas Gerais (18).

O IQA reflete a interferência produzida por esgotos sanitários e por outros materiais orgânicos, nutrientes e sólidos é calculado por meio de uma equação aritmética simples, que utiliza os seguintes parâmetros e seus respectivos pesos:

Tabela 3 – Parâmetros que compõem o IQA e seus respectivos pesos

Parâmetro	Sigla	Peso
Oxigênio Dissolvido	OD	0,17
Coliformes Fecais	CF	0,15
Potencial Hidrogeniônico	pH	0,12
Demanda Bioquímica de Oxigênio	DBO	0,10
Nitrato	NO <sub>3</sub>	0,10
Fosfato Total	PO <sub>4</sub>	0,10
Variação da Temperatura da Água	ΔT	0,10
Turbidez	Tu	0,08
Sólidos Totais	ST	0,08
Total		1,00

Fonte: (18)

O IQA é calculado pelo produtório ponderado dos nove parâmetros da qualidade da água eleitos pelos especialistas, conforme a fórmula:

$$IQA = \prod_{i=1}^9 q_i^{w_i}$$

Onde:

IQA – índice de qualidade da água, um número que varia de 0 a 100.

∏ – Produtório (operador que significa multiplicação)

q<sub>i</sub> = qualidade do parâmetro *i* obtido através da curva média específica de qualidade.

w<sub>i</sub> = peso atribuído ao parâmetro, em função de sua importância na qualidade, com valor entre 0 e 1, de acordo com a Tabela 3.

O resultado obtido após a aplicação desta equação do IQA é um número racional entre 0 e 100. Tal valor está em um dos intervalos estabelecidos na Tabela seguinte e a qualidade da água é a variável linguística correspondente ao intervalo em que se encontrar o valor numérico. As cores, que variam do vermelho para pior categoria, até o azul para a melhor, passando pelo amarelo, para a categoria intermediária, tem a função de alertar os usuários não especialistas quanto à qualidade da água avaliada.

Esta classificação seguirá um padrão rígido, ou seja, de acordo com o resultado obtido, enquadra-se a água analisada em uma das classes, obedecendo a lógica clássica de pertinência. Para cada mês do período de estudo definido existe uma classificação.

Tabela 4 – Classes de qualidade estabelecidas e seus respectivos intervalos

Classes	Intervalos
Excelente (1)	$90 < IQA \leq 100$
Bom (2)	$70 < IQA \leq 90$
Médio (3)	$50 < IQA \leq 70$
Ruim (4)	$25 < IQA \leq 50$
Muito ruim (5)	$00 < IQA \leq 25$

Fonte: (18)

A seguir, conceitua-se individualmente todos os parâmetros que compõe o IQA e discute-se suas curvas de valoração definidas pela NSF, bem como, apresenta-se as principais contribuições de cada um deles para a qualidade da água de um manancial hídrico.

#### 2.3.1.1 Oxigênio Dissolvido (OD)

O oxigênio dissolvido é uma variável extremamente importante, pois é necessário para a respiração da maioria dos organismos que habitam o meio aquático. Geralmente o oxigênio dissolvido se reduz ou desaparece, quando a água recebe grandes quantidades de substâncias orgânicas biodegradáveis encontradas, por exemplo, no esgoto doméstico, em certos resíduos industriais, no vinhoto, e outros.

É o elemento principal no metabolismo dos microrganismos aeróbios que habitam ambientes aquáticos, sendo um parâmetro de extrema relevância na legislação de classificação das águas naturais (2, 17), bem como na composição de índices de qualidade de águas (IQA's). Observa-se que no IQA utilizado neste estudo, este parâmetro da é o que recebe o maior índice de ponderação.

O valor ideal deste parâmetro para a boa qualidade da água é de 4 a 6 mg/l, o que garante a manutenção da vida aquática saudável em um corpo d'água (84). Já Libânio (17) considera que para manutenção da vida aquática aeróbia, são necessários teores mínimos de oxigênio dissolvido de 2 a 5 mg/l, de acordo com o grau de exigência de cada organismo.

O conteúdo de oxigênio nas águas superficiais depende da quantidade e tipo de matéria orgânica instáveis que a água contenha. Águas superficiais, relativamente límpidas, apresentam-se saturadas de oxigênio dissolvido, porém este pode ser rapidamente consumido pela demanda de oxigênio de esgotos domésticos. A concentração de oxigênio dissolvido é também o parâmetro fundamental nos modelos de autodepuração natural das águas.

A concentração de OD à saturação é diretamente proporcional à pressão atmosférica ou inversamente proporcional a altitude, e, indiretamente proporcional a à temperatura. Desta forma as regiões ao nível do mar tendem a ter maior concentração de OD do que as regiões montanhosas.

O primeiro passo para a determinação do percentual de Oxigênio Dissolvido é a determinação da Concentração de saturação de oxigênio:

$$C_s = (14,2 \times e^{-0,0212T} - (0,0016 \times C_{Cl} \times e^{-0,0264T})) \times (0,994 - (0,0001042 \times H))$$

Onde:

$C_s$  – concentração de saturação de oxigênio (mg/l)

$T$  – temperatura (°C)

$C_{Cl}$  – Concentração de Cloreto (mg/l)

$H$  – Altitude (m)

Em seguida, calcula-se a porcentagem de oxigênio dissolvido, dada pela fórmula:

$$\%OD = (OD/C_s) \times 100$$

Onde:

OD% – porcentagem de oxigênio dissolvido

OD – oxigênio dissolvido (mg/l)

C<sub>s</sub> – concentração de saturação de oxigênio dissolvido (mg/l)

As equações para o cálculo do q<sub>s</sub><sup>2</sup> Oxigênio dissolvido são:

- Para OD% saturação ≤ 100

$$q_s = 100 \times (\text{sen}(y_1))^2 - [(2,5 \times \text{sen}(y_2) - 0,018 \times OD\% + 6,86) \times \text{sen}(y_3)] + \frac{12}{e^{y_4} + e^{y_5}}$$

Onde:

$$y_1 = 0,01396 \times OD\% + 0,0873$$

$$y_2 = \frac{\pi}{56} \times (OD\% - 27)$$

$$y_3 = \frac{\pi}{85} - (OD\% - 15)$$

$$y_4 = \frac{OD\% - 65}{10}$$

$$y_5 = \frac{65 - OD\%}{10}$$

- Para 100 < OD% saturação ≤ 140

$$q_s = -0,00777142857142832 \times (OD\%)^2 + 1,27854285714278 \times OD\% + 49,8817148572$$

- Para OD% saturação > 140

$$q_s = 47,0$$

---

<sup>2</sup> Parâmetro do IQA

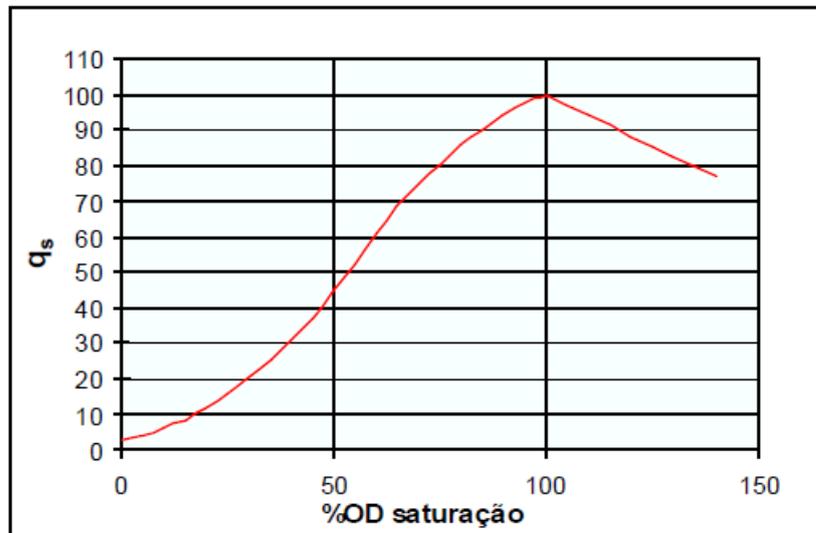


Figura 5 – Curva de valoração do oxigênio dissolvido (18)

### 2.3.1.2 Coliformes Termotolerantes ou Fecais (CF)

As bactérias do grupo *coliforme* habitam normalmente o trato intestinal dos animais de sangue quente, servindo, portanto, como indicadoras da contaminação de uma amostra de água por fezes. A maioria das doenças de veiculação hídrica são transmitidas por via fecal, ou seja, os organismos patogênicos eliminados pelas fezes atingem o ambiente aquático, podendo vir a contaminar as pessoas que se abasteçam desta água.

Esse grupo de bactérias, também denominadas de termotolerantes, engloba predominantemente o gênero *Escherichia* e, em menor monta, *Citrobacter*, *Klebsiella* e *Enterobacter*. Esses gêneros representam percentual variável entre 3 e 4% nas fezes humanas e de 3 a 8% nas fezes de animais. Dessa forma, o impreciso termo *coliformes* fecais reporta-se às bactérias termotolerantes, incluindo os gêneros não necessariamente de origem fecal (17).

Branco (85), afirma que os coliformes fecais existem em tão grande número, que apesar de serem microscópicos chegam a formar a maior parte do volume fecal. Cada humano adulto expele diariamente, um número situado entre 50 e 400 bilhões de bactérias coliformes. Esse tipo de bactéria não se reproduz nas águas, só no intestino. Dessa forma, sua presença indica obrigatoriamente a presença da matéria intestinal. E, dado o número extraordinário que lá se encontra, é praticamente

impossível que a presença de matéria fecal, ainda que extremamente diluída, não seja revelada pela presença dos coliformes. Em resumo, a presença de coliformes fecais na água indica, sempre, a presença de esgotos, e esta, por sua vez, significa a possibilidade da presença de patógenos, dada a provável existência de pessoas doentes ou portadoras em meio à população que deu origem àqueles esgotos.

O número de coliformes é expresso pelo número mais provável (NMP); representa a quantidade mais provável de coliformes existentes em 100 ml da amostra. O exame de coliformes é empregado para controle de sistemas de abastecimento de água, e assim determina a eficiência do tratamento.

Rebouças (81) entende que o NMP de bactérias coliformes pretende indicar a possível presença de seres patogênicos, de origem entérica, na água, em concentrações que possam causar a contaminação de pessoas que a utilizem.

As equações para o cálculo da  $q_s$  para o parâmetro Coliformes Fecais são:

- Para  $CF \leq 10^5 \text{NMP}/100\text{ml}$   
 $q_s = 98,24034 - 34,7145 \times (\log(CF)) + 2,614267 \times (\log(CF))^2 + 0,107821 \times (\log(CF))^3$
- Para  $CF > 10^5 \text{NMP}/100\text{ml}$   
 $q_s = 3,0$

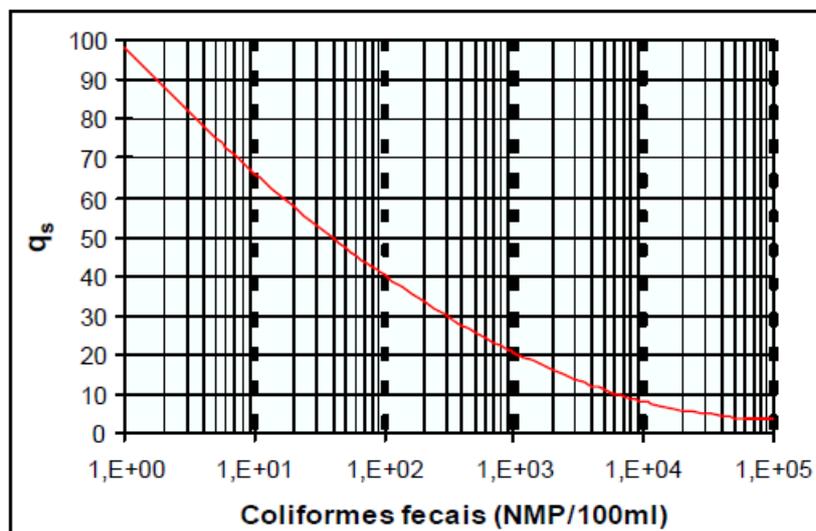


Figura 6 – Curva de valoração dos coliformes fecais ou termotolerantes (18)

### 2.3.1.3 Potencial Hidrogeniônico (pH)

O termo pH é usado universalmente para expressar a intensidade da condição ácida ou alcalina de uma solução. Condições ácidas (se valor do  $\text{pH} < 7$ ), aumentam de atividade a medida que o pH decresce e, vice versa, condições alcalinas ( $\text{pH} > 7$ ) se apresentam a pH elevados. Se o valor do  $\text{pH} = 7$ , a solução é dita neutra. O pH neutro só tem valor  $\text{pH} = 7$  a  $25^\circ\text{C}$ , o que implica variações do valor medido conforme a temperatura. O pH é o parâmetro de maior frequência de monitoramento na rotina operacional das estações de tratamento.

O pH da água, depende de sua origem e características naturais, mas pode ser alterado pela introdução de resíduos sendo que o pH baixo torna a água corrosiva e águas com pH elevado tendem a formar incrustações nas tubulações da rede de distribuição.

Um pH da água superior a 8,5 provoca alteração no gosto da água. Se o pH for superior a 11 causa irritação nos olhos e exacerbação de doença de pele. O pH da água no intervalo de 3,5-4,5 afeta a reprodução dos peixes (84).

O padrão de potabilidade do pH está expresso na Portaria MS n.º 518/2004 (86) que recomenda no parágrafo 1.º do seu artigo 16 que, a água potável deve ser mantida em qualquer ponto do sistema de distribuição com pH na faixa de 6,0 a 9,5. Neste mesmo diapasão Richter (2), corrobora afirmando que nos sistemas de abastecimento público de água, o pH está geralmente compreendido entre 6,5 e 9,5, de uma escala que varia entre 0 e 14. Já a resolução n. 357/2005 do CONAMA (87), estabelece que o pH para as água de classe II, que é o caso do Rio Pimenta Bueno, deve ficar na faixa de 6,0 a 9,0. Libânio (17), sustenta que, as águas naturais de superfície, por sua vez, apresentam pH variando de 6,0 a 8,5.

As equações para o cálculo da  $q_s$  do parâmetro Potencial Hidrogeniônico são:

- Para  $\text{pH} \leq 2,0$

$$q_s = 2,0$$

- Para  $2,0 < \text{pH} \leq 6,9$

$$q_s = -37,1085 + 41,91277 \times \text{pH} - 15,7043 \times (\text{pH})^2 + 2,417486 \times (\text{pH})^3 - 0,091252 \times (\text{pH})^4$$

- Para  $6,9 < \text{pH} \leq 7,1$

$$q_s = -4,69365 - 21,4593 \times \text{pH} - 68,4561 \times (\text{pH})^2 + 21,638886 \times (\text{pH})^3 - 1,59165 \times (\text{pH})^4$$

- Para  $7,1 < \text{pH} \leq 12$

$$q_s = -7.698,19 + 3.262,031 \times \text{pH} - 499,494 \times (\text{pH})^2 + 33,1551 \times (\text{pH})^3 - 0,810613 \times (\text{pH})^4$$

- Para  $\text{pH} > 12,0$

$$q_s = 3,0$$

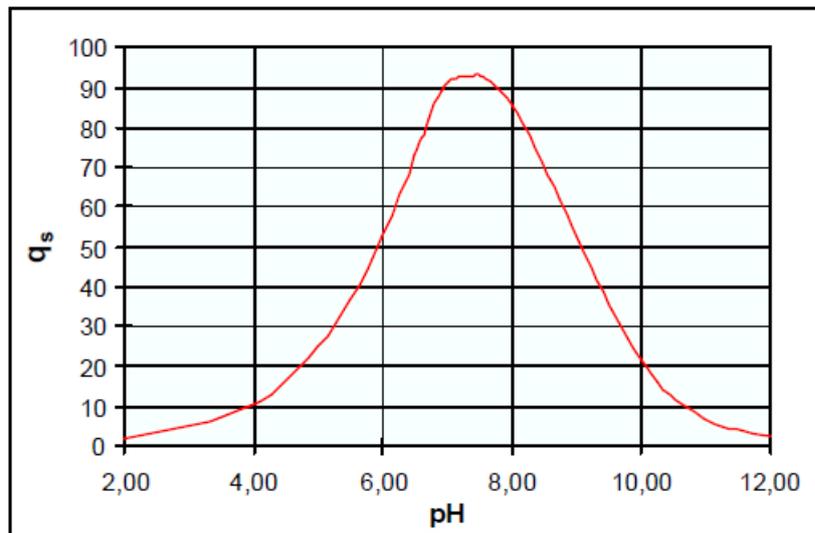


Figura 7 – Curva de valoração potencial hidrogeniônica (18)

#### 2.3.1.4 Demanda Bioquímica de Oxigênio (DBO)

O parâmetro demanda bioquímica de oxigênio expressa a presença de matéria orgânica, constituindo-se em importante indicador de qualidade da água. Tal parâmetro indica a magnitude do consumo de oxigênio (em mg/l) pelas bactérias na estabilização da matéria orgânica. A determinação desta demanda realiza-se a partir da diferença na concentração de OD, em amostra de água, em período de 5 dias e temperatura de 20 °C.

A DBO é a medida da quantidade de oxigênio necessária ao metabolismo das bactérias aeróbias que destroem a matéria orgânica (2). A matéria orgânica é responsável por uma demanda de oxigênio, chamada demanda bioquímica porque se realiza através da atividade biológica ou bioquímica (85).

A queda das concentrações de oxigênio, podendo chegar até a sua total ausência, ocasião em que se instalam atividades fermentativas anaeróbias, geralmente com forte exalação de maus odores, é motivada pelo consumo das matérias orgânicas por miríades de microorganismos que dele se alimentam e que, proporcionalmente, consomem oxigênio em sua respiração. Pode-se, pois, dizer que a certa quantidade de material biodegradável, passível de ser decomposta biologicamente, construiu um potencial de redução química, provocando um consumo de oxigênio proporcional (81).

O conceito de demanda bioquímica de oxigênio é muito importante em qualquer estudo de poluição da água permitindo avaliar o poder poluidor de um resíduo, sendo que, quanto maior for a quantidade de matéria orgânica introduzida na água, maior será a quantidade de oxigênio que dela é consumido.

As equações para o cálculo da  $q_s$  para o parâmetro DBO são:

- Para  $DBO \leq 30 \text{ mg/l}$

$$q_s = 100,9571 - 10,7121 \times DBO + 0,49544 \times DBO^2 - 0,011167 \times DBO^3 + 0,0001 \times DBO^4$$

- Para  $DBO > 30,0 \text{ mg/l}$

$$q_s = 2,0$$

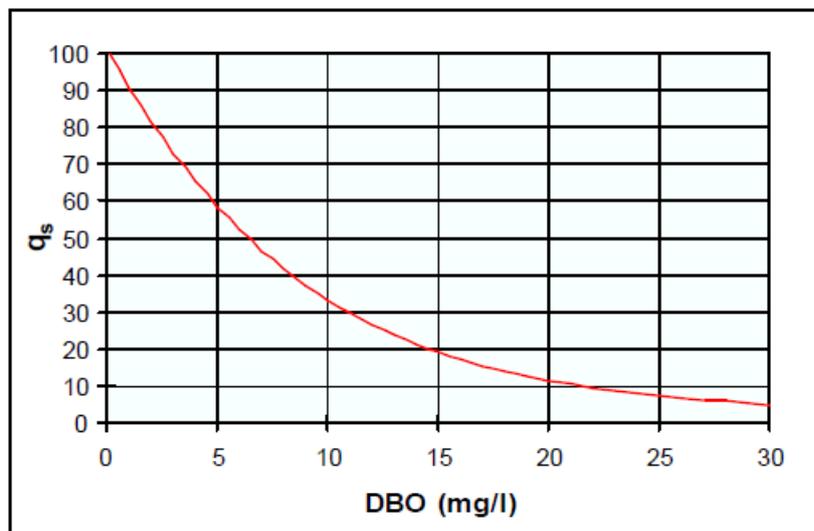


Figura 8 – Curva de valoração da demanda bioquímica de oxigênio (18)

### 2.3.1.5 Nitrato Total (NO<sub>3</sub>)

O nitrogênio, gás mais abundante na atmosfera terrestre (78%), pode ser encontrado nos corpos d'água em função do seu estado de oxidação sob diversas formas (17). Para efeitos de avaliação da qualidade da água, considera-se apenas o Nitrato (NO<sub>3</sub>), que é a forma oxidada presente em condições anaeróbias e indicador de poluição remota por esgotos domésticos.

O teor de nutrientes inorgânicos dissolvidos na água é de grande importância, principalmente para o desenvolvimento do fitoplâncton (algas), porém em grande quantidade pode provocar a eutrofização do ambiente (proliferação de algas) prejudicando o ambiente (entrada de luz) e causando odor e gosto ruim na água devido à toxinas liberadas pelas algas que morrem.

Dentre as substâncias inorgânicas nocivas à saúde, o nitrato é o que mais preocupa, sendo considerado tóxico, quando a concentração na água está acima do valor citado na legislação (88). Embora a Portaria 518/2004 (86) e a resolução n. 357/2005 do CONAMA (87), fixem os limites máximos para este parâmetro seja de 10mg/l, a Agência de Proteção Ambiental dos Estados Unidos (EPA) considera que valores acima de 3mg/l são indicativos de contaminação antrópica.

A quantidade de nitrogênio na água pode indicar uma poluição recente ou remota. Inclui-se neste parâmetro o nitrogênio, sob suas diversas formas compostas, orgânico, amoniacal, nitritos e nitratos. O nitrogênio segue um ciclo desde o organismo vivo até a mineralização total, esta sob a forma de nitratos, sendo assim possível avaliar o grau e a distância de uma poluição, pela concentração e forma do composto nitrogenado na água (2).

O aumento da contaminação das águas por compostos nitrogenados vem merecendo atenção especial, devido a sua ampla e diversificada procedência. Na legislação federal vigente (86) os teores de nitratos são estabelecidos com os seus limites restritivos, no entanto, na legislação anterior, Portaria M.S. n. 36 (89), não existia a o estabelecimento de limites para as concentrações de nitrogênio total.

O Nitrogênio pode estar presente naturalmente em águas superficiais ou subterrâneas, sendo que, usualmente sua concentração é bastante baixa devido a sua fácil adsorção por partículas do solo ou à oxidação. Entretanto a ocorrência de concentrações elevadas pode ser resultante de fontes de poluição próximas (90).

A concentração de nitrato pode ser alterada com relação à sazonalidade temporal, uma vez que, no período chuvoso, ocorre maior carreamento de material orgânico para os corpos d'água.

As equações para o cálculo da  $q_s$  para o parâmetro Nitrato Total ( $\text{NO}_3$ ) são:

- Para  $\text{NO}_3 \leq 10 \text{ mg/l}$

$$q_s = -5,1 \times \text{NO}_3 + 100,17$$

- Para  $10 < \text{NO}_3 \leq 60 \text{ mg/l}$

$$q_s = -22,853 \times \ln(\text{NO}_3) + 101,18$$

- Para  $60 < \text{NO}_3 \leq 90 \text{ mg/l}$

$$q_s = 10000000000 \times (\text{NO}_3)^{-5,1161}$$

- Para  $\text{NO}_3 > 90 \text{ mg/l}$

$$q_s = 1,0$$

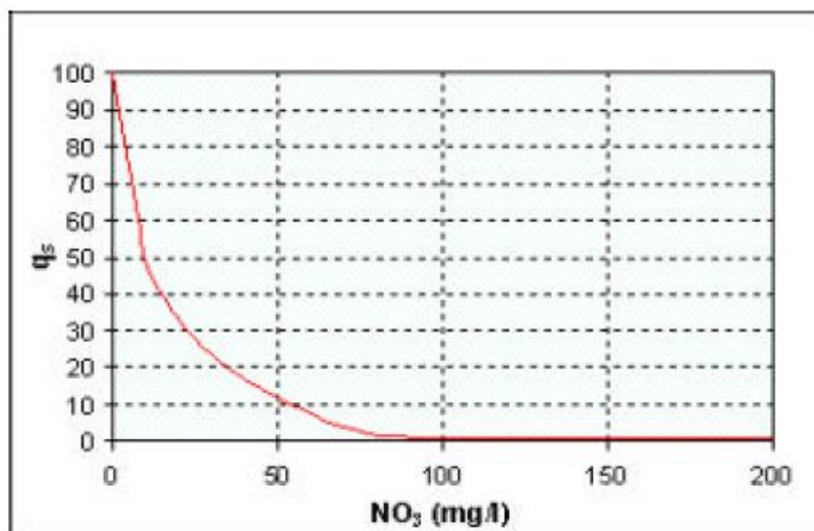


Figura 9 – Curva de valoração dos nitratos totais (18)

### 2.3.1.6 Fosfato Total (PO<sub>4</sub>)

Por ser menos abundante que o nitrogênio, o fósforo se constitui no principal fator limitante ao desenvolvimento de algas e plantas no meio aquático. Origina-se da dissolução de compostos do solo e decomposição da matéria orgânica. Por atividade antrópica, o aporte de fósforo aos corpos d'água pode ocorrer por lançamento de despejos domésticos e industriais, fertilizantes e lixiviação de criatório de animais. Em águas naturais não poluídas as concentrações deste parâmetro são comumente inferiores a 0,02 mg/l (17).

O papel do fósforo na eutrofização dos recursos hídricos é essencial, e a origem deste nutriente a partir de áreas agrícolas tem sido colocada em relevância como indicador de qualidade de água, já que outros indicadores como sólidos em suspensão e turbidez estão associados ao seu transporte. Os principal meio de aporte de fósforo à água é o uso urbano, seguido pelo uso agrícola do solo (27).

As equações para o cálculo da  $q_s$  para o parâmetro Fosfato Total (PO<sub>4</sub>) são:

- Para PO<sub>4</sub> ≤ 10 mg/l

$$q_s = 79,7 \times (\text{PO}_4 + 0,821)^{-1,15}$$

- Para PO<sub>4</sub> > 10,0 mg/l

$$q_s = 5,0$$

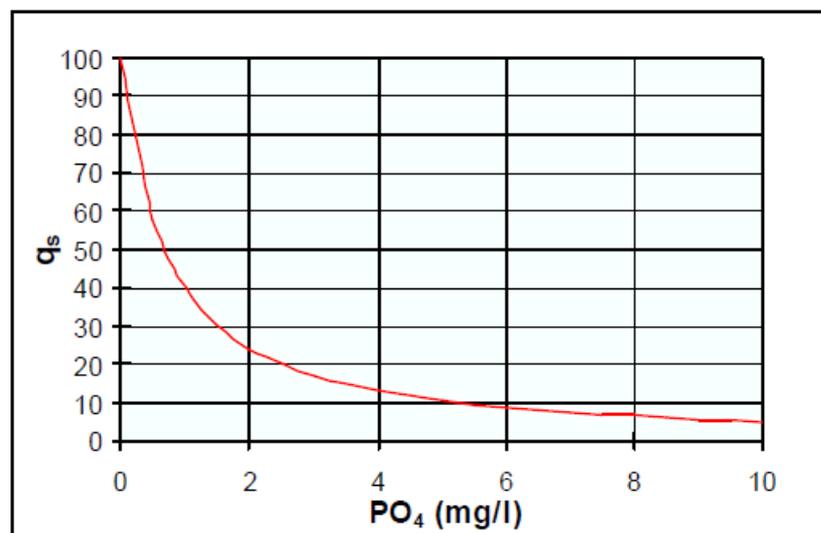


Figura 10 – Curva de valoração do fosfato total (18)

### 2.3.1.7 Turbidez (Tu)

O aspecto visual ou sensorial de uma água a ser empregada no consumo humano, e particularmente para ser bebida é, naturalmente, o primeiro a chamar a atenção. Independentemente de uma possível relação com a presença ou não de patógenos ou de substâncias tóxicas, o homem oferece forte resistência ao consumo, como bebida, de uma água que foi turvada por chuvas recentes ou colorida pela presença de substâncias amarelas contidas no húmus. Essa reação pode ser de natureza psíquica, uma vez que outros animais que dependem muito mais de seus instintos não se recusam a beber águas nessas condições e, o próprio homem beba outros líquidos, que apresentem cor como característica própria.

A presença de partículas em suspensão, que causam a turbidez, ou de substâncias em solução, relativas à cor, pode concorrer para o agravamento da poluição. A turbidez limita a penetração de raios solares, restringindo a realização da fotossíntese que, por sua vez, reduz a reposição do oxigênio (21).

O efeito da turbidez está mais associado a estética da água mas, no entanto, muitos organismos patogênicos podem ser incorporados às partículas e se protegerem nelas da ação dos desinfetantes utilizados para o tratamento da água. A turbidez colabora para o aumento da temperatura da água, por dois motivos: por interferir na profundidade de penetração da luz solar, provocando o aquecimento da superfície da água e ainda, pelo fato das partículas em suspensão absorverem calor dos raios solares (84).

Richter (2) define a turbidez como uma característica da água devida à presença de partículas suspensas com tamanho variando desde suspensões grosseiras aos colóides, dependendo do grau de turbulência. A presença destas partículas provoca a dispersão e a absorção da luz, dando a água uma aparência nebulosa, esteticamente indesejável e potencialmente perigosa.

A turbidez é expressa em NTU (*Nefelometric Turbidity Unit*), FTU (*Formazine Turbidity Unit*) ou uT (Unidade de Turbidez). Essas unidades são correspondentes

em 1:1 (91). A turbidez natural das águas superficiais está, geralmente, compreendida na faixa de 3 a 500 uT. Em lagos e represas onde a velocidade de escoamento da água é menor, a turbidez tende a ser bastante baixa (17). Além da ocorrência de origem natural, a turbidez da água pode também ser causada por lançamentos de esgotos domésticos ou industriais.

Para fins de potabilidade, a turbidez da água filtrada vem progressivamente consolidando-se como um dos principais parâmetros na avaliação do desempenho das estações de tratamento (17). Esta assertiva é corroborada pelo novo padrão de potabilidade expresso na portaria 518 M.S./2004 (86) que consoante com os padrões internacionais, estabelece para águas de consumo humano o limite máximo permissível de 1,0 uT, sendo recomendado enfaticamente valores inferiores a 0,5 uT em 95% das amostras mensais. A portaria n. 357/2005 do CONAMA (87), estabelece limite de até 40 UNT para as águas superficiais, classe II.

As equações para o cálculo da  $q_s$  para o parâmetro Turbidez ( $Tu$ ) são:

- Para  $Tu \leq 100$

$$q_s = 90,37 \times e^{(-0,0169 \times Tu)} - 15 \times \cos(0,0571 \times (Tu - 30)) + 10,22 \times e^{(-0,231 \times Tu)} - 0,8$$

- Para  $Tu > 100$

$$q_s = 5,0$$

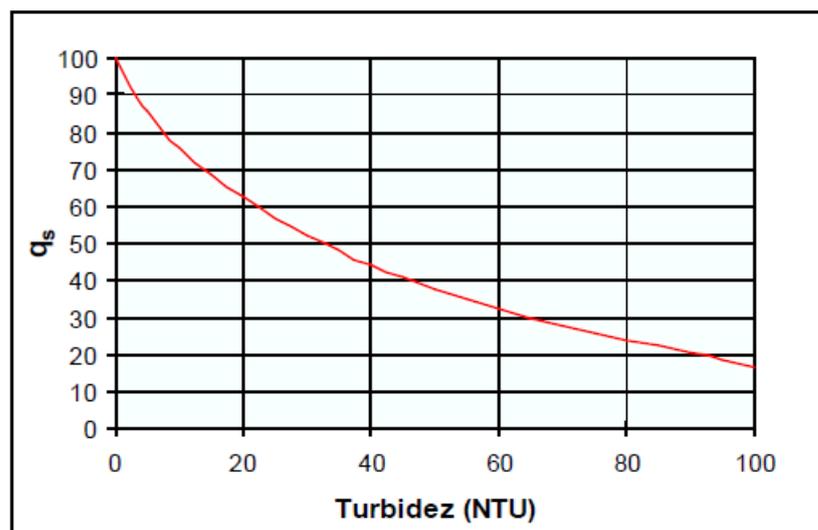


Figura 11 – Curva de valorização da turbidez (18)

### 2.3.1.8 Sólidos Totais (ST)

Quantidades excessivas de substâncias dissolvidas nas águas podem torná-las inadequadas ao consumo. Richter (2) recomenda que o teor de sólidos totais dissolvidos seja menor que 500 mg/l, com limite máximo aceitável de 1000 mg/l.

As equações para o cálculo da  $q_s$  para o parâmetro Sólidos Totais (ST) são:

- Para  $ST \leq 500$

$$q_s = 133,17 e^{(-0,0027 \times ST)} - 53,17 e^{(-0,0141 \times ST)} + [(-6,2 e^{(-0,00462 \times ST)}) \text{sen}(0,0146 \times ST)]$$

- Para  $ST > 500$

$$q_s = 300$$

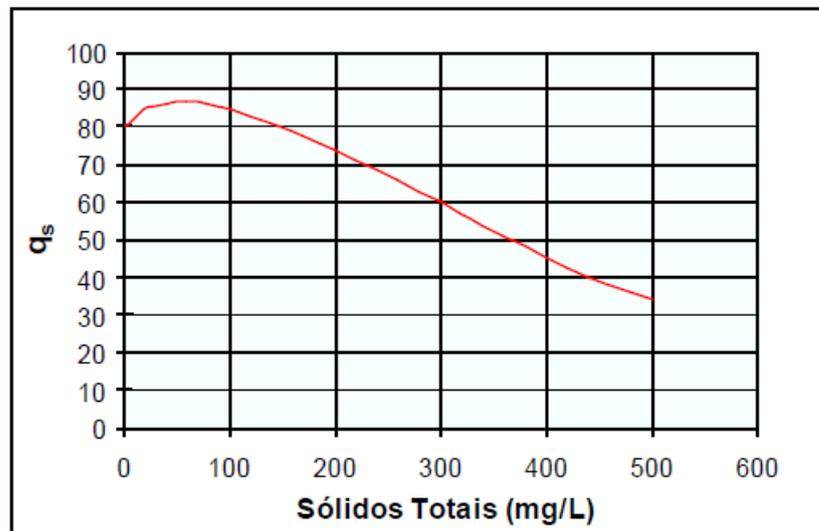


Figura 12 – Curva de valoração dos sólidos totais (18)

### 2.3.1.9 Variação de Temperatura ( $\Delta T$ )

A temperatura é diretamente proporcional à velocidade das reações químicas, à solubilidade das substâncias e ao metabolismo dos organismos presentes no ambiente aquático. A alteração da temperatura das águas naturais decorre principalmente da insolação e, quando de origem antrópica, de dejetos industriais e águas de refrigeração de máquinas e caldeiras (17).

A medida da intensidade de calor é um parâmetro importante, pois, influi em algumas propriedades da água (densidade, viscosidade, oxigênio dissolvido), com reflexos sobre a vida aquática. Além disso, influencia outras propriedades: acelera

reações químicas, reduz a solubilidade dos gases, acentua a sensação de sabor e odor (2).

O calor específico da água é de 1,0 cal/g°C, ou seja, para elevar a temperatura de 1g (grama) de água em 1°C (grau Celsius) é necessária uma caloria (Cal). Assim, a água absorve grande quantidade de calor sem apresentar significativa variação de temperatura. Essa propriedade adquire grande importância para a biota do meio aquático e também para o abastecimento público, pois significativa amplitude térmica do ar atmosférico manifesta-se em muito menor magnitude em termos de alteração da temperatura da água.

Libânio (17) entende que para fins de tratabilidade, essa característica representa uma vantagem ainda maior para os países tropicais, nos quais as variações de temperatura da água são menos significativas. No Brasil, à exceção de alguns mananciais da região Sul nos quais a temperatura da água, em períodos de inverno, pode baixar a valores entre 5 e 15 °C, as médias diárias das águas naturais afluentes as estações de tratamento nas demais regiões do País raramente apresentam-se inferiores a 18° C.

As equações e as curvas desenvolvidas pela *National Sanitation Foudantion* – NSF (92), dos Estados Unidos, levam em consideração as características dos corpos de água e variações climáticas dos EUA, sendo a variação de temperatura de equilíbrio o principal parâmetro afetado. No caso do Brasil, os ambientes não recebem cargas térmicas elevadas, logo, as equações não condizem com a realidade brasileira (18), pois a variação da temperatura de equilíbrio é próxima de zero, assim:  $\Delta T \approx 0$

$$\text{Para } -0,625 < \Delta T \leq 0,625$$

$$q_s = 4,8 \times \Delta T + 93$$

$$q_s = 4,8 \times 0 + 93$$

$$q_s = 93$$

Então, o  $q_s$  utilizado para variação de temperatura neste estudo, de ora em diante, é um valor constante e igual a 93.

### 3 CÁLCULO DOS FATORES DO IQA DO RIO PIMENTA BUENO

Nesta secção, apresenta-se os cálculos, de cada um dos parâmetros do IQA utilizando a média dos resultados das duas amostras coletadas no mês de setembro de 2007, no rio Pimenta Bueno. Tais cálculos são realizados de acordo com as equações da *NSF* e, em seguida, apresenta-se também o cálculo do  $IQA_{NSF}$  utilizando-se os fatores encontrados.

Cabe destacar que a apresentação destes cálculos visa demonstrar a complexidade envolvida para se encontrar um único valor de IQA, tendo assim um caráter mais didático do que pragmático. Para substituir toda esta sucessão de operações matemáticas utilizadas para calcular o IQA apenas do mês de setembro de 2009, foi desenvolvido um *software* simulador baseado na linguagem JAVA (SICQA - que será adiante apresentado) bem como no próprio MATLAB<sup>®</sup> foram implementadas todas as equações do  $IQA_{NSF}$ , substituindo com muitas vantagens e com muita propriedade, a realização destes cálculos manualmente.

#### 3.1 OXIGÊNIO DISSOLVIDO

Este parâmetro apresentou, no caso deste estudo, no mês de setembro de 2007, um valor de 7,8 mg/l de Oxigênio Dissolvido e uma Concentração de saturação igual a ( $C_s$ ) igual a 6,03.

Para cálculo do % de OD é necessária a aplicação da equação seguinte:

$$OD\% = \left( \frac{OD}{C_s} \right) \times 100$$

$$OD\% = \left( \frac{7,8}{6,03} \right) \times 100$$

$$OD\% = 129,3532$$

Como o valor encontrado situa-se no intervalo  $100 < OD\% \text{ saturação} \leq 140$ , decorre daí o imperativo de usar a equação previamente definida, que é:

$$q_s = -0,00777142857142832 \times (\text{OD}\%)^2 + 1,27854285714278 \times \text{OD}\% + 49,8817148572$$

Ao calcular o valor desta equação no ponto  $\text{OD}\% = 129,3532$ , chega-se ao  $Q_{\text{OD}\%} = 85,2318$ , que elevado ao seu peso de 0,017, resulta em 2,1291, sendo este valor um dos fatores que irá compor o cálculo do IQA.

### 3.2 COLIFORMES FECAIS (CF) OU COLIFORMES TERMOTOLERANTES

O valor deste parâmetro na amostra em estudo é de 520 NMP/100ml. Assim, a equação que se obriga a utilizar para os casos em que  $\text{CF} \leq 10^5$  NMP/100ml é:

$$Q_{\text{CF}} = 98,24034 - 34,7145 \times (\log(\text{CF})) + 2,614267 \times (\log(\text{CF}))^2 + 0,107821 \times (\log(\text{CF}))^3$$

Ao calcular sua raiz no ponto  $\text{CF} = 520$ , encontra-se  $Q(520) = 25,4004$ . Tal número, ponderado ao seu peso de 0,15, ou seja,  $(25,4004)^{0,15}$  resulta em 1,6245, que é um dos fatores componentes do cálculo do IQA.

### 3.3 POTENCIAL HIDROGENIÔNICO (PH)

O pH da amostra do mês de setembro de 2007 do rio Pimenta Bueno foi de 8,1. Para os casos em que  $7,1 < \text{pH} \leq 12$ , utiliza-se a equação:

$$Q_{\text{PH}} = -7.698,19 + 3.262,031 \times \text{pH} - 499,494 \times \text{pH}^2 + 33,1551 \times \text{pH}^3 - 0,810613 \times \text{pH}^4$$

Ao substituir a variável pH pelo valor 8,1, encontra-se um  $Q_{\text{PH}}$  de 83,0160 que elevado ao seu peso 0,12, produz um resultado de 1,6994, que também é um fator do cálculo do IQA do rio Pimenta Bueno.

### 3.4 DEMANDA BIOQUÍMICA DE OXIGÊNIO (DBO)

Este parâmetro apresentou um valor de 14,15 mg/l. Com a  $\text{DBO} \leq 30$  mg/l a equação a ser utilizada é:

$$q_s = 100,9571 - 10,7121 \times \text{DBO} + 0,49544 \times \text{DBO}^2 - 0,011167 \times \text{DBO}^3 + 0,0001 \times \text{DBO}^4$$

Substituindo-se a DBO nesta equação por 14,15, chega-se ao valor de 20,9502, que elevado ao seu respectivo peso de 0,10, resulta no valor de 1,3555. Este valor é mais um dos fatores do  $\text{IQA}_{NSF}$  do rio Pimenta Bueno.

### 3.5 NITRATO TOTAL ( $\text{NO}_3$ )

A amostra do mês de setembro de 2007 apresentou um valor para o parâmetro Nitrato Total, na ordem de 3,35mg/l. Quando  $\text{NO}_3 \leq 10$  mg/l, a equação utilizada é:

$$Q_{\text{NO}_3} = -5,1 \times \text{NO}_3 + 100,17$$

Ao calcular esta equação no ponto  $\text{NO}_3 = 3,35$ , obtém-se o valor de 83,0850, que ponderado ao seu peso de 0,1, resulta em 1,5557, sendo este também, um dos fatores do IQA a ser calculado.

### 3.6 FOSFATO TOTAL ( $\text{PO}_4$ )

Sabendo que valor deste parâmetro para o mês em estudo foi de 0,55 mg/l, a equação para o seu cálculo, nestas condições será:

$$\text{Para } \text{PO}_4 \leq 10 \text{ mg/l} \Rightarrow q_s = 79,7 \times (\text{PO}_4 + 0,821)^{-1,15}$$

que calculada no ponto  $\text{PO}_4 = 0,55$ , resulta no valor 55,4453. Este valor, ponderado a 0,10, que é o seu peso, contribui com 1,4941 como fator do IQA a ser calculado.

### 3.7 TURBIDEZ (TU)

Quando o valor do parâmetro  $\text{Tu} \leq 100$ , a implicação consequente é a utilização da equação:

$$q_s = 90,37 \times e^{(-0,0169 \times \text{Tu})} - 15 \times \cos(0,0571 \times (\text{Tu} - 30)) + 10,22 \times e^{(-0,231 \times \text{Tu})} - 0,8$$

Como no caso da amostra analisada incorreu-se em valor para turbidez inferior a 100, mais precisamente 74,5 NTU, calculou-se o valor da função neste ponto e obteve-se como resultado  $Q_{TU} = 37,2327$ , que ponderado ao seu peso de 0,08, resultou em 1,3355, que é o fator correspondente ao parâmetro Turbidez para o cálculo do IQA.

### 3.8 SÓLIDOS TOTAIS (ST)

A quantidade média de sólidos totais encontrados nas amostras analisadas do mês de setembro foi de 165 mg/l. Sendo assim, a equação a ser utilizada é:

$$q_s = 133,17 e^{(-0,0027 \times ST)} - 53,17 e^{(-0,0141 \times ST)} + [(-6,2 e^{(-0,00462 \times ST)}) \text{sen}(0,0146x ST)].$$

Substituindo-se o ST pelo valor 165 nesta equação, obtém-se o valor 78,1698 que ponderando ao seu peso de 0,08, resulta em 1,4172, que é outro fator componente do cálculo do IQA desejado.

### 3.9 VARIAÇÃO DE TEMPERATURA

Para este parâmetro já foi definido anteriormente que  $Q_{\Delta T} = 93$  e este valor ao ser elevado ao seu peso de 0,10, resulta no valor 1,5734, que é o último fator da equação do IQA que se está procurando calcular.

### 3.10 IQA<sub>NSF</sub> DO RIO PIMENTA BUENO DO MÊS DE SETEMBRO DE 2007

Após calcular todos os fatores necessários para se encontrar o IQA, utiliza-se a equação do IQA, que na verdade é um produtório dos parâmetros, ou seja, substitui-se cada um dos nove parâmetros encontrados na equação seguinte:

$$IQA = \prod_{i=1}^9 q_i^{w_i}$$

Decorre desta equação:

$$IQA_{NSF} = q^{W_1} \times q^{W_2} \times q^{W_3} \times q^{W_4} \times q^{W_5} \times q^{W_6} \times q^{W_7} \times q^{W_8} \times q^{W_9}$$

$$IQA_{NSF} = q^{0,17}_{OD} \times q^{0,15}_{CF} \times q^{0,12}_{pH} \times q^{0,10}_{DBO} \times q^{0,10}_{NO3} \times q^{0,10}_{PO4} \times q^{0,10}_{TU} \times q^{0,08}_{ST} \times q^{0,08}_{\Delta T}$$

$$IQA_{NSF} = 85,2318^{0,17} \times 25,4004^{0,15} \times 83,0160^{0,12} \times 20,9502^{0,10} \times 83,0850^{0,10} \times 55,4453^{0,10} \times 37,2327^{0,10} \times 78,1698^{0,08} \times 93^{0,08}$$

$$IQA_{NSF} = 2,1291 \times 1,6245 \times 1,6994 \times 1,3555 \times 1,5557 \times 1,4941 \times 1,3355 \times 1,4172 \times 1,5734$$

$$IQA_{NSF} = 55,1481$$

Como o resultado encontrado está no intervalo correspondente a classe **Média** ( $50 < 55,1481 \leq 70$ ), pode ser afirmar que a água do Rio Pimenta Bueno, de acordo com as amostras coletadas no mês de setembro de 2007 para realização do presente trabalho de pesquisa é considerada, de qualidade MÉDIA para o consumo humano, consoante Tabela 4, já apresentada anteriormente e, que para efeitos de facilitar o entendimento do assunto, será reapresentada a seguir:

Tabela 5 – Classificação da água do Rio Pimenta Bueno em setembro de 2007

Classes	Intervalos
Excelente (1)	$90 < IQA \leq 100$
Bom (2)	$70 < IQA \leq 90$
Médio (3)	$50 < IQA \leq 70$ IQA Rio P.Bueno set/07
Ruim (4)	$25 < IQA \leq 50$
Muito ruim (5)	$00 < IQA \leq 25$

Fonte: (18), adaptado pelo autor

### 3.11 CÁLCULO DO IQA USANDO O SOFTWARE SIMULADOR SICQA

Como pôde ser observado, o cálculo do IQA demanda inúmeras operações matemáticas com certo grau de complexidade em suas execução. Exige-se ainda, que para cada valor observado para um determinado parâmetro há a necessidade de que o elemento humano decida qual das equações usar para aquele caso específico. Além disso, o próprio rigor para se realizar os cálculos levam a certa possibilidade de erros. Adicione-se ainda, que a demora para se realizar este número de operações de forma manual inviabiliza a realização de um grande

número de simulações. Todo este conjunto de limitadores impulsionaram o pesquisador a produzir, como produto do processo investigatório, um *software* para o cálculo do IQA que está apresentado a seguir, de forma sucinta.

O *software* foi construído em linguagem Java e tem como requisitos computacionais mínimos: Sistema Operacional Windows<sup>®</sup> 98 ou superior, 128 MB de Memória RAM ou superior e Máquina Virtual Java 1.4 ou superior. A utilidade deste *software* é conferir grande velocidade ao cálculo do IQA, com eliminação da possibilidade de erros de natureza formal e lógica.

**Cálculo dos quocientes**

Oxigênio Dissolvido - OD (%OD)  
0.17 quociente 1

Coliformes Fecais ou Termotolerantes (N)  
0.15 quociente 2

Potencial Hidrogeniônico (pH)  
0.12 quociente 3

Demanda Bioquímica de Oxigênio - DBO  
0.10 quociente 4

Nitratos (mg/L NO<sub>3</sub>)  
0.10 quociente 5

Fosfatos (mg/L PO<sub>4</sub>)  
0.10 quociente 6

**Nível de Qualidade da Água**

Resultado conforme Pesos e Quocientes

Calcular IQA IQA = ?

Excelente	90 < IQA <= 100
Bom	70 < IQA <= 90
Médio	50 < IQA <= 70
Ruim	25 < IQA <= 50
Muito Ruim	0 <= IQA <= 25

Turbidez (uT)  
0.08 quociente 7

Resíduos Sólidos (mg/L)  
0.08 quociente 8

Variação da Temperatura (Celsius)  
0.10 quociente 9

Figura 13 – Interface do *software* SICQA para cálculo do IQA

Em sua concepção, teve-se o cuidado de permitir que os pesos de cada parâmetro pudessem ser alterados de acordo com a necessidade, ou de acordo com o que recomenda a literatura que fundamenta o assunto.

Para bem ilustrar, na Figura 14, os quatro primeiros parâmetros tiveram seus respectivos pesos alterados aleatoriamente, apenas com o objetivo de demonstrar a funcionalidade do que se está comentando.

**SICQA - SISTEMA PARA CÁLCULO DO ÍNDICE DE QUALIDADE DA ÁGUA (IQA)**

**Cálculo dos quocientes**

Oxigênio Dissolvido - OD (%OD)  **quociente 1**

Coliformes Fecais ou Termotolerantes (N)  **quociente 2**

Potencial Hidrogeniônico (pH)  **quociente 3**

Demanda Bioquímica de Oxigênio - DBO  **quociente 4**

Nitratos (mg/L NO<sub>3</sub>)  **quociente 5**

Fosfatos (mg/L PO<sub>4</sub>)  **quociente 6**

Turbidez (uT)  **quociente 7**

Resíduos Sólidos (mg/L)  **quociente 8**

Variação da Temperatura (Celsius)  **quociente 9**

**Nível de Qualidade da Água**

Resultado conforme Pesos e Quocientes

**Calcular IQA**    **IQA = ?**

Excelente	90 < IQA <= 100
Bom	70 < IQA <= 90
Médio	50 < IQA <= 70
Ruim	25 < IQA <= 50
Muito Ruim	0 <= IQA <= 25

Figura 14 – SICQA com pesos modificados para os quatro primeiros parâmetros

Na etapa seguinte foi feita a inserção dos mesmos valores do mês de setembro de 2007 que foram utilizados para o cálculo do IQA já apresentado anteriormente e, como é de se esperar, os resultados do cálculo de cada parâmetro, bem como, o resultado final do IQA é o mesmo já calculado manualmente, passo a passo. Foram feitas inúmeras simulações e o *software* demonstrou robustez, tendo apresentado sempre as mesmas respostas que já haviam sido calculadas pela metodologia convencional. Assim, validou-se a ferramenta que de ora em diante passará a ser utilizada para calcular o IQA de acordo com as regras estabelecidas pela *NSF* e que são baseadas na lógica clássica.

Ao serem inseridas as informações requeridas pelo sistema concebido e clicar na opção calcular IQA, este retorna um valor numérico entre 0 e 100, bem como, a classificação da água, de acordo com a tabela da *NSF*, que classifica a água em 5 níveis que variam entre muito ruim, ruim, médio, bom e excelente. O valor e a classificação são apresentados em cor destacada, para facilitar a visualização (vide Figura 15 seguinte).

**SICQA - SISTEMA PARA CÁLCULO DO ÍNDICE DE QUALIDADE DA ÁGUA (IQA)**

**Cálculo dos quocientes**

Oxigênio Dissolvido - OD (%OD)

0.17  q1 = 85.23181156625728

Coliformes Fecais ou Termotolerantes (NMP/100mL)

0.15  q2 = 25.40043922527473

Potencial Hidrogeniônico (pH)

0.12  q3 = 83.01609410269657

Demanda Bioquímica de Oxigênio - DBO (mg/L)

0.10  q4 = 20.950257447000006

Nitratos (mg/L NO3)

0.10  q5 = 83.08500000000001

Fosfatos (mg/L PO4)

0.10  q6 = 55.445365202103076

**Nível de Qualidade da Água**

Resultado conforme Pesos e Quocientes

IQA = 55,1481874606812

Excelente 90 < IQA <= 100  
 Bom 70 < IQA <= 90  
 Médio 50 < IQA <= 70  
 Ruim 25 < IQA <= 50  
 Muito Ruim 0 <= IQA <= 25

Turbidez (uT)

0.1  q7 = 37.232767037327115

Resíduos Sólidos (mg/L)

0.08  q8 = 78.16980734430264

Varição da Temperatura (Celsius)

0.08  q9 = 93.0

Figura 15 – Cálculo do  $IQA_{NSF}$  do mês de setembro de 2007 utilizando o SICQA

Os dados inseridos neste caso, que geraram um resultado para o IQA igual a 55,14 e uma classificação final **média** para a água foram os mesmos utilizados para o cálculo manual anteriormente apresentado e, portanto, tem-se os mesmos resultados finais, o que, aliado a outras inúmeras simulações, além da comparação com o resultado obtido com o MATLAB<sup>®</sup> para os mesmos valores de parâmetros e que estão adiante apresentados, levam a validação da ferramenta para fins de utilização nestes e outros estudos, que se fizerem necessários.

Na situação representada pela Figura 16, são inseridos valores hipotéticos aleatórios para cada um dos parâmetros que compõe o IQA, de modo a obter um valor próximo à fronteira inferior do conjunto definido pela tabela como excelente. Como já exaustivamente descrito, os conjuntos baseados na lógica clássica tem fronteiras rigidamente definidas e, neste caso particular, as fronteiras são:

$$IQA = \{Excelente\} \Leftrightarrow IQA \in ]90,100]$$

Ou ainda, para melhor entendimento pode se dizer que a água só pode ser classificada como excelente se o resultado do IQA for um valor numérico maior que 90 e menor ou igual a 100. Com notação matemática pode-se dizer que:

$$Água = Excelente \Leftrightarrow 90 < IQA \leq 100$$

Pede-se especial atenção para os campos circulados em vermelho, pois é feita uma simulação, alterando-se o valor do parâmetro destacado e em torno desta manipulação é que se tecerá comentários e que se desenvolverá, o que talvez seja, o cerne deste estudo.

**SICQA - SISTEMA PARA CÁLCULO DO ÍNDICE DE QUALIDADE DA ÁGUA (IQA)**

**Cálculo dos quocientes**

Oxigênio Dissolvido - OD (%OD)  
0.17 q1 = 99.85274176803954

Coliformes Fecais ou Termotolerantes (NMP/100mL)  
0.15 q2 = 78.31126812534939

Potencial Hidrogeniônico (pH)  
0.12 q3 = 91.3285979999996

Demanda Bioquímica de Oxigênio - DBO (mg/L)  
0.10 q4 = 93.697589329

Nitratos (mg/L NO3)  
0.10 q5 = 95.58

Fosfatos (mg/L PO4)  
0.10 q6 = 87.61122376725812

**Quociente da Turbidez (uT)**

Indique a Turbidez (uT) 3.3

RESULTADO =

CALCULAR PREENCHER Q7

**Nível de Qualidade da Água**

Resultado conforme Pesos e Quocientes

Calcular IQA **IQA = 90.00130979624755**

Excelente 90 < IQA <= 100  
Bom 70 < IQA <= 90  
Médio 50 < IQA <= 70  
Ruim 25 < IQA <= 50  
Muito Ruim 0 <= IQA <= 25

Turbidez (uT)  
0.08 q7 = 88.7434496662507

Resíduos Sólidos (mg/L)  
0.08 q8 = 81.39181571015669

Varição da Temperatura (Celsius)  
0.10 q9 = 93.0

Figura 16 – IQA com resultado próximo a fronteira inferior do conjunto excelente

Na situação representada pela Figura 17 foi alterado apenas o valor do parâmetro turbidez em destaque, em uma casa decimal, elevando-o, de 3,3 uT para 3,4 uT. Contudo, esta pequena alteração de um décimo, fez com que o nível de classificação da água fosse rebaixado da categoria “excelente” (90,001) para a categoria “bom” (89,9737), haja vista, a forma de manipulação dos valores à luz da lógica clássica, que promove uma passagem abrupta de uma categoria para outra.

**SICQA - SISTEMA PARA CÁLCULO DO ÍNDICE DE QUALIDADE DA ÁGUA (IQA)**

**Cálculo dos quocientes**

Oxigênio Dissolvido - OD (%OD)  
0.17 q1 = 99.85274176803954

Coliformes Fecais ou Termotolerantes (NMP/100mL)  
0.15 q2 = 78.31126812534939

Potencial Hidrogeniônico (pH)  
0.12 q3 = 91.3285979999996

Demanda Bioquímica de Oxigênio - DBO (mg/L)  
0.10 q4 = 93.697589329

Nitratos (mg/L NO3)  
0.10 q5 = 95.58

Fosfatos (mg/L PO4)  
0.10 q6 = 87.61122376725812

**Quociente da Turbidez (uT)**

Indique a Turbidez (uT) 3.4

RESULTADO =

CALCULAR PREENCHER Q7

**Nível de Qualidade da Água**

Resultado conforme Pesos e Quocientes

Calcular IQA **IQA = 89.97377671669597**

Excelente 90 < IQA <= 100  
Bom 70 < IQA <= 90  
Médio 50 < IQA <= 70  
Ruim 25 < IQA <= 50  
Muito Ruim 0 <= IQA <= 25

Turbidez (uT)  
0.08 q7 = 88.40469250320183

Resíduos Sólidos (mg/L)  
0.08 q8 = 81.39181571015669

Varição da Temperatura (Celsius)  
0.10 q9 = 93.0

Figura 17 – IQA com resultado próximo a fronteira superior do conjunto bom

O que se pretende ao longo dos próximos capítulos, é apresentar uma forma alternativa de tratamento destas variações de valores dos parâmetros, sem permitir que uma variação ínfima como a que acaba de ser ilustrada concorra para a imprecisa interpretação dos resultados. Para tanto, propõe-se, como objetivo, a implementação de um sistema *fuzzy*, baseado na lógica de mesmo nome, que irá criar um novo IQA, para fazer a classificação da água, utilizando como fonte de informações as mesmas utilizadas para o cálculo do  $IQA_{NSF}$ .

Como em ambientes regidos pela lógica *fuzzy* não há uma definição rígida de fronteiras para os conjuntos, a passagem é realizada de forma gradual de um nível classificatório para outro, com a definição de seu grau de pertinência a cada um dos conjuntos estabelecidos. No caso do exemplo anterior a água não seria rebaixada da categoria “excelente” para “bom” e sim, apenas diminuiria seu grau de pertinência em uma e aumentaria na outra.

#### 4 PROPOSTA DE UM NOVO IQA BASEADO NA LÓGICA FUZZY (IQA<sub>FUZZY</sub>)

Os resultados do novo IQA<sub>fuzzy</sub> proposto foram utilizados para fazer uma nova classificação da qualidade das mesmas amostras de água do rio Pimenta Bueno, de acordo com a mesma tabela de classificação da *NSF*, no entanto, sob a ótica de um novo modelo baseado em uma nova lógica, que “considera os graus de pertinência de um determinado elemento a um certo conjunto, levando-se em consideração as variáveis linguísticas utilizadas no sistema implementado” (60), rompendo-se com a lógica clássica utilizada na classificação da qualidade da água.

A classificação da água efetuada pela aplicação direta dos resultados do cálculo do IQA na tabela da *NSF*, que por sua vez, promove uma mudança abrupta de uma classe para outra, baseada nos parâmetros da lógica clássica vigente. Os resultados do IQA<sub>NSF</sub> deverão ser diferentes dos resultados do IQA<sub>fuzzy</sub> obtidos por meio do sistema de inferência, cuja principal característica é a flexibilização e a aceitação de uma pertinência relativa de um elemento a um conjunto, garantindo uma passagem suave e gradual de uma categoria (excelente, bom, médio,...) para outra.

Quanto à validade da utilização da lógica para suportar o modelo proposto, pela própria robustez, inúmeras aplicações práticas, científicas e tecnológicas com resultados já comprovados e por toda a revolução no campo da inteligência artificial já provocada pelos sistemas baseados na lógica *fuzzy* (10, 32, 60, 63 e 93), é possível assegurar a funcionalidade, fidedignidade e validade da lógica.

Para testar e validar a funcionalidade o IQA<sub>fuzzy</sub>, objeto maior desta proposta, foram feitas simulações alterando os dados de entrada e observando o comportamento dos dados de saída, verificando se ele garante resultados diferentes dos obtidos pelo IQA<sub>NSF</sub>, que pode ser entendido como IQA de referência (grupo de controle), porém, as médias dos dois tipos de IQA's não devem ser significativamente diferentes, tendo ainda como referência as curvas de cada parâmetro estabelecidas pela *NSF*, portaria M.S. 518/2004 (86) e a Resolução n. 357/2005 CONAMA (87), que regem a matéria.

Para melhor visualização do delineamento proposto no presente trabalho, apresenta-se um fluxograma atualizado das atividades a serem desenvolvidas:

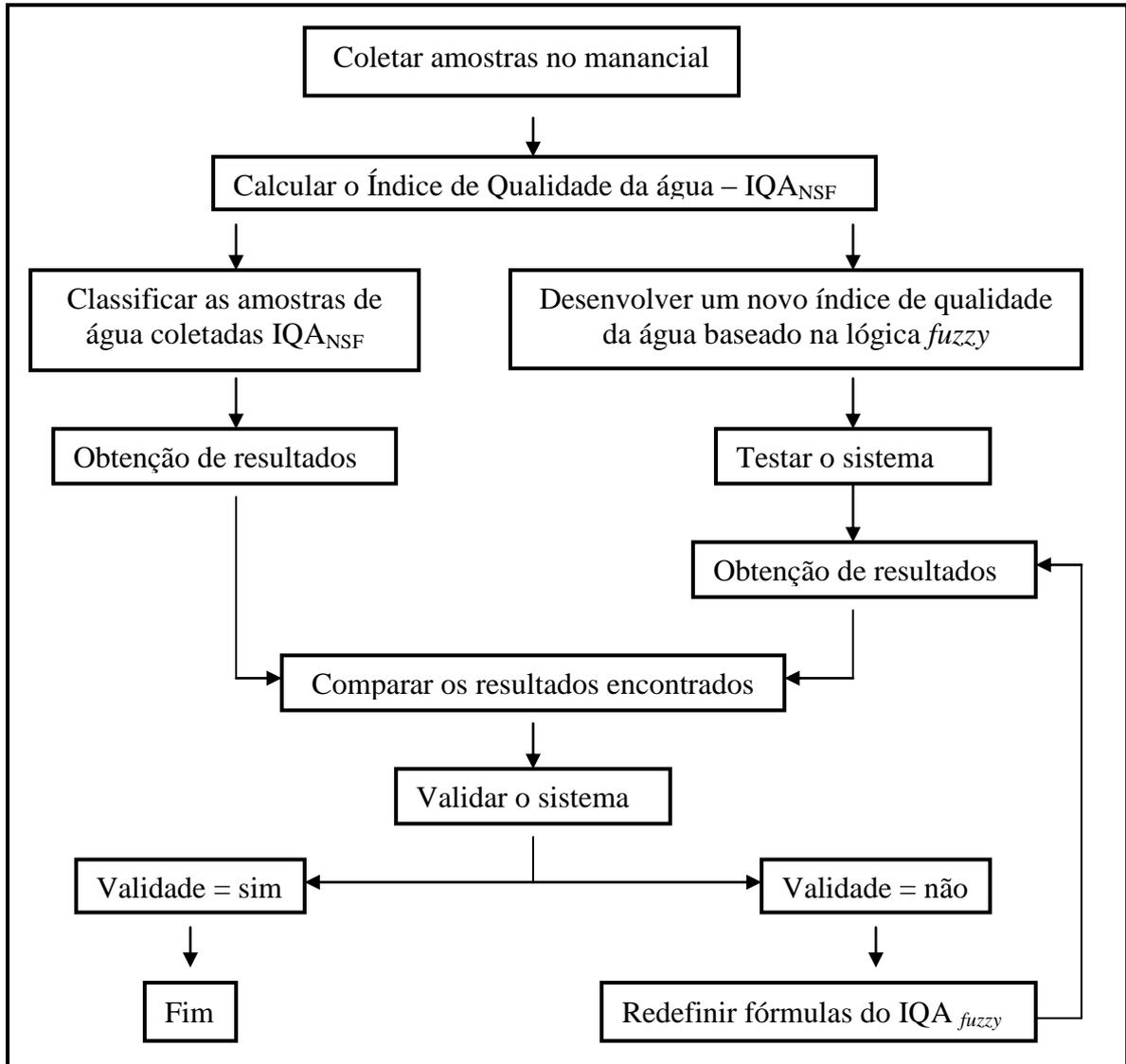


Figura 18 – Fluxograma das atividades de pesquisa

O sistema apresentado está subdividido em três grupos. O primeiro grupo de parâmetros é formado por Oxigênio Dissolvido (OD), Coliformes Totais (CT) e Potencial Hidrogeniônico (pH), formando o nível alto (*High Level*). O segundo grupo é formado por Demanda Bioquímica de Oxigênio (DBO), Nitratos Totais (NO<sub>3</sub>), Fosfatos Totais (PO<sub>4</sub>) e Variação de Temperatura, formando o nível médio (*Middle Level*). Por último, no nível denominado baixo (*Low Level*) estão os parâmetros de Turbidez (Tu) e Sólidos Totais (ST).

A composição destes grupos teve como premissa para sua definição os pesos de cada um desses parâmetros na tabela definida pela *NSF*, ou seja, os parâmetros que compuseram o *High Level*, *Middle Level*, *Low Level*, são os de peso mais elevado, peso mediano e de menor peso, respectivamente.

Quanto à base de regras, foram formuladas as seguintes quantidades para cada um dos níveis:

*High level*: 125 regras ( $5^3$ )

*Middle level*: 625 regras ( $5^4$ )

*Low level*: 25 regras ( $5^2$ )

Estes três grupos recebem entradas *crisp*, que são processados pela máquina de inferência *fuzzy*, produzindo três saídas *fuzzy*. Estas por sua vez, são reprocessadas por uma nova máquina de inferência *fuzzy*, que recebe as três saídas das primeiras máquinas. A base de regras da segunda máquina é composta por 125 regras de agregação. Depois desta última inferência ocorre o processo de *defuzzificação* que produz e entrega uma saída *crisp*, que é o resultado do IQA *fuzzy*, compreensível para os usuários do sistema.

O sistema construído utiliza como regra de inferência o método de *Mamdani*. Para *defuzzificação* foi utilizado o método de centroide (centro área), regra do mínimo para o método de implicação e regra do máximo para a o método de agregação. Este sistema foi construído de forma a permitir três tipos de avaliações simultâneas, sendo possível, a partir das mesmas entradas *crisp's* produzir três resultados diferentes. O primeiro deles é a partir da implementação das equações preconizadas pela *NSF*, ou seja, é o IQA tradicional e mundialmente utilizado. O segundo resultado deriva de uma inferência *fuzzy*, que se utilizada de funções de agregação triangulares e trapezoidais, convenientemente combinadas, de modo a fornecer um resultado numérico para o IQA *fuzzy*. O terceiro e último modelo oferece um resultado pautado pela aplicação das funções Gaussianas de agregação *fuzzy*.

A Figura seguinte mostra a configuração do sistema de inferência *fuzzy*:

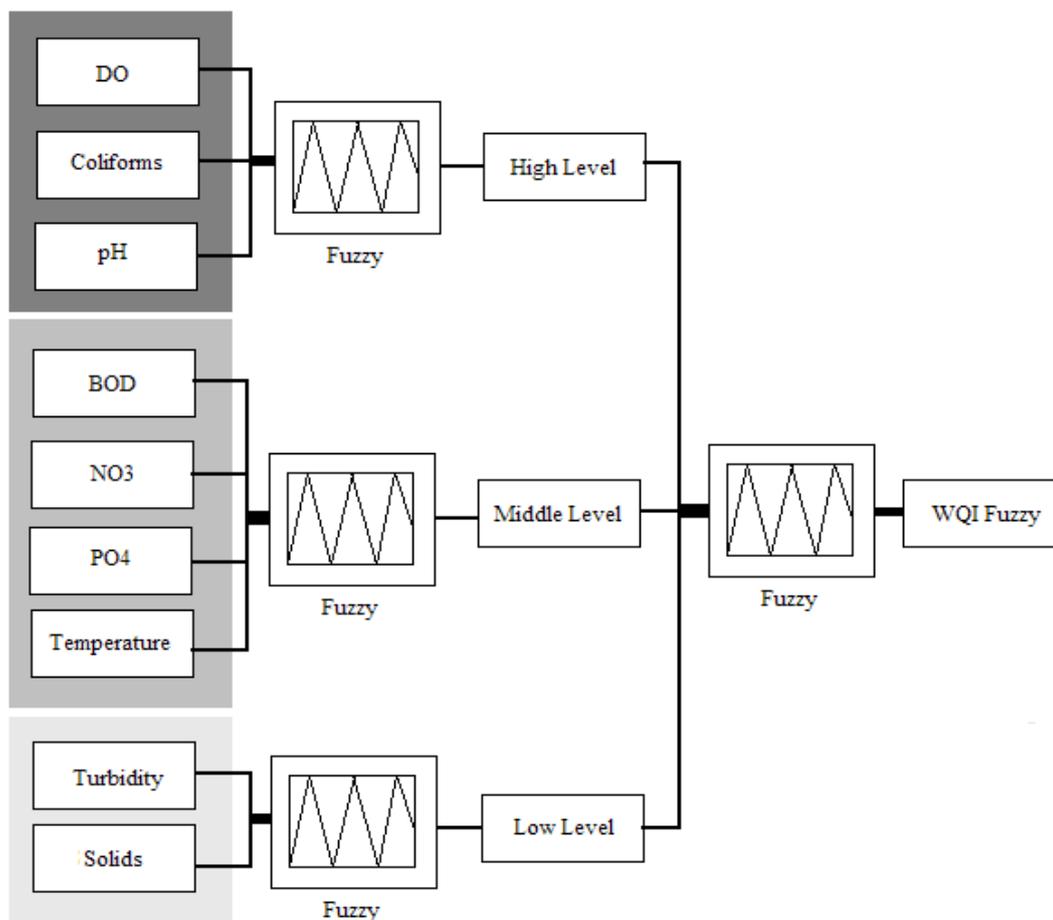


Figura 19 – Fluxograma do sistema de inferência *fuzzy*

Os dois modelos *fuzzy* foram configurados obedecendo ao mesmo fluxograma de inferência já apresentado. A diferença entre os dois reside nas funções de agregação que foram utilizadas. Para efeito deste estudo, um dos sistemas é denominado *tritrapp* ( $IQA_{tritrapp}$  que se utiliza de funções triangulares e trapezoidais) e o outro de Gaussiano ( $IQA_{Gauss}$  que se utiliza de funções Gaussianas).

As regras construídas seguem o modelo que contém a parte antecedente (Se OD Excelente *and* Coliformes Fecais Excelente *and* Potencial Hidrogeniônico Excelente *and* Demanda Bioquímica de Oxigênio Excelente *and* Nitrato Excelente *and* Fosfato Total Excelente *and* Variação da Temperatura da Água Excelente *and* Turbidez Excelente *and* Sólidos Totais Excelente) e outra consequente (Então o IQA Excelente). A base de regras em sua íntegra está apresentada no Anexo B.

A seguir exemplifica-se como se constituiu o módulo base de regras a partir do editor do *tolbox fuzzy* do MATLAB®. Foram definidas 900 regras, cada uma delas com a estrutura semelhante a apresentada na Figura 20, sendo capazes de colocar em funcionamento as máquinas do primeiro e segundo nível de processamento.

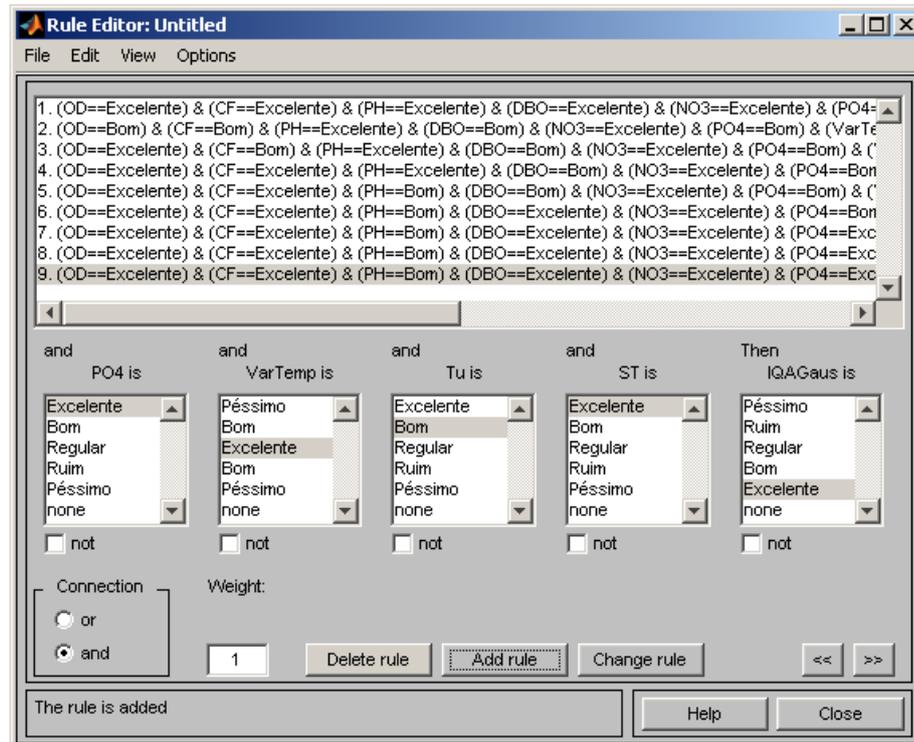


Figura 20 – Construção das regras de inferência

#### 4.1 FUNÇÕES DE AGREGAÇÃO DO IQA FUZZY

Todas as funções de agregação (*mf's*) com os seus respectivos limites (fronteiras), para cada um dos parâmetros que compõe o  $IQA_{fuzzy}$ , tanto para o sistema *tritrap* quanto para o Gaussiano são apresentadas nesta secção.

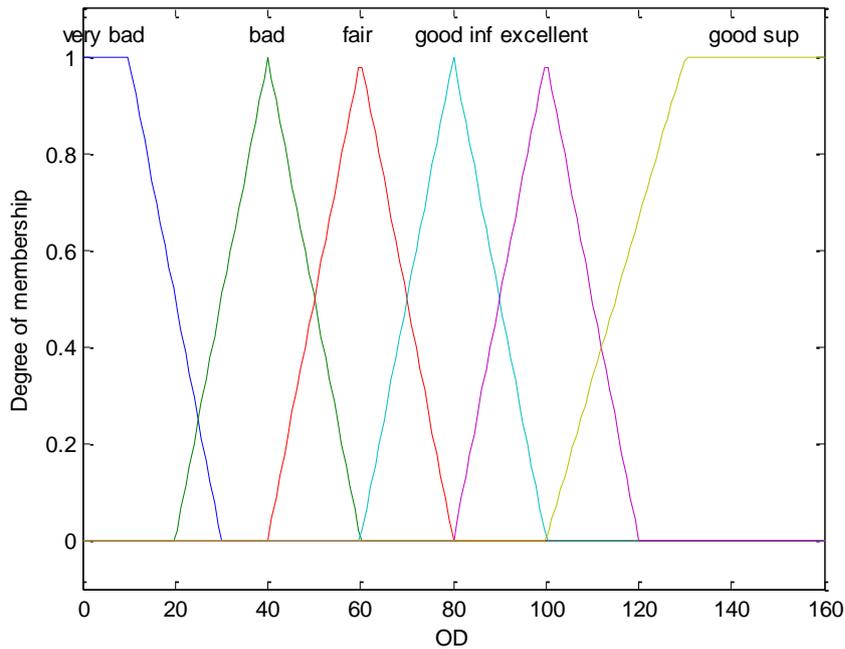


Figura 21 – Funções triangulares e trapezoidais do parâmetro oxigênio dissolvido

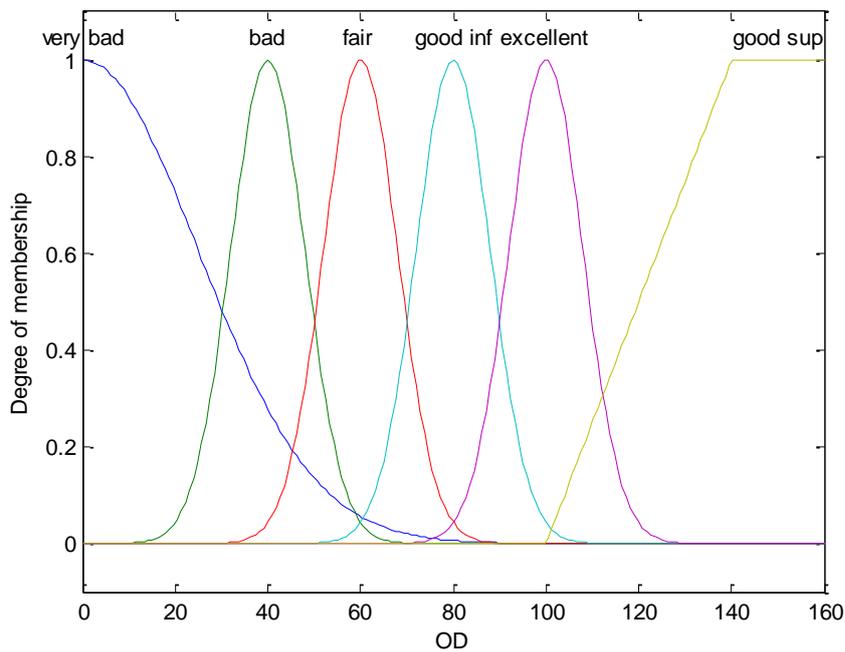


Figura 22 – Funções gaussianas do parâmetro oxigênio dissolvido

Para este parâmetro foram definidos seis conjuntos, porém eles foram mapeados em cinco estados. Tal situação decorre do fato de que o estado *good* tem nível superior e inferior (*good inf* e *good sup*). Lançou-se mão deste recurso para garantir aceitação de valores superiores a 100, contudo, de acordo com a curva de valoração da condição do OD, divulgada por Brasil (18), observa-se que para

valores superiores a 100, valor do parâmetro ( $qs$ ) decresce, sendo assim, esses valores foram incluídos no estado *good* e não *excellent*.

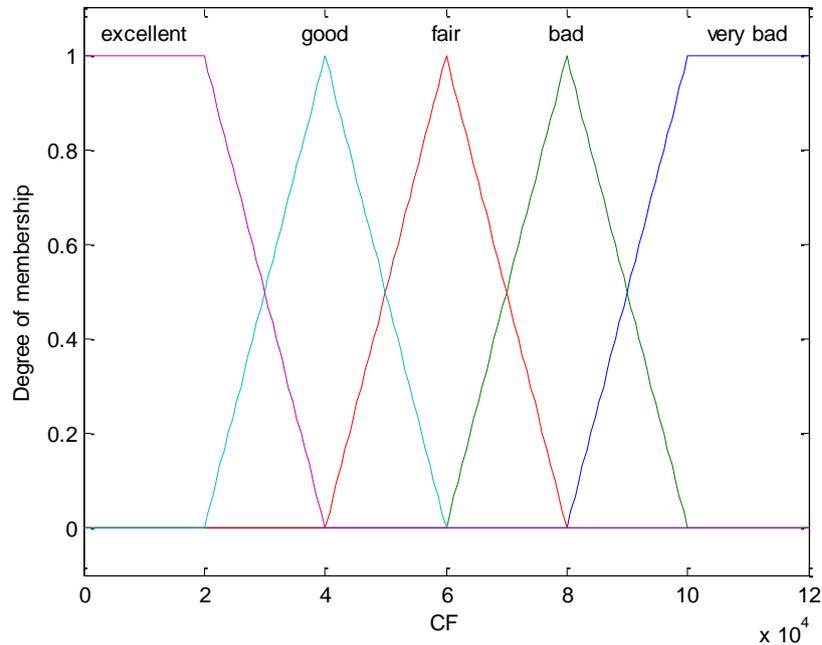


Figura 23 – Funções triangulares e trapezoidais do parâmetro coliformes fecais

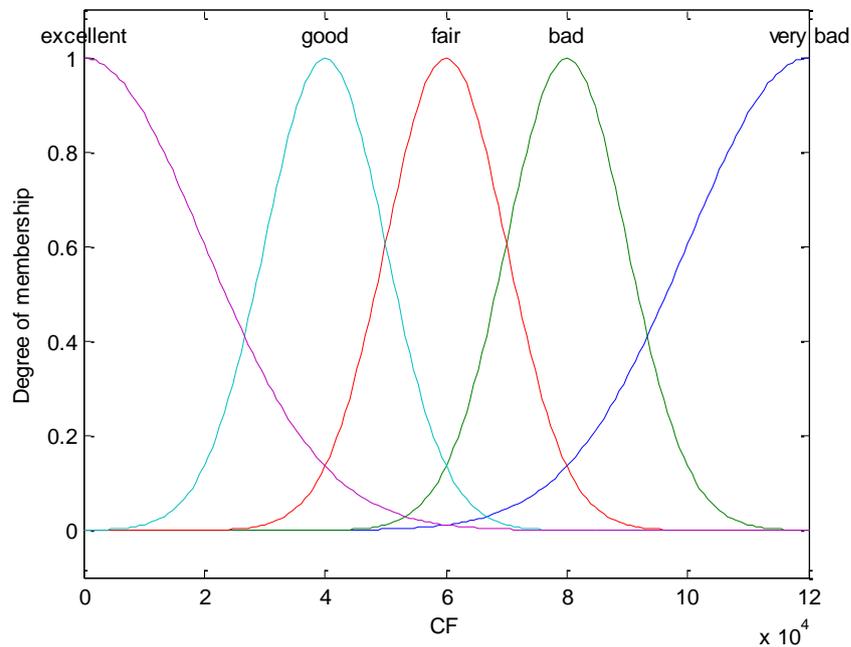


Figura 24 – Funções gaussianas do parâmetro coliformes fecais

Para o  $qs$  coliformes fecais foram definidos 5 (cinco) conjuntos e igual número de estados. Ressalte-se, que de acordo com a curva de valoração deste parâmetro, o valor esperado deste parâmetro é o mais próximo possível de zero.

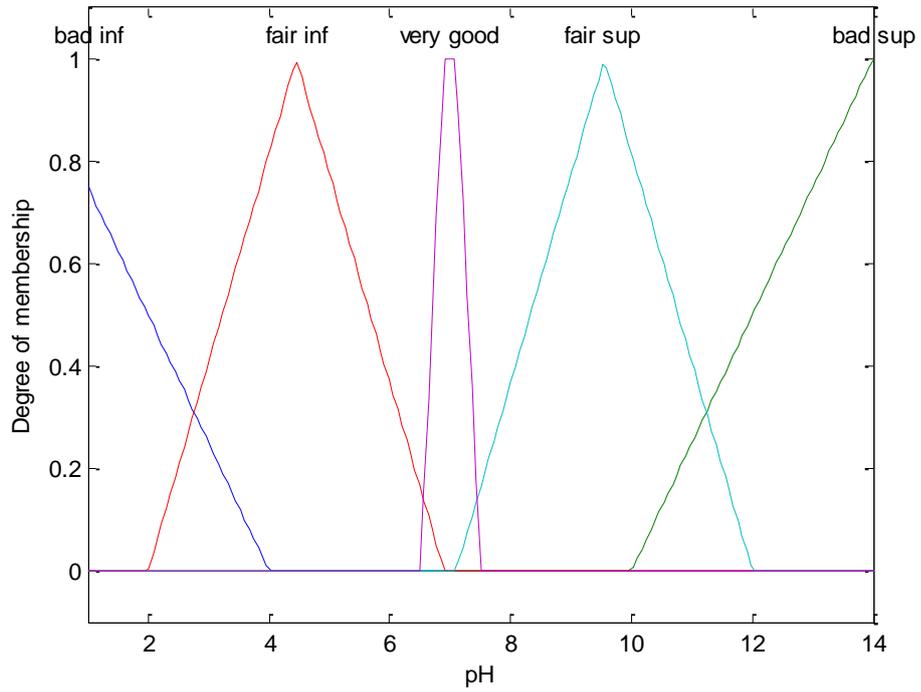


Figura 25 – Funções triangulares e trapezoidais do parâmetro pH

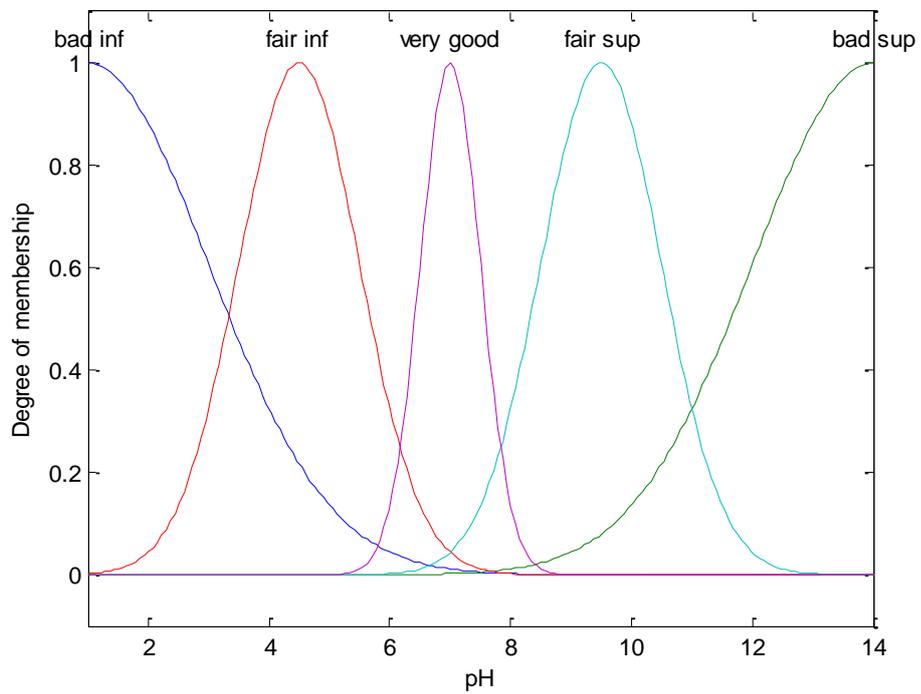


Figura 26 – Funções gaussianas do parâmetro potencial hidrogeniônico

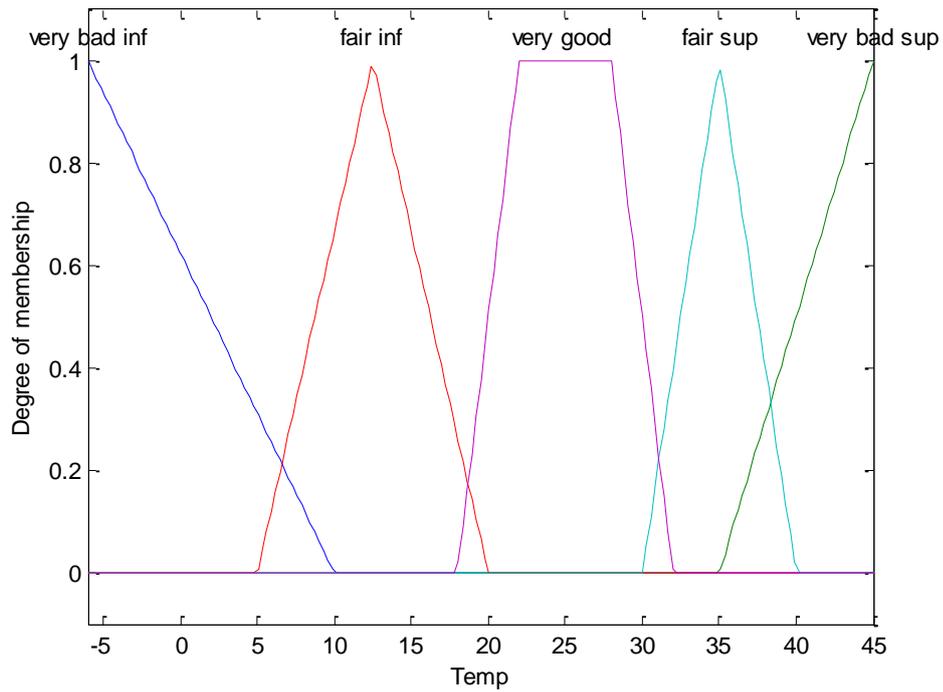


Figura 27 – Funções triangulares e trapezoidais do parâmetro temperatura

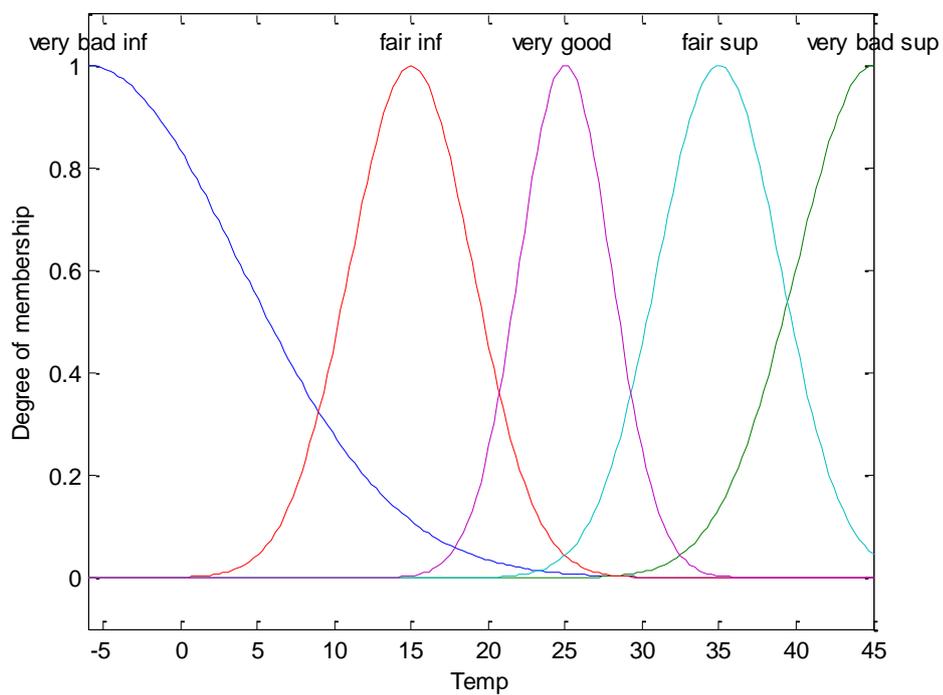


Figura 28 – Funções gaussianas do parâmetro temperatura

Especial atenção deve ser dado ao fato de que tanto o pH como a Temperatura foram mapeados em 5 (cinco) conjuntos e 3 (três) estados (*bad*, *fair* e *very good*). Explica-se esta diferença entre o número de conjuntos e de estados o

fato de que os valores extremos são igualmente ruins. Para que se tenham 3 estados diferentes existem 5 funções de agregação, 2 pares simétricos e um conjunto central em torno de 7 para o caso do pH e em torno de 25 para o caso da temperatura. Como exemplo, cita-se que para o caso do pH é “igualmente ruim” que o seu valor seja menor que 6, ou maior que 8.

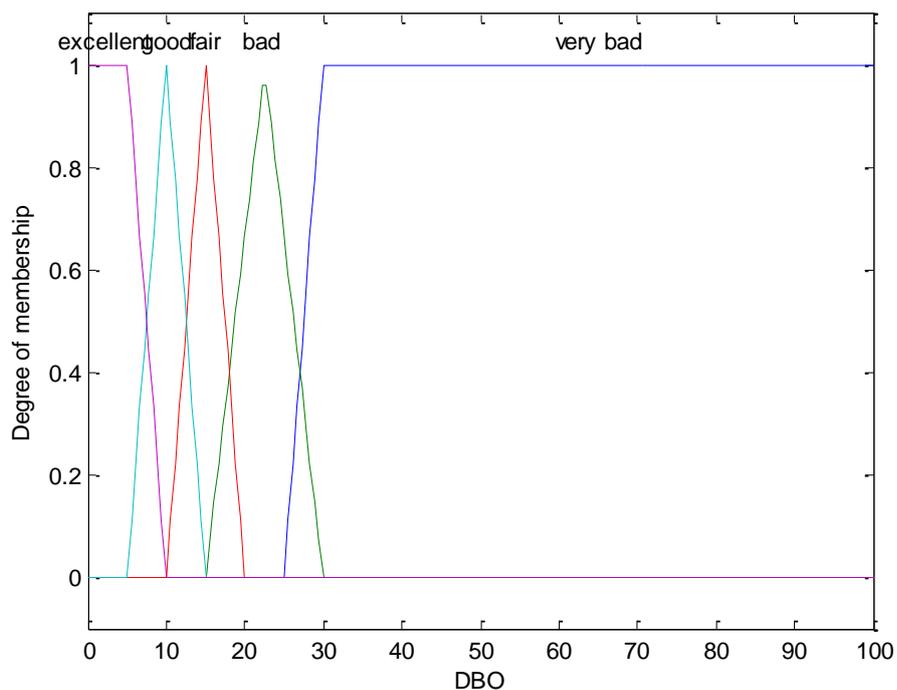


Figura 29 – Funções triangulares e trapezoidais do parâmetro DBO

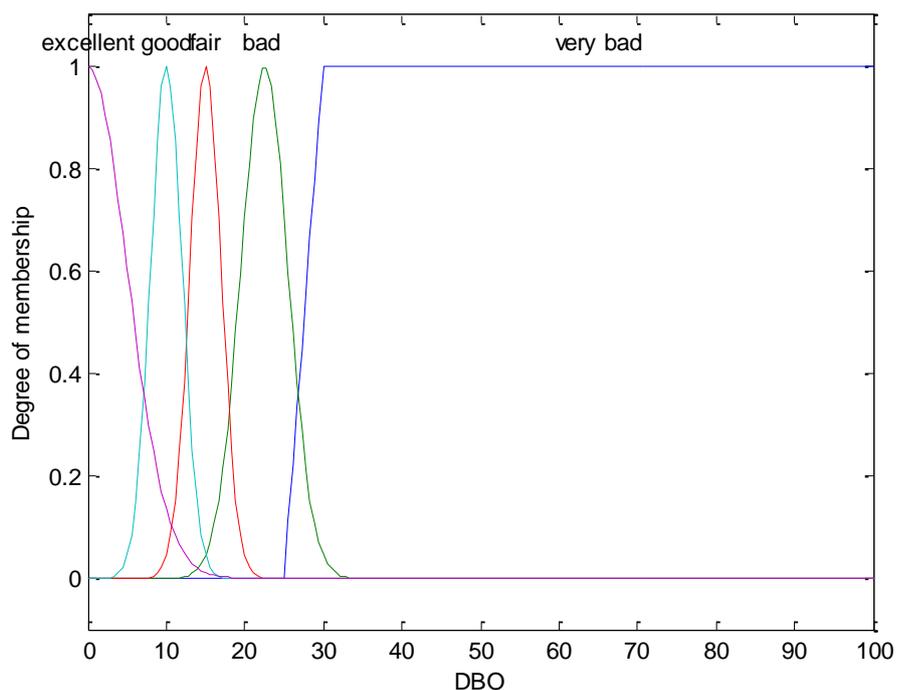


Figura 30 – Funções gaussianas do parâmetro demanda bioquímica de oxigênio

Na Figura 34 o estado *very bad* foi estendido até 100, objetivando aceitar valores maiores do que os previstos na curva de valoração deste parâmetro. Para este caso definiu-se 5 (cinco) conjuntos e igual número de estados, sendo que o valor desejado aquele que se situe o mais próximo de zero quanto possível.

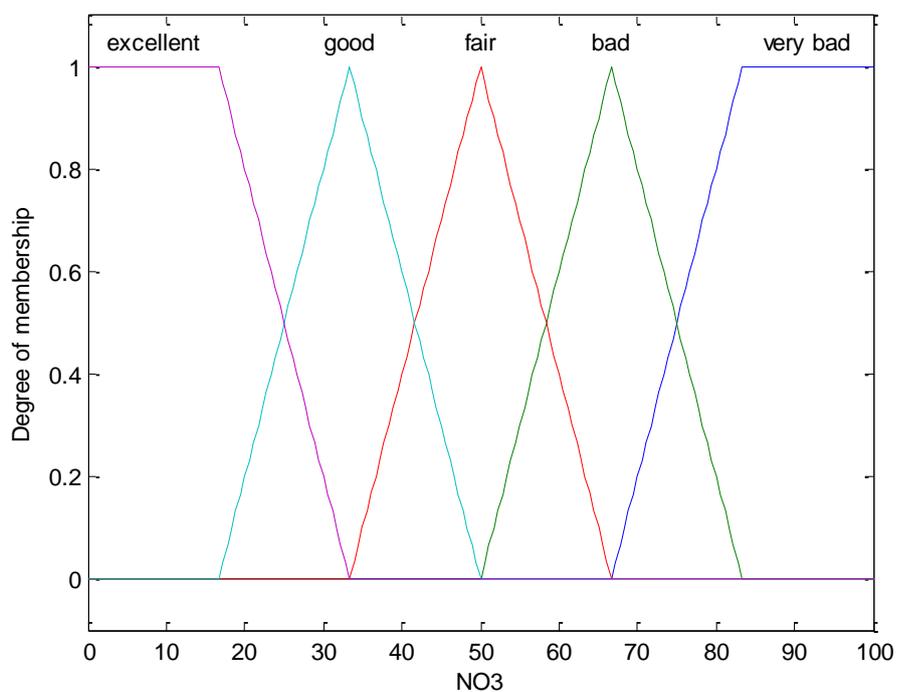


Figura 31 – Funções triangulares e trapezoidais do parâmetro nitratos totais

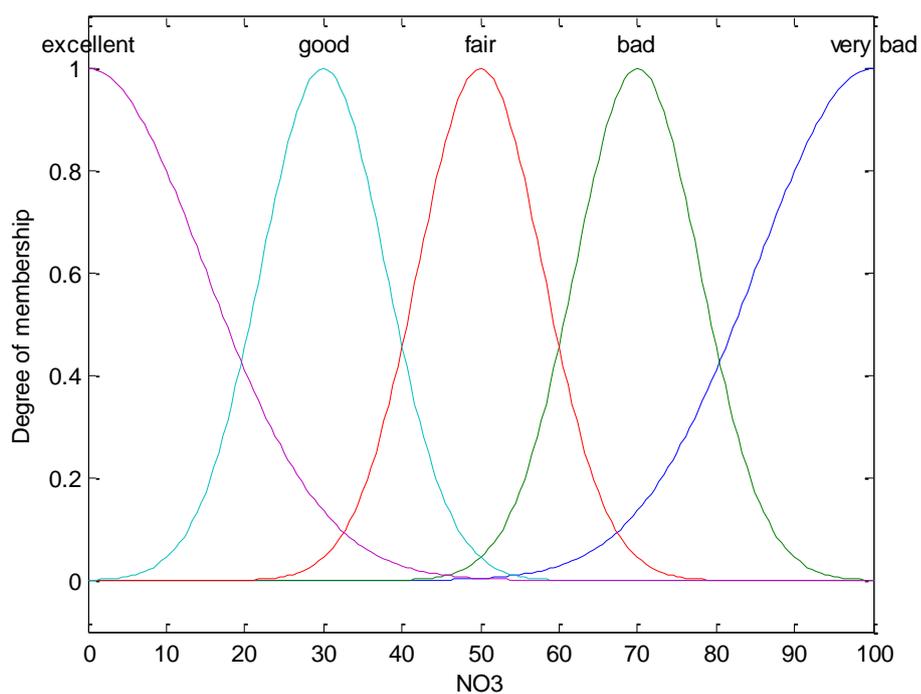


Figura 32 – Funções gaussianas do parâmetro nitratos totais

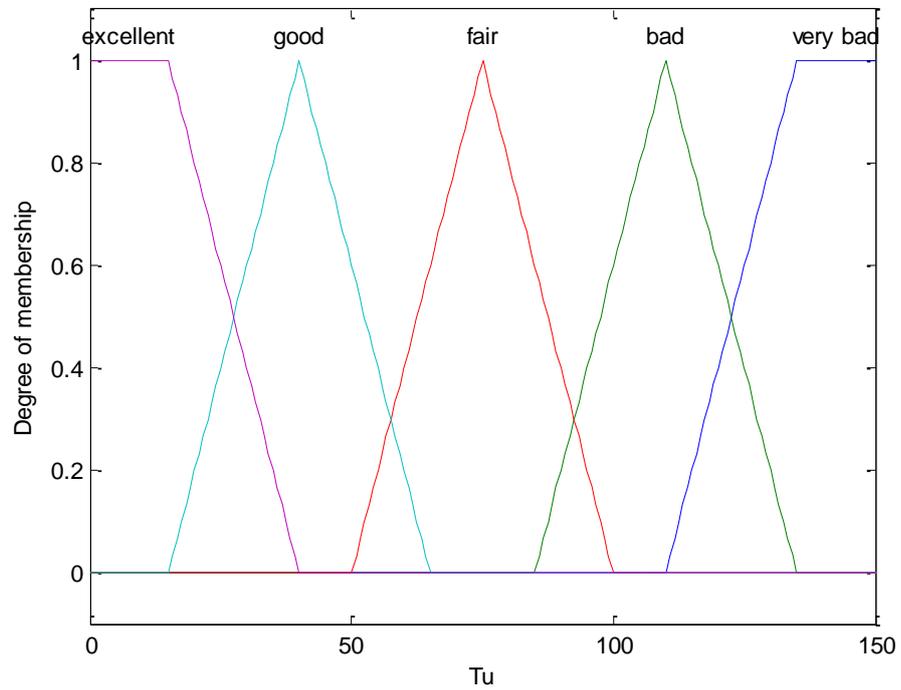


Figura 33 – Funções triangulares e trapezoidais do parâmetro turbidez

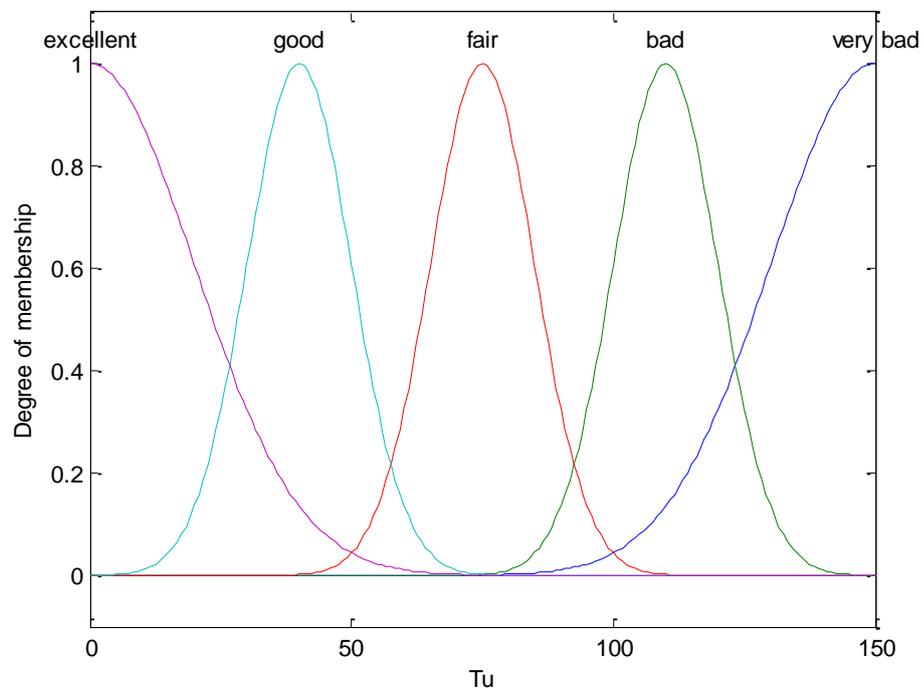


Figura 34 – Funções gaussianas do parâmetro turbidez

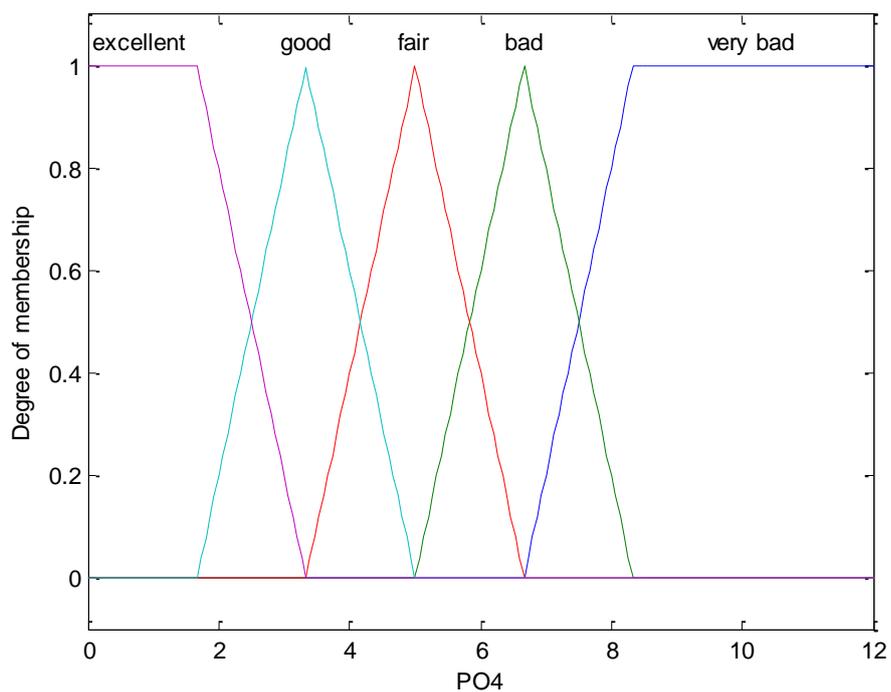


Figura 35 – Funções triangulares e trapezoidais do parâmetro fosfatos totais

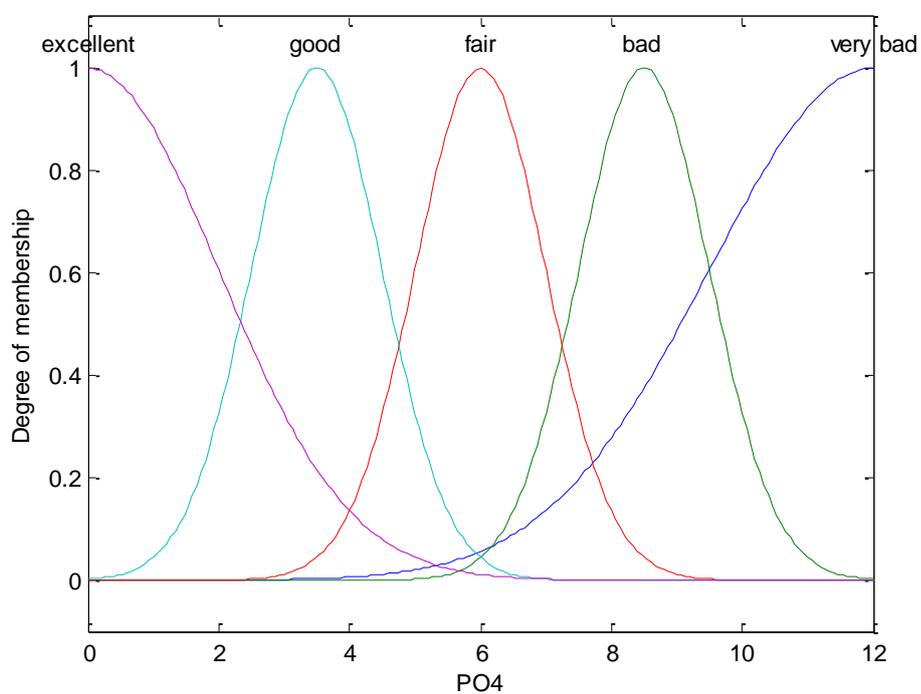


Figura 36 – Funções gaussianas do parâmetro fosfatos totais

Para o caso dos parâmetros Nitratos Totais, Turbidez e Fosfatos Totais o número de conjuntos e de estados são iguais a 5 (cinco), e para o caso destes três

parâmetros o valor mais desejado para uma avaliação positiva da qualidade da água é aquele que mais se aproxime do valor nulo.

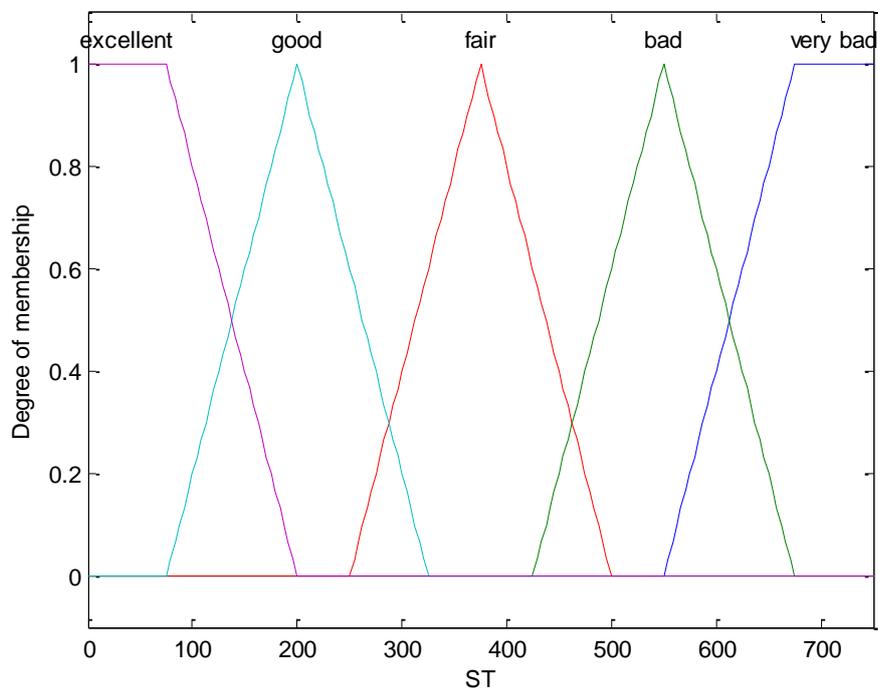


Figura 37 – Funções triangulares e trapezoidais do parâmetro sólidos totais

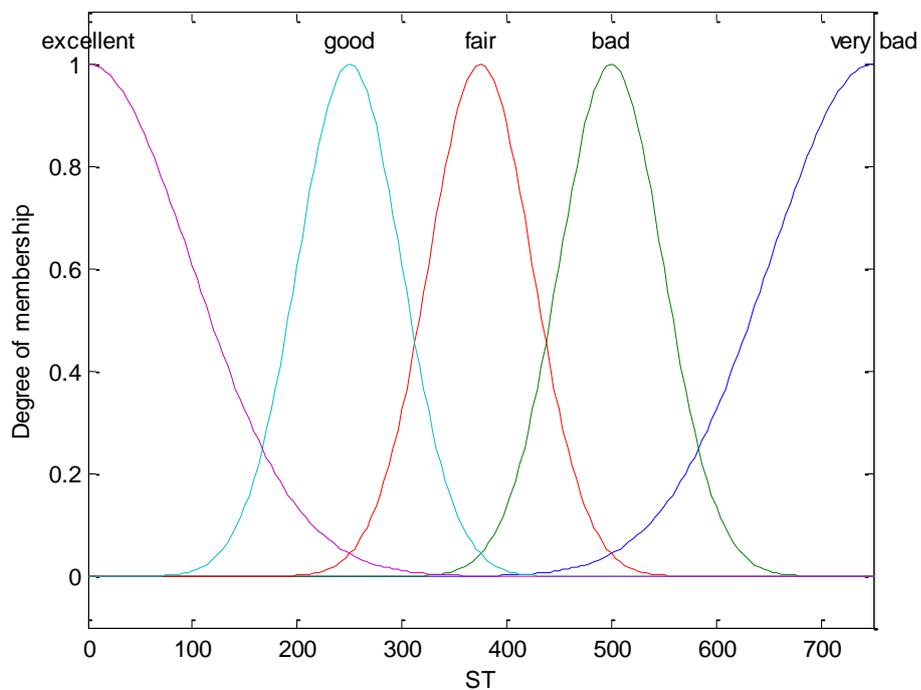


Figura 38 – Funções gaussianas do parâmetro sólidos totais

Este parâmetro foi mapeado em 5 (cinco) conjuntos e (cinco) estados, sendo

que os limites inferiores e superiores foram delimitados tendo como referência a curva da *NSF* para este parâmetro.

A Figura 39 apresenta as funções de pertinência do módulo de saída do sistema *fuzzy* constituído com funções triangulares e trapezoidais. Tal sistema advém da combinação adequada das funções de agregação de cada um dos parâmetros anteriormente apresentados, resultando na máquina de inferência final. Ressalte-se que um mesmo elemento pode pertencer a dois conjuntos simultaneamente, por exemplo, um resultado pode ser parcialmente *bad* e *fair*, com diferentes níveis de pertinência a cada um dos conjuntos, que é a essência da lógica *fuzzy*, na qual está pautado este trabalho.

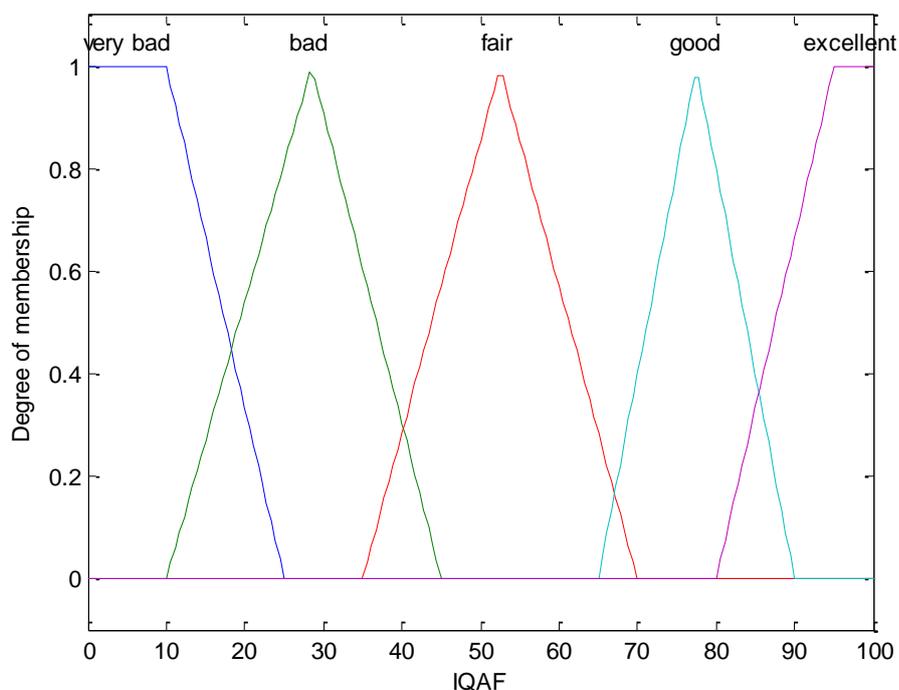


Figura 39 – Funções triangulares e trapezoidais do sistema de inferência *fuzzy*

As funções de pertinência triangulares são caracterizadas por uma terna ( $a$ ,  $b$ ,  $c$ ), onde  $a$  e  $c$  determinam o intervalo dentro do qual a função de pertinência assume valores diferentes de zero, e  $b$  é o ponto onde a função de pertinência é máxima. Já as funções de pertinência trapezoidais são caracterizadas por um conjunto de quatro valores de  $a$ ,  $b$ ,  $c$  e  $d$ , onde  $a$  e  $d$  determinam o intervalo dentro do qual a função de pertinência assume valores diferentes de zero, e  $b$  e  $c$  determinam o intervalo dentro

do qual a função de pertinência é máxima e igual a 1 (um) (33).

Do mesmo modo que a Figura anterior, a Figura 40, apresenta as funções de pertinência do módulo de saída do sistema *fuzzy* concebido, no entanto, neste caso, foram utilizadas funções de pertinência Gaussianas. Estas funções são caracterizadas pela sua média ( $\mu$ ) e seu desvio padrão ( $\sigma$ ). Este tipo de função de pertinência tem um declínio suave e tem valores diferentes de zero para todo domínio da variável estudada.

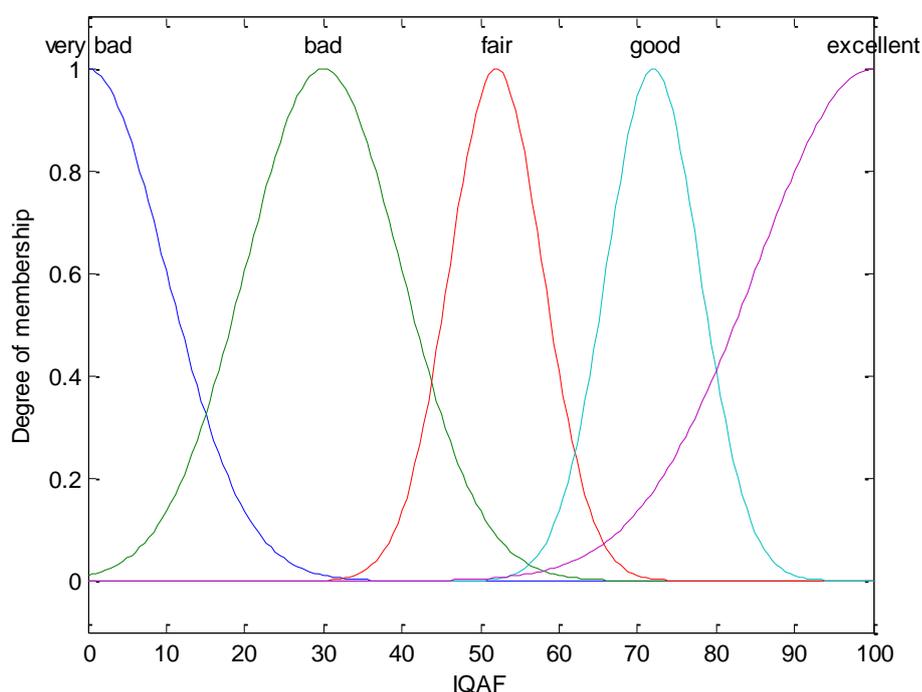


Figura 40 – Funções gaussianas do sistema de inferência *fuzzy*

Os resultados que se obtém da aplicação dos dois sistemas de inferência *fuzzy* são diferentes, em decorrência da aplicação das diferentes funções de pertinência que fazem a agregação dos valores utilizando métodos distintos.

Para fins de bem compreender o tratamento dado pelo sistema Triangular/trapezoidal e o sistema Gaussiano, é feita uma simulação com valores que não são dados deste trabalho. Suponha-se que se tenha uma faixa X que varia entre 3 e 7. Considerando o caso da aplicação dos dois sistemas simultaneamente pode-se definir a faixa graficamente, para uma variável qualquer, da seguinte forma:

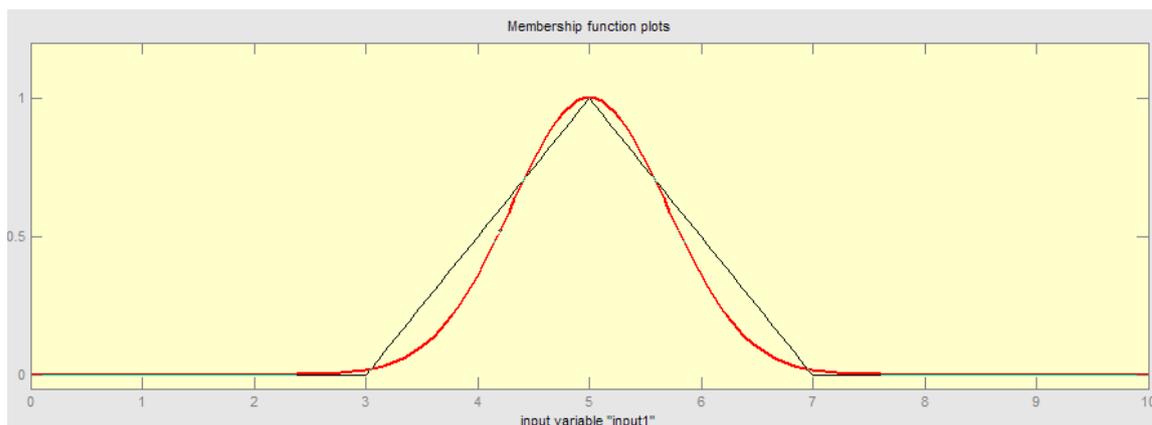


Figura 41 – Comparação das *mf* triangular versus gaussiana

Observa-se que o sistema com funções Gaussianas resulta em maiores valores quando o parâmetro está mais perto de 5 (que teoricamente seria o valor central, ideal) mas na medida em que o parâmetro se afasta de 5, a função triangular começa a ser maior. Isso quer dizer que o sistema Gaussiano é mais “exigente” que o triangular, que ele fornece saídas mais altas quando o parâmetro está mais perto do ideal e saídas menores, quando mais longe do valor ideal. Isso pode ser considerada uma vantagem em relação ao sistema triangular, o que será discutido de forma mais detalhada adiante.

Para expor uma vantagem do sistema *tritrap*, considere-se a seguinte Figura:

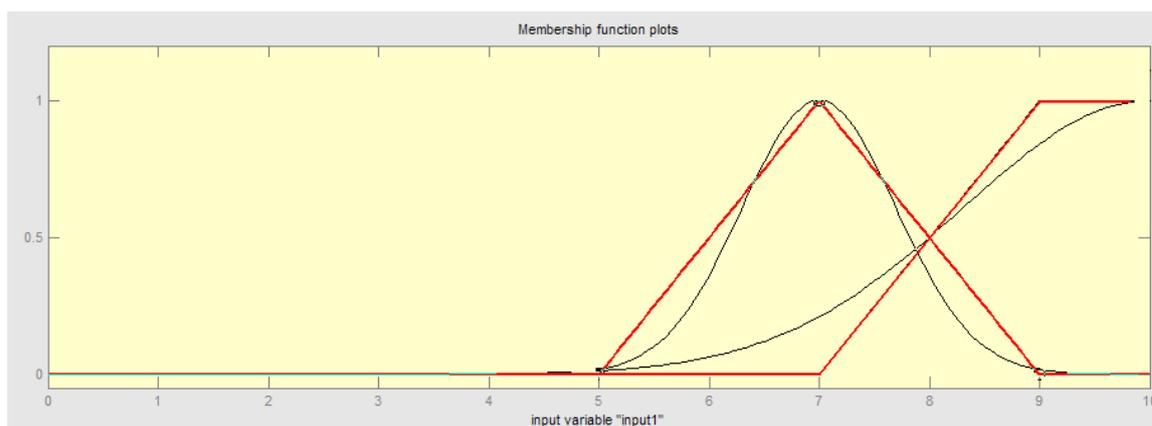


Figura 42 – Comparação das *mf*s triangulares e trapezoidais versus gaussianas

Admitindo que a Figura 46 represente os estados *good* (esquerda) e *excellent* (direita) para o sistema *tritrap* em vermelho e o Gaussiano em preto. O estado *excellent* tende para valores maiores que 8. Assim, para cobrir esta faixa inteira com a *mf* Gaussiana, foi necessário “abrir” muito a função, e como ela decai mais

lentamente, acaba influenciando muito também no estado *good*. Esse tipo de queda para faixas amplas é melhor representado pela função trapezoidal.

#### 4.2 SOMATÓRIO DOS PERCENTUAIS DE PERTINÊNCIA DO IQA<sub>FUZZY</sub> AOS ESTADOS DOS PARÂMETROS

Ao operar com sistemas *fuzzy*, observa-se que a somatória das pertinências não necessariamente resultam no valor igual a 1 (100%). Para explicitar os motivos pelo qual tal acontece, apresenta-se uma explicação que continuará a fazer uso dos elementos gráficos gerados a partir do MATLAB<sup>®</sup>. Considera-se primeiramente a saída do sistema triangular.

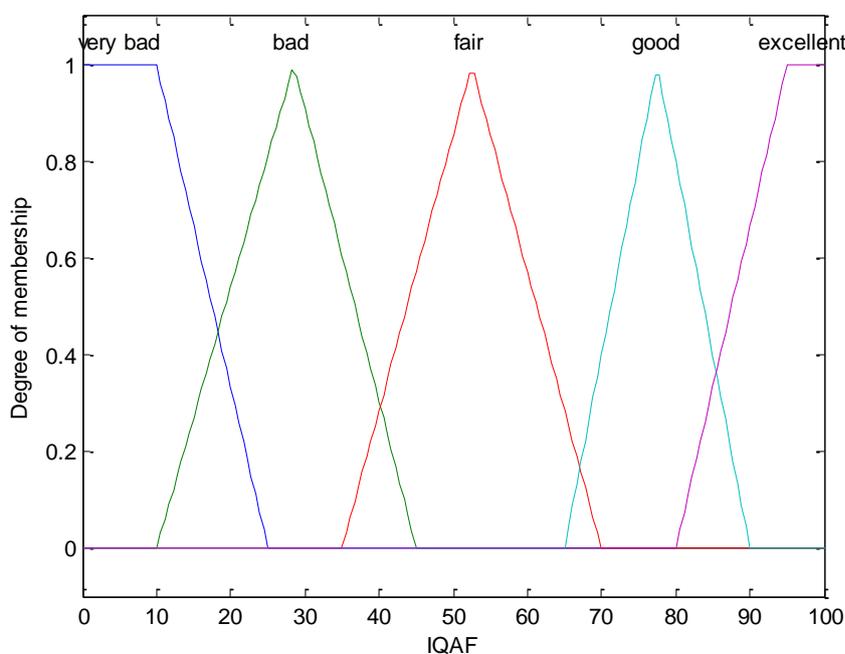
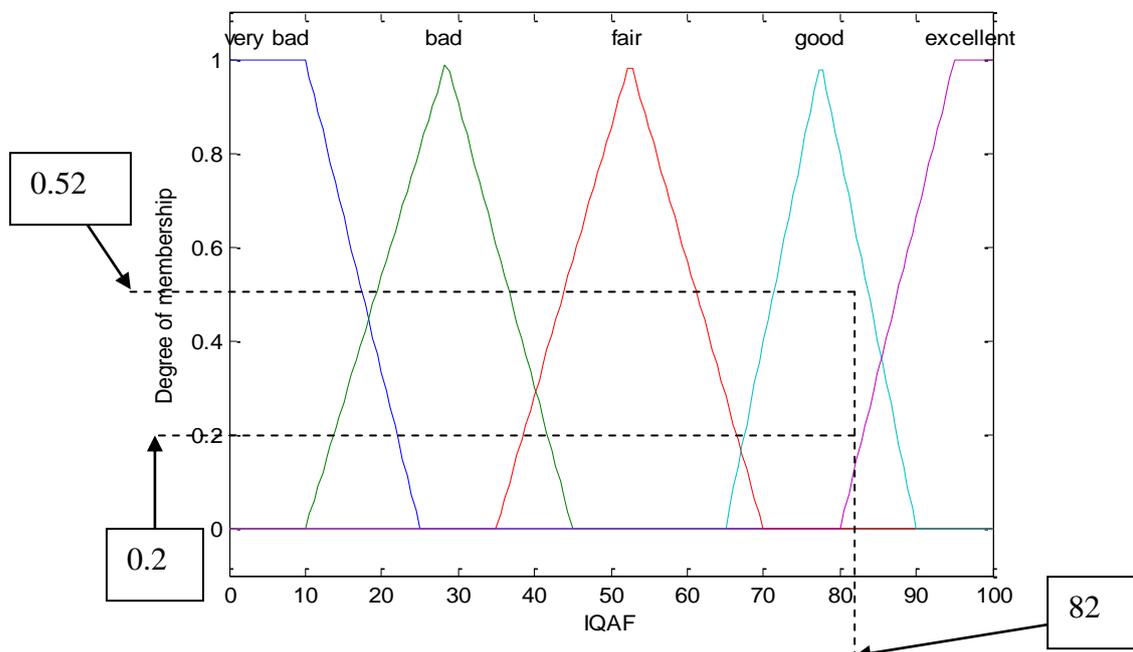


Figura 43 – Funções triangulares e trapezoidais do sistema de inferência *fuzzy*

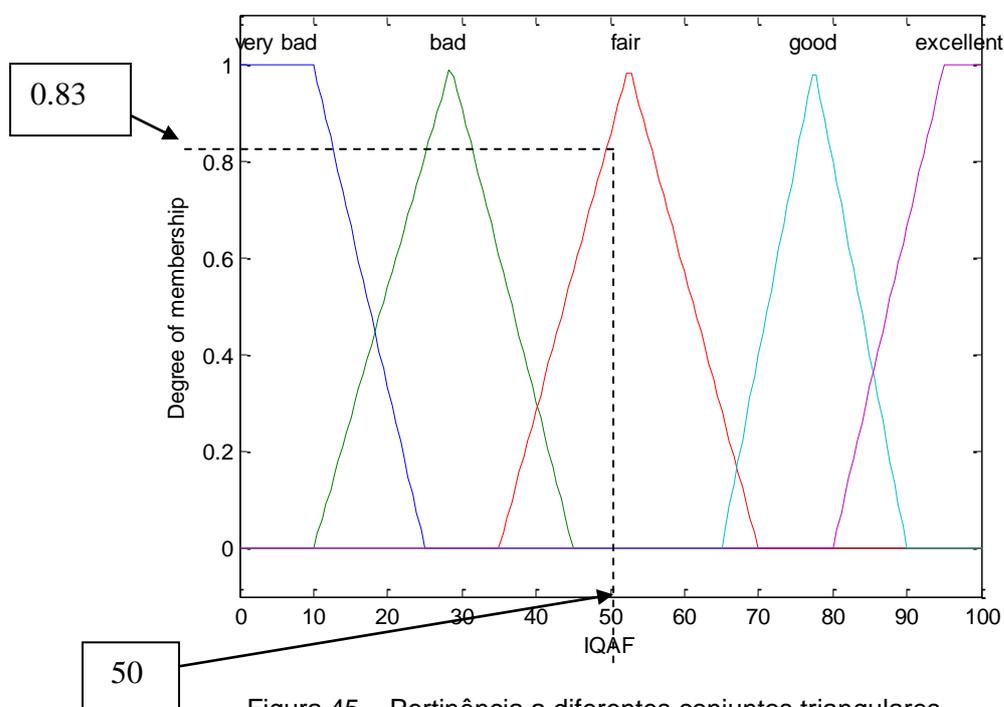
Admitindo que após a introdução dos parâmetros, o sistema resulte num IQA de 82. Graficamente, as pertinências de cada faixa de qualidade ficam representadas conforme pode ser observado na Figura 44. Este IQA 82 pertence 0,2 (20%) à faixa *excellent* e 0,52 (52%) à faixa *good*, cuja soma será 72%, que é menor que 100%. Para os demais estados, o seu valor de pertinência nesse ponto é zero.

Tais valores são aproximados e tem a pretensão somente de ilustrar o fenômeno de pertinência a dois conjuntos simultaneamente. Os valores exatos

foram calculados pelo sistema desenvolvido e estão apresentados adiante.



Assumindo que o IQA hipotético seja 50. Para este valor a pertinência é de 83% para a faixa *good* e zero para as demais classes, conforme Figura 45 seguinte:



Para o caso do sistema configurado com funções Gaussianas, o

comportamento das pertinências de uma função a mais de um conjunto é semelhante ao triangular, porém, nota-se uma diferença nesse sistema, que consiste no fato de que qualquer que seja o valor do IQA, este sempre irá se “espalhar” por varias faixas, não ficando limitado a uma única faixa, como no caso do último exemplo (Figura 45).

Apresenta-se a seguir o comportamento da função Gaussiana, ainda através de elemento gráficos:

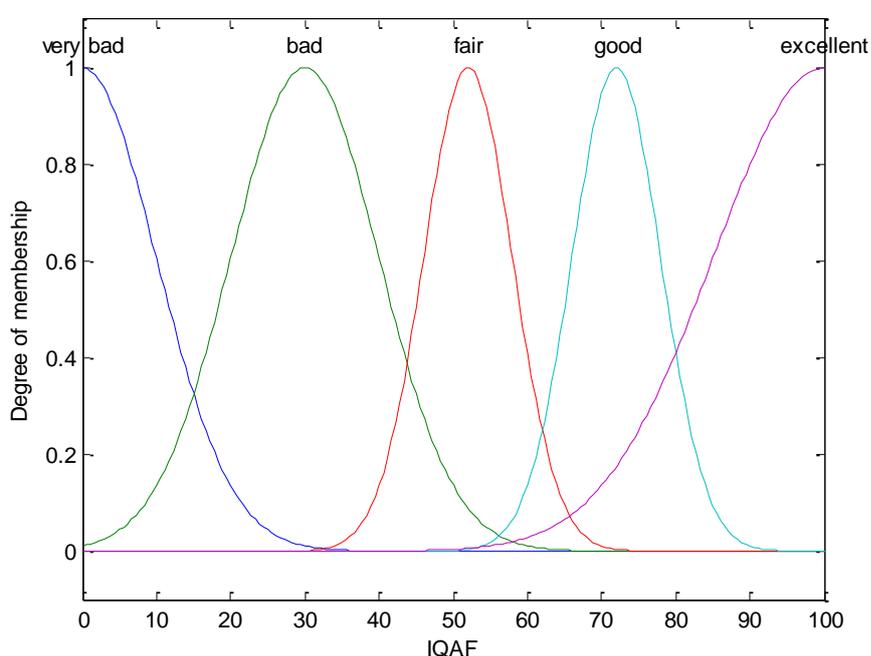


Figura 46 – Funções gaussianas do sistema de inferência fuzzy

Se for admitido um IQA de valor 35, observa-se na Figura 47, que de início o comportamento é idêntico ao do sistema triangular, no entanto, as funções Gaussianas nunca vão atingir o valor zero. Sendo assim, o valor considerado 32, tem um nível de pertinência, ainda que muito baixo a faixa (conjunto) *good*, por exemplo. Este nível de pertinência não pode ser demonstrado graficamente, porém, é passível de ser calculado, com relativa facilidade, sendo que no modelo proposto, tal cálculo de pertinência é efetuado. A interface do sistema *fuzzy* Gaussiano proposto, às vezes, retorna uma pertinência zero IQA para um dado conjunto. Tal acontecimento se justifica pelo fato da configuração ter sido efetuada de tal maneira que todas as vezes que a porcentagem de pertinência a um dado conjunto for menor

que 0,001%, a interface irá considerar o valor como sendo zero.

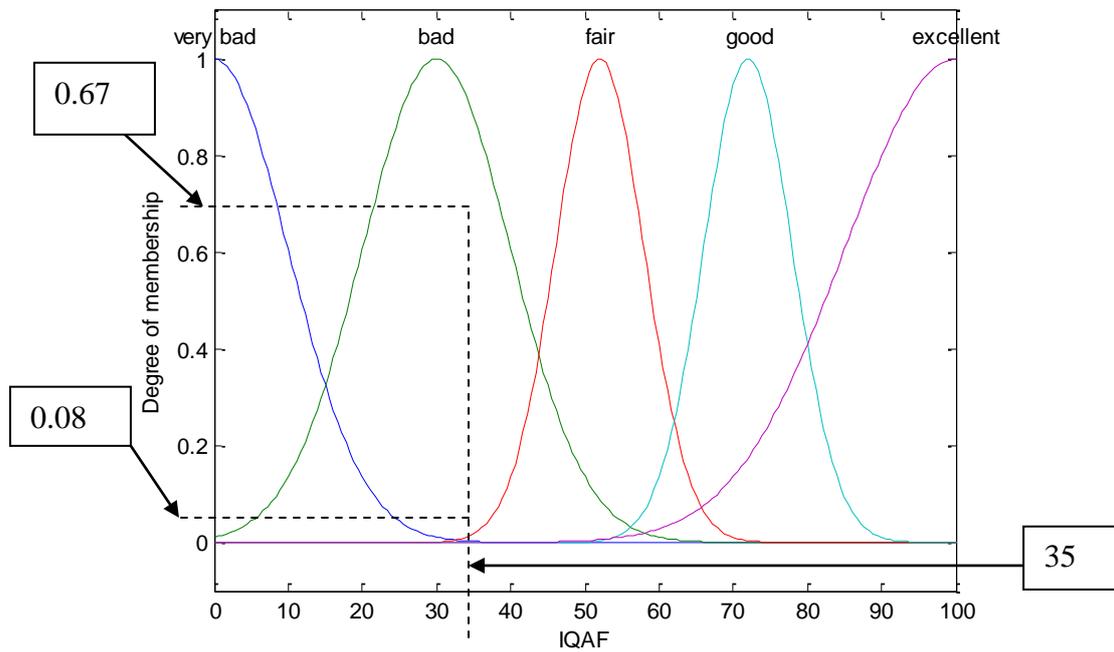


Figura 47 – Graus de pertinência à diferentes conjuntos gaussianos

Ao considerar um IQA de valor 75, o somatório do percentual de pertinência aos diferentes conjuntos supera 100%. Sua representação gráfica é a que se segue:

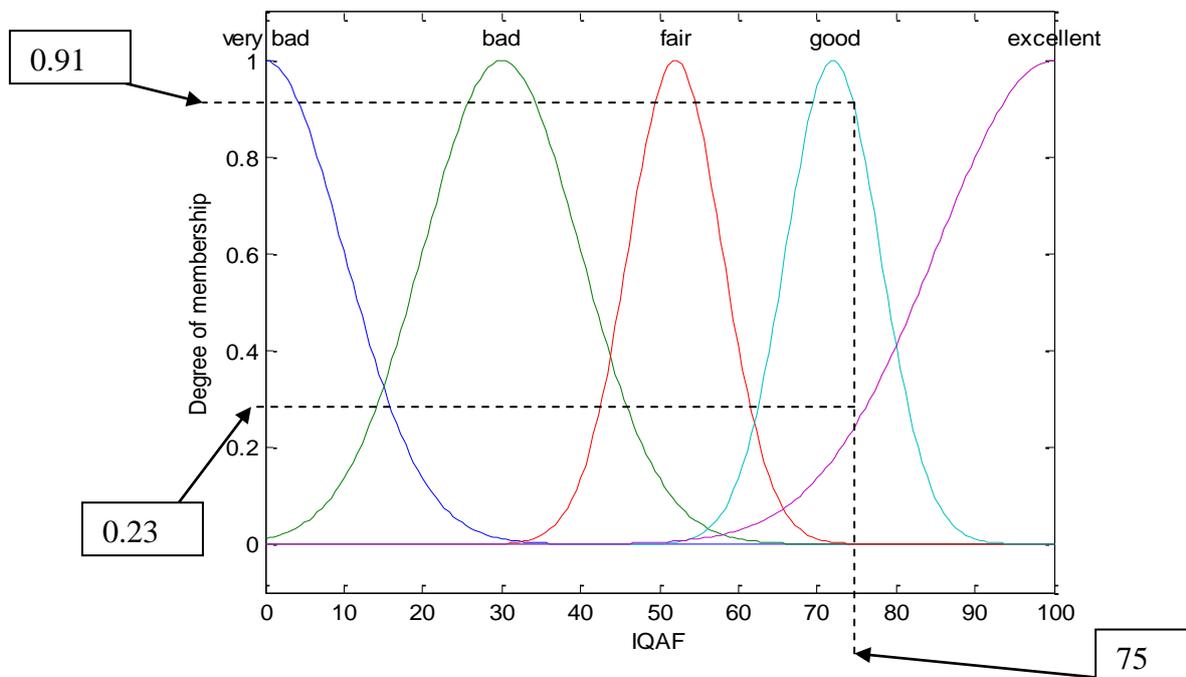


Figura 48 – Pertinência a diferentes conjuntos gaussianos

Neste caso específico, o somatório atinge o aproximadamente o valor de

114% (91% + 23%), desconsiderando ainda as pequeníssimas contribuições das outras faixas, que para o caso das funções Gaussianas nunca serão zero.

Tais porcentagens de pertinência a um conjunto permitem afirmar, que mesmo que o resultado de uma amostra no sistema tradicional de avaliação da qualidade da água, esteja classificada num nível particular, existe, para o caso da análise do sistema baseado na lógica *fuzzy*, um grau de pertinência, em mais de uma categoria, o que pode mostrar a tendência do resultado da avaliação dessa amostra, ou seja, uma “amostra X pode ser *good* com tendência a ser *fair*”.

#### 4.3 APRESENTAÇÃO DO SOFTWARE PARA CÁLCULO DO ÍNDICE DE QUALIDADE DE ÁGUA BASEADO NA LÓGICA FUZZY (IQA<sub>FUZZY</sub>).

Antes de gerar os resultados que foram discutidos, comparados e analisados, inclusive estatisticamente, faz-se uma breve apresentação do *software* concebido e implementado e uma resumida explicação de suas funções e ferramentas. De início, apresenta-se a interface, conforme a Figura 49:

The screenshot displays the WQI Calculator software interface, which is divided into several sections:

- Input Parameters:**
  - High Level:** Cs [0] [mg/L], DO [0] [mg/L], %DO [0], Coliforms [0] [NMP/100ml], pH [0].
  - Middle Level:** BOD [0] [mg/L], NO3 [0] [mg/L], PO4 [0] [mg/L], Temperature [25] [°C].
  - Low Level:** Turbidity [0] [NTU], Solids [0] [mg/L].
- Buttons:** A central 'Calculate' button.
- Output Results:** Three boxes showing 'WQI NSF' (0), 'WQI Fuzzy Triangular' (0), and 'WQI Fuzzy Gaussian' (0).
- Weights and q's:** A table listing parameters and their weights.
 

Parameter	qi	Weigh
%DO	0	0.17
Coliforms	0	0.15
pH	0	0.12
BOD	0	0.1
NO3	0	0.1
PO4	0	0.1
Temperature	0.3	0.1
Turbidity	0	0.8
Solids	0	0.8
- Levels Index:** Six boxes for different fuzzy levels: High Level Triangular (0), High Level Gaussian (0), Middle Level Triangular (0), Middle Level Gaussian (0), Low Level Triangular (0), and Low Level Gaussian (0).
- Percentual Indexes:** A table showing percentages for different systems.
 

System	Excellent (%)	Good (%)	Fair (%)	Bad (%)	Very Bad (%)
TriTrap	0	0	0	0	0
Gaussian	0	0	0	0	0

Figura 49 – Tela principal do *software* IQA<sub>Fuzzy</sub>

Para gerar os resultados é necessário dar a entrada nos valores dos

parâmetros que foram calculados pelo método tradicional ( $IQA_{NSF}$ ) ou *fuzzificados* pelo método que se vale desta lógica ( $WQI$  fuzzy triangular ou  $WQI$  fuzzy Gaussian). A entrada é feita por meio da digitação dos valores correspondentes a cada parâmetro nas caixas respectivas, conforme pode ser visto na Figura 50:

Figura 50 – Tela de entradas de dados software  $IQA_{fuzzy}$

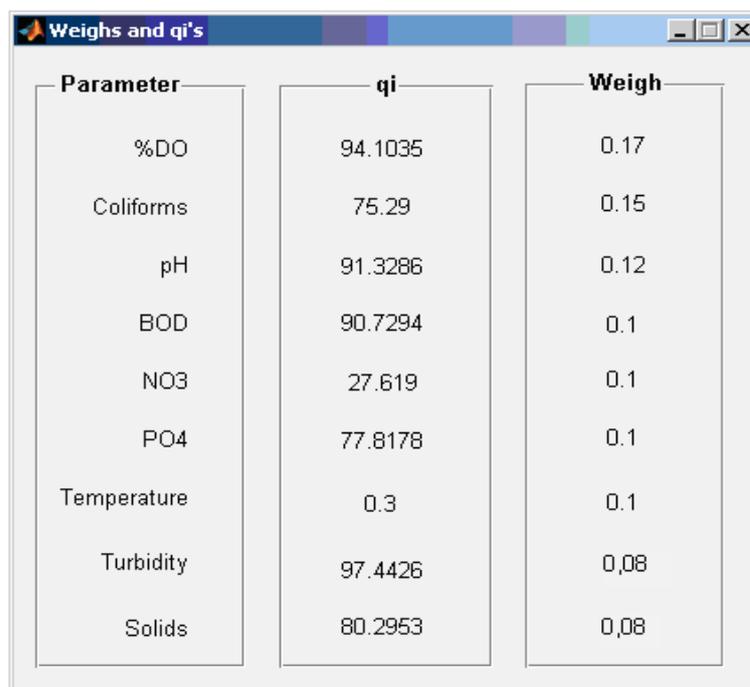
Após ter dar a entrada nos valores de todos os parâmetros, basta acionar o botão *calculate*, que o sistema retornará os três valores de IQA, sendo o  $WQI_{NSF}$  calculado de acordo com as equações convencionais, já o  $WQI$  fuzzy triangular e o  $WQI$  fuzzy Gaussian utilizam-se da lógica fuzzy com funções de pertinência triangulares/trapezoidais e funções Gaussianas, respectivamente.

#### 4.3.1 A Função Contribuição de cada Parâmetro para o IQA Final

Tendo em vista possibilitar que o usuário possa verificar qual é a contribuição individual de cada parâmetro para o valor final do IQA, habilitou-se a função **pesos e qi's** (*weighs and qi's*), que levando em consideração o peso de cada parâmetro estabelecido pela NSF, permite visualizar as contribuições, sejam elas favoráveis ou desfavoráveis, para o valor do IQA final. O IQA adotado como referência para se

medir este nível de contribuição é o  $IQA_{NSF}$ .

Na Figura 51 pode-se observar a configuração da tela que corresponde a esta função, destacando-se que neste caso específico o parâmetro que mais contribui desfavoravelmente é o parâmetro Nitratos ( $NO_3$ ).



Parameter	qi	Weigh
%DO	94.1035	0.17
Coliforms	75.29	0.15
pH	91.3286	0.12
BOD	90.7294	0.1
NO3	27.619	0.1
PO4	77.8178	0.1
Temperature	0.3	0.1
Turbidity	97.4426	0,08
Solids	80.2953	0,08

Figura 51 – Contribuição individual de cada parâmetro para o IQA final

#### 4.3.2 A Função Contribuição de Cada Grupo para o IQA Final

Lembrando que para o cálculo do  $IQA_{fuzzy}$  os parâmetros foram reunidos em três grupos distintos, sendo, grupo de peso de nível mais elevado (*high level*), de peso de níveis intermediários (*middle level*) e de peso de nível baixo (*low level*). A função cuja interface é a que pode ser verificada na Figura 52, tem como objetivo permitir ao usuário a verificação de qual é a contribuição de cada um dos grupos para o valor do IQA final. Ao se habilitar esta função, teve-se como premissa a ideia de favorecer a observação de qual é a contribuição de cada grupo de parâmetros para obtenção do IQA triangular/trapezoidal e Gaussiano.



Figura 52 – Contribuição de cada grupo para o IQA final

### 4.3.3 A Função Índices Percentuais

A essência de toda lógica *fuzzy* está no fato de que um mesmo elemento pode ter diferentes níveis de pertencimento a diferentes conjuntos. Sendo assim, o resultado final do IQA pode pertencer a diferentes categorias da classificação tabela da *NSF* de classificação da qualidade da água. Objetivando permitir a observação do pertencimento do IQA a cada um desses níveis, foi implementada a função *Percentual Indexes* que oferece o grau percentual de pertencimento a diferentes categorias da referida tabela.

System	Excellent (%)	Good (%)	Fair (%)	Bad (%)	Very Bad (%)
TriTrap	0	99.2	0	0	0
Gaussian	26.0592	85.1671	0.049796	0	0

Figura 53 – Índice de participação em diferentes categorias

No caso específico da Figura 53, é possível observar que o resultado do IQA Gaussiano pertence em aproximadamente 26% a categoria excelente e em 85 % a categoria boa (*good*), não desconsiderando ainda uma pequena participação de 0,049796 na categoria razoável (*fair*).

Tal constatação permite dizer com provas matemáticas sustentadas pela força da lógica *fuzzy* que a água avaliada no exemplo é um pouco “excelente”, em quantidade maior, “muito boa” e um pouquinho “razoável”, ou seja, é a utilização das variáveis linguísticas com significados matemáticos flexibilizando um padrão de

juízo até então totalmente rígido e binário (Aristotélico). Neste ponto reside toda a busca desta proposta de tese.

#### 4.4 VALORES DOS PARÂMETROS DO IQA DO RIO PIMENTA BUENO

Os resultados das análises efetuadas pelo laboratório especializado, das amostras de água bruta coletada durante o período de estudo, de acordo com o que foi descrito no plano de amostragem, encontra-se organizado nas tabelas 10, 11, 12, 13 e 14 seguintes.

Tabela 6 – Valores médios dos 9 parâmetros de amostras de água do rio Pimenta Bueno, coletadas de setembro a dezembro de 2007

Parâmetro	Unidade	Meses do ano de 2007			
		S	O	N	D
O. Dissolvido	%	78,00	68,50	63,00	73,00
Coliformes Totais	NMP/100ml	520	390	340	1000
pH	--	8,10	7,00	6,35	6,05
DBO	mg/l	14,15	11,95	10,75	9,20
Nitratos	mg/l	3,35	5,70	8,40	10,70
Fosfatos	mg/l	0,55	0,90	1,40	1,30
Temperatura	°C	23,50	25,00	23,50	24,00
Turbidez	NTU	74,50	55,00	49,00	63,50
Sólidos Totais	mg/l	165,00	241,50	340,00	409,00

Fonte: Dados Primários / Laudos de análises de água realizadas em laboratório

Tabela 7 – Valores médios dos 9 parâmetros de amostras de água do rio Pimenta Bueno, coletadas no primeiro semestre de 2008

Parâmetro	Unidade	1º semestre de 2008					
		J	F	M	A	M	J
O. Dissolvido	%	82,00	87,00	81,00	70,00	74,00	61,50
Coliformes Totais	NMP/100ml	705	295	210	280	90	115
pH	--	6,35	6,45	6,60	6,85	6,65	6,50
DBO	mg/l	10,05	7,65	7,50	6,20	7,60	8,35
Nitratos	mg/l	10,50	7,70	6,35	4,75	5,10	6,80
Fosfatos	mg/l	1,40	1,25	0,70	0,70	1,30	1,75
Temperatura	°C	26	24,5	24,5	22	22,5	22,0
Turbidez	NTU	67,50	48	72,50	40,50	40	24
Sólidos Totais	mg/l	305	404	454	356	251,5	172

Fonte: Dados Primários / Laudos de análises de água realizadas em laboratório

Tabela 8 – Valores médios dos 9 parâmetros de amostras de água do rio Pimenta Bueno, coletadas no segundo semestre de 2008

Parâmetro	Unidade	2º semestre de 2008					
		J	A	S	O	N	D
O. Dissolvido	%	65,50	84,00	91,50	72,00	68,00	84,00
Coliformes							
Totais	NMP/100ml	300	165	350	470	440	410
pH	--	6,55	7,35	8,15	7,25	6,90	6,70
DBO	mg/l	6,60	10,25	13,50	8,70	8,45	9,90
Nitratos	mg/l	6,60	4,55	2,90	3,80	4,05	3,60
Fosfatos	mg/l	2,30	0,90	1,00	1,00	1,10	1,50
Temperatura	°C	23	24	21,5	25	21	23,5
Turbidez	NTU	48	56,50	69	44	48	60
Sólidos Totais	mg/l	153,5	181	159	206,5	177	229

Fonte: Dados Primários / Laudos de análises de água realizadas em laboratório

Tabela 9 – Valores médios dos 9 parâmetros de amostras de água do rio Pimenta Bueno, coletadas de janeiro a agosto de 2009

Parâmetro	Unidade	Meses do ano de 2009							
		J	F	M	A	M	J	J	A
O.									
Dissolvido	%	83,00	75,00	71,00	67,50	63,50	64,50	72,00	90,50
Coliformes									
Totais	NMP/100ml	500	1050	775	950	305	335	180	105
pH	--	6,40	6,45	6,70	6,83	7,22	7,22	7,15	7,75
DBO	mg/l	7,80	7,10	6,40	5,90	10,50	8,65	7,90	10,10
Nitratos	mg/l	4,05	4,50	4,65	5,10	6,65	6,25	5,80	4,80
Fosfatos	mg/l	0,95	0,85	1,20	0,80	1,70	1,50	2,10	1,35
Temperatura	°C	21,5	25,0	20,0	21,5	21,5	23,5	22,5	25,5
Turbidez	NTU	46,0	39,0	30,0	20,0	41,0	43,0	48,0	53,0
Sólidos									
Totais	mg/l	231,5	302,0	243,5	295,5	178,0	208,0	169,0	203,5

Fonte: Dados Primários / Laudos de análises de água realizadas em laboratório.

Tabela 10 – Valores médios dos 9 parâmetros da água do rio Pimenta Bueno

Parâmetro	Unidade	Média 2007	Média 2008	Média 2009	Média Final
O. Dissolvido	mg/l	70,63	76,71	73,38	74,58
Coliformes Totais	mg/l	563	319,17	525	428,33
pH	NTU	6,88	6,86	6,97	6,90
DBO	--	11,51	8,73	8,04	8,96
Nitratos	mg/l	7,04	5,56	5,23	5,69
Fosfatos	mg/l	1,04	1,24	1,31	1,23
Temperatura	mg/l	24,00	23,29	22,63	23,19
Turbidez	NMP/100ml	60,50	51,50	40,00	49,17
Sólidos Totais	°C	288,88	254,04	228,88	251,46

Fonte: Dados Primários / Laudos de análises de água realizadas em laboratório

Esclarece-se que na região em que foi realizado o estudo, há um regime de chuvas que garante elevado índice pluviométrico no período compreendido entre os meses de novembro a março, e um período de intensa estiagem de maio a agosto. Os meses de abril, setembro e outubro fazem a transição entre o período de estiagem e de chuvas e vice versa. Tal regime climático é razoavelmente rígido, e sabe-se que o índice pluviométrico tem relação direta com a qualidade da água analisada, em decorrência do volume de solo e outros poluentes que são arrastados para o manancial, mesmo existindo cobertura vegetal e matas ciliares em boa parte da extensão do rio estudado.

Os valores observados ao longo período de estudo estão representados nas Figuras 54, 55 e 56 seguintes:

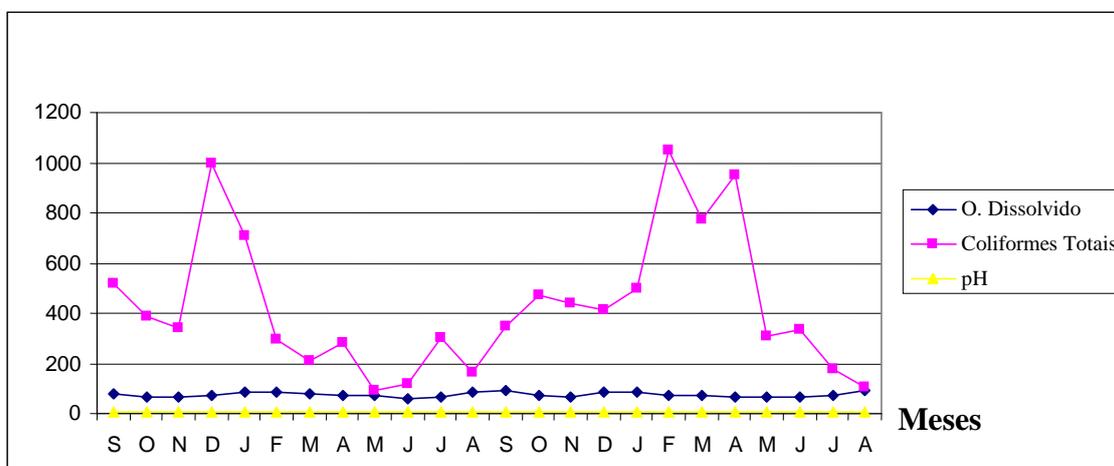


Figura 54 – Valores mensais dos parâmetros de peso alto

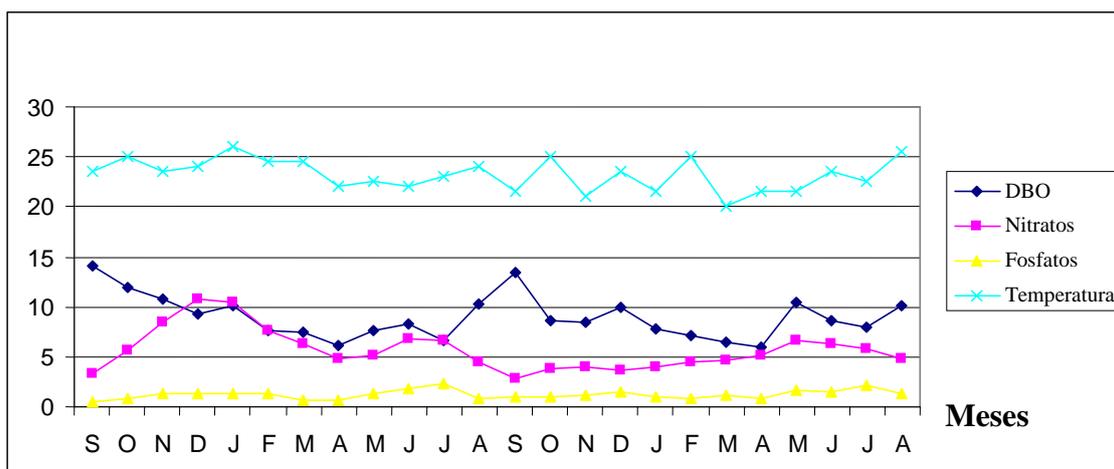


Figura 55 – Valores mensais dos parâmetros de peso médio

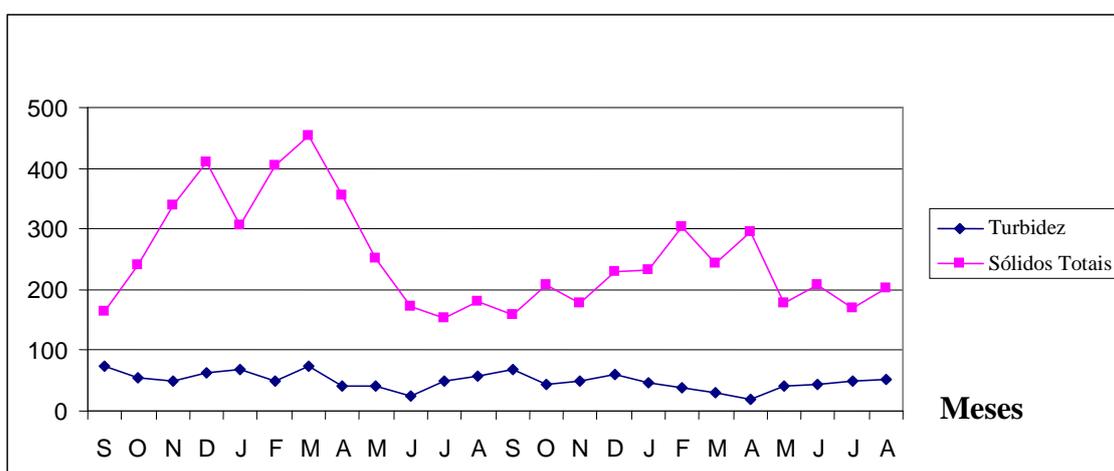


Figura 56 – Valores mensais dos parâmetros de peso baixo

Conforme discutido anteriormente, em razão do estudo ser realizado no Brasil, país situado na zona inter-tropical, os valores da variação de temperatura não são significativos para composição do IQA, sendo considerados sua variação zero e sua medida absoluta um valor constante e igual a 25 °C, no entanto, seus valores quinzenais foram medidos e estão expressos nas tabelas anteriores. Ressalte-se que as temperaturas foram verificadas no manancial, sempre nas primeiras horas da manhã, o que justifica a obtenção de valores médios abaixo de 25°, a despeito do local de estudo estar situado numa região de clima equatorial.

Os valores obtidos durante este período para cada um dos parâmetros foram inseridos nas caixas de entradas dos valores dos parâmetros (tela *wqi calculator*). A inserção dos valores foi efetuada mês a mês, gerando 24 relatórios que foram

agrupados em tabelas e representados por gráficos que estão adiante apresentados.

Estes dados permitiram encontrar o IQA de 24 meses (setembro de 2007 a agosto de 2009). Para cada conjunto de 9 parâmetros de um período que foram inseridos, encontra-se 3 (três) diferentes valores de IQA's, cada um deles é obtido a partir de uma função geradora diferente.

#### 4.5 CÁLCULO DO IQA<sub>FUZZY</sub> DO RIO PIMENTA BUENO O MATLAB<sup>®</sup>

Como exemplo e para comparar com os demais cálculos já efetuados, foram inseridos os dados referentes ao mês de setembro de 2007 na tela *WQI calculator*. Em seguida acionou-se o botão *calculate* que “chamou” as fórmulas de cálculo que por sua vez, deram origem aos três diferentes IQA's, bem como, ao valor numérico da contribuição de cada parâmetro, à contribuição de cada grupo para os valores finais do IQA e ao grau de participação de cada um dos IQA's *fuzzy* nas diferentes categorias de classificação de qualidade da água, conforme Figura 57:

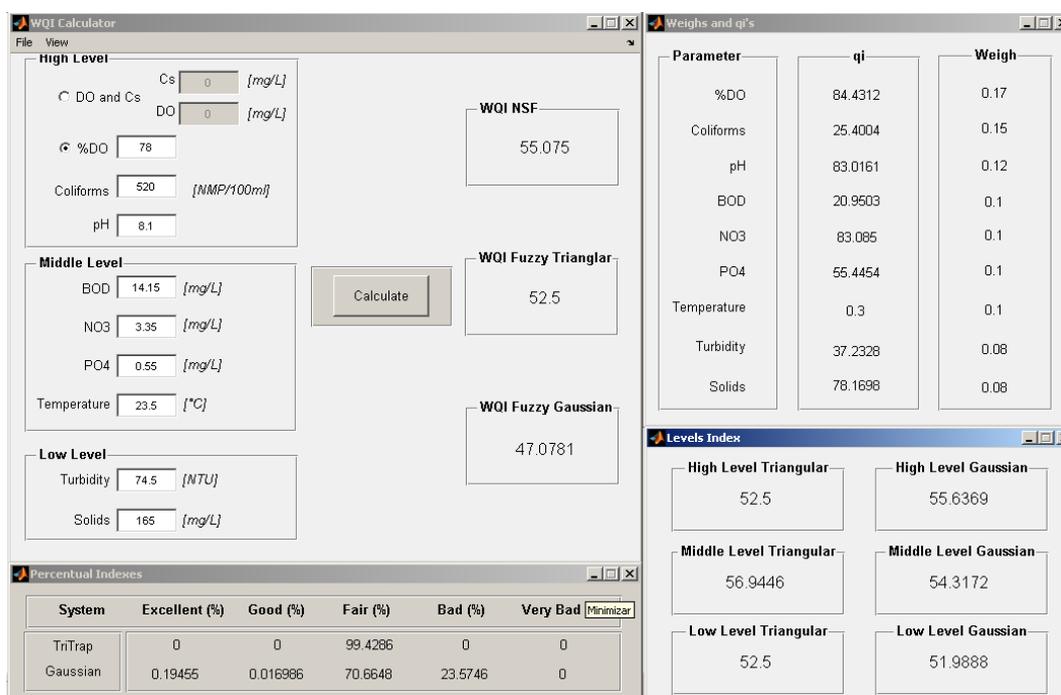


Figura 57 – Cálculo do IQA do mês de setembro de 2007

Este procedimento foi repetido para todos os meses do período considerado (set/08 a ago/2009). Os resultados dos IQA's obtidos a partir da inserção dos valores mensais dos parâmetros, estão apresentados na Tabela seguinte:

Tabela 11 – Valores dos IQA's do rio Pimenta Bueno do período de setembro de 2007 a agosto de 2009

	IQA NSF	IQA TriTrap	IQA Gauss
Ano de 2007			
Set	55,07	52,50	47,08
Out	52,99	52,50	55,10
Nov	47,38	52,50	46,91
Dez	45,30	52,50	45,33
Ano de 2008			
Jan	48,59	52,50	47,62
Fev	52,67	52,50	46,19
Mar	56,28	40,06	34,42
Abr	57,34	52,50	46,78
Mai	57,75	52,50	65,11
Jun	53,94	52,50	45,36
Jul	51,51	52,50	50,47
Ago	59,04	52,50	63,84
Set	55,66	52,50	47,72
Out	55,63	52,50	61,95
Nov	55,03	52,50	53,87
Dez	54,39	52,50	54,55
Ano de 2009			
Jan	55,15	52,50	67,03
Fev	52,77	52,50	54,44
Mar	54,44	52,50	60,54
Abr	56,01	52,50	53,01
Mai	51,20	52,50	46,76
Jun	52,68	52,50	49,12
Jul	54,81	52,50	61,95
Ago	58,52	52,50	70,34
IQA Médio	53,92	51,98	53,15

Fonte: Dados Primários

Os valores destes IQA's mensais são variáveis, porém com certa estabilidade. O IQA<sub>tritrap</sub> mostrou-se tão estável que pode-se dizer que ele é quase indiferente as mudanças nos valores individuais dos parâmetros, sendo que, mesmo com a ocorrência de variações nos valores dos parâmetros, o resultado final deste IQA tende a um valor central único de 52,5. Grandes variações nos valores dos parâmetros, no entanto, fazem com que o IQA<sub>tritrap</sub> tenha resultados diferentes, porém, este é pouco sensível.

Quanto ao  $IQA_{NSF}$ , este também apresenta certa estabilidade, porém é sensível às variações nos valores individuais dos parâmetros. Como este IQA é resultado de um produtório dos parâmetros ponderados pelos seus respectivos pesos, seu comportamento apresenta o inconveniente de que nas situações em que todos os parâmetros apresentam valores satisfatórios exceto um deles, o resultado final é pouco influenciado negativamente. Em outras palavras, neste modelo de avaliação, um parâmetro com valor totalmente fora do padrão desejado, combinado com valores de outros parâmetros que sejam satisfatórios, pode gerar um IQA que classifique a água como excelente. Isto se explica pelas próprias características das operações matemáticas baseadas em produtórios, em que multiplicações potencializam positivamente o resultado, desconsiderando ou neutralizando um único valor pequeno.

O  $IQA_{Gauss}$  apresenta, além de estabilidade, uma sensibilidade maior às mudanças nos valores individuais dos parâmetros do que os outros dois IQA's. O resultado da avaliação do IQA baseado nesta função é mais rigoroso em sua avaliação, ou seja, para um mesmo conjunto de valores o resultado do  $IQA_{Gauss}$  é normalmente um valor menor que os demais, com a vantagem de que quando o valor de um único parâmetro é desfavorável, é difícil obter um IQA favorável, haja vista que o padrão de julgamento não é o produtório e sim as funções Gaussianas. Resumindo, quando o  $IQA_{Gauss}$  é favorável, significa dizer que todos os valores dos parâmetros também o são, em medida superior, e portanto, é mais seguro que os demais modelos de julgamento estudados.

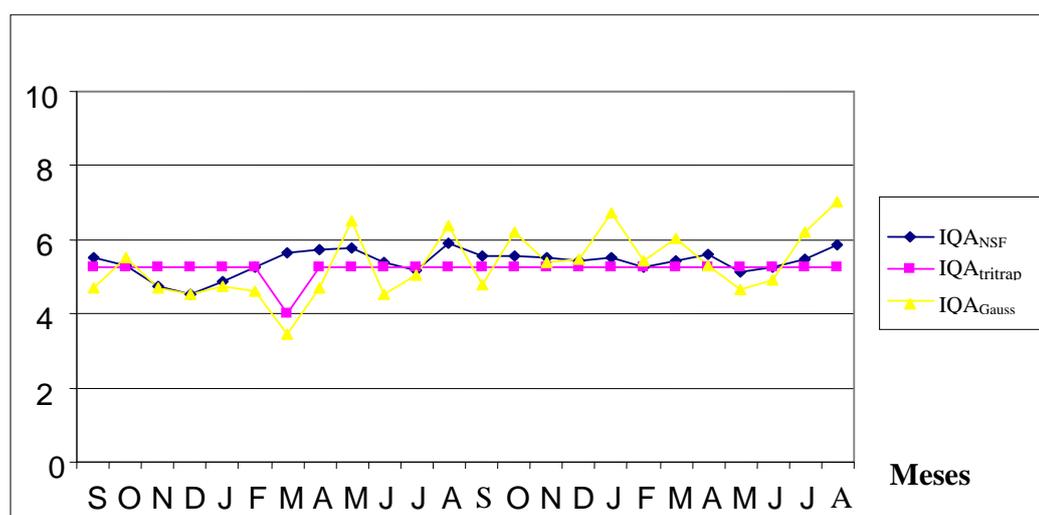


Figura 58 – Comparação dos valores dos IQA's ao longo do período estudado

#### 4.6 CONTRIBUIÇÃO INDIVIDUAL DOS PARÂMETROS PARA O IQA

A inserção dos valores de cada um dos parâmetros na ferramenta do MATLAB®, possibilitam também, a geração do valor numérico da contribuição individual de cada um dos parâmetros para o valor do IQA final. É possível verificar então, em determinado mês, qual parâmetro mais influenciou de maneira mais desfavorável para a obtenção de um IQA baixo, por exemplo. Tais informações estão reunidas na Tabela 12, levando em consideração cada mês do período observado.

Tabela 12 – Contribuição dos parâmetros para o valor IQA<sub>NSF</sub>

Meses	% OD	CT	pH	DBO	NO3	PO4	Temp.	TU	ST
Ano de 2007									
S	84,43	25,40	83,02	20,95	83,09	55,45	93	37,23	78,17
O	73,03	27,72	91,33	26,68	71,10	42,69	93	32,73	68,37
N	64,64	28,86	66,43	30,52	57,33	31,84	93	31,68	53,99
D	79,00	20,54	54,73	36,36	47,01	33,57	93	35,13	44,26
Ano de 2008									
J	87,67	23,07	66,43	33,03	47,44	31,84	93	36,18	59,19
F	90,90	30,07	70,65	43,35	60,90	34,50	93	31,60	44,92
M	86,96	33,07	77,31	44,09	67,79	49,21	93	37,07	38,74
A	75,12	30,52	89,22	51,07	75,95	49,21	93	32,40	51,64
M	80,20	41,19	79,61	43,59	74,16	33,57	93	32,55	66,98
J	62,19	38,75	72,83	40,04	65,49	26,91	93	45,35	77,34
J	68,58	29,93	75,05	48,82	66,51	21,53	93	31,60	79,49
A	88,87	35,29	92,85	32,29	76,97	42,69	93	33,12	76,26
S	94,08	28,62	81,63	22,48	85,38	40,00	93	36,51	78,86
O	77,76	26,20	91,99	38,48	80,79	40,00	93	31,71	73,06
N	72,31	26,73	91,73	39,59	79,52	37,62	93	31,60	76,75
D	88,87	27,31	81,95	33,59	81,81	30,26	93	34,11	70,09
Ano de 2009									
J	88,31	25,71	68,52	42,62	79,52	41,31	93	31,57	69,75
F	81,34	20,20	70,65	46,13	77,22	44,16	93	32,89	59,64
M	76,46	22,36	81,95	49,93	76,46	35,49	93	38,64	68,10
A	71,58	20,90	88,23	52,83	74,16	45,73	93	51,13	60,60
M	65,44	29,79	91,60	31,39	66,26	27,52	93	32,26	76,62
J	67,03	28,99	91,60	38,70	68,30	30,26	93	31,84	72,87
J	77,76	34,48	90,45	42,14	70,59	23,23	93	31,60	77,70
A	93,38	39,65	90,58	32,84	75,69	32,68	93	32,28	73,45
Média do período observado									
Média	79,00	28,97	80,85	38,40	71,23	36,72	93	34,70	66,53

Fonte: Dados Primários

A Figura seguinte apresenta o comportamento do grupo dos parâmetros de alto peso (Oxigênio Dissolvido, Coliforme Termotolerantes e Potencial Hidrogeniônico). Pode-se observar que o parâmetro que menos contribuiu para a obtenção de um IQA mais elevado foram os Coliformes Termotolerantes. Os outros dois apresentaram contribuição semelhante e bem acima da contribuição do parâmetro “Coliformes”, o que leva a entender que para melhoria do IQA deste manancial seria necessário dar atenção prioritariamente a melhoria da qualidade deste parâmetro, estabelecendo ações de preservação que contribuam para a diminuição da presença de coliformes termotolerantes neste ambiente aquático.

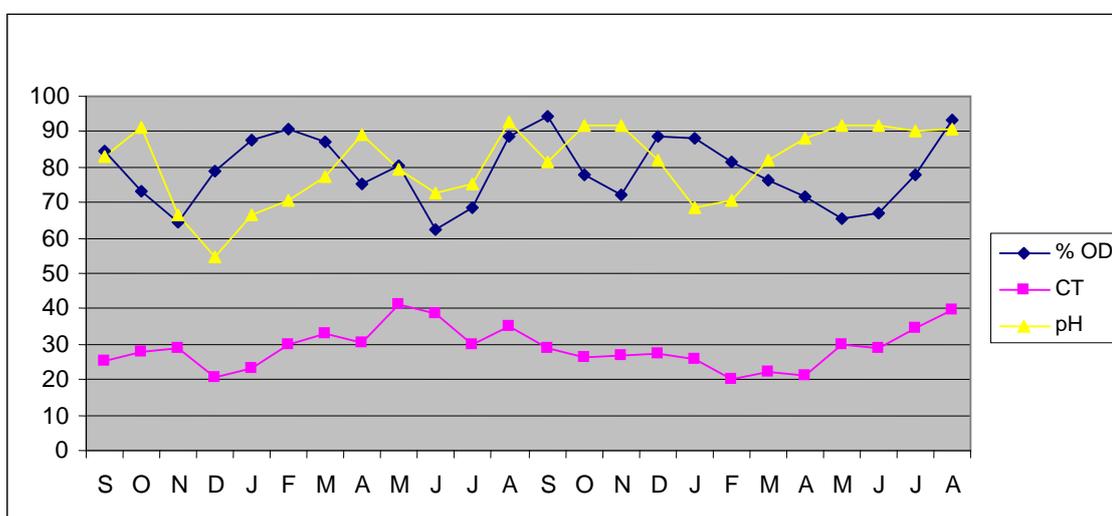


Figura 59 – Contribuição dos parâmetros de alto peso para o IQA<sub>NSF</sub>

Sobre o grupo dos parâmetros de médio peso, a avaliação que se pode fazer é que os parâmetros Fosfatos Totais e Demanda Bioquímica de Oxigênio são os que menos contribuem para a obtenção de um IQA mais elevado. Assim, para melhoria do valor deste índice, as ações de preservação da qualidade da água deste manancial, devem estar focadas, dentre estes quatro parâmetros, primeiramente nestes dois citados. Já os parâmetro Nitrato Total contribui razoavelmente para obtenção de um IQA de valor mais elevado. Por último, ressalta-se que a temperatura é considerada neste estudo como um valor constante de 25 °C cuja contribuição será sempre igual a 93 para a obtenção do IQA final.

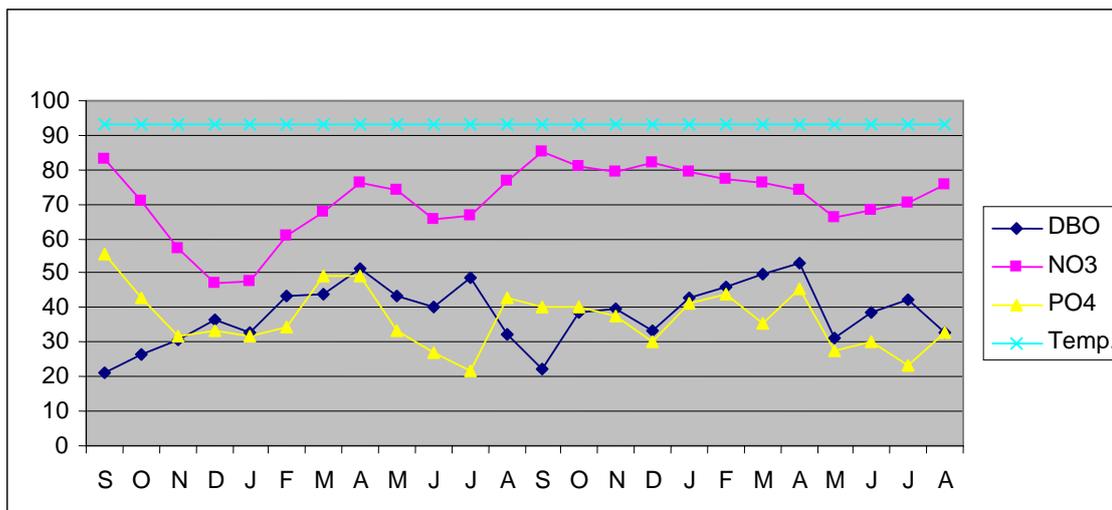


Figura 60 – Contribuição dos parâmetros de médio peso para o  $IQA_{NSF}$

O grupo dos parâmetros de baixo peso, que é composto pela Turbidez e pelos Sólidos Totais, demonstram comportamento que permitem afirmar que, dentre os dois, o parâmetro que menos contribui para obtenção de um IQA mais elevado é a Turbidez. Desta forma, as ações para melhoria de qualidade da água deste manancial, devem estar voltadas a permitir primeiramente a diminuição do nível da Turbidez. Em alguns meses também os Sólidos Totais contribuem para um IQA mais baixo, mas, como pode ser observado na Figura 61, via de regra, é grande a contribuição deste parâmetro para obtenção de um IQA de valor mais elevado.

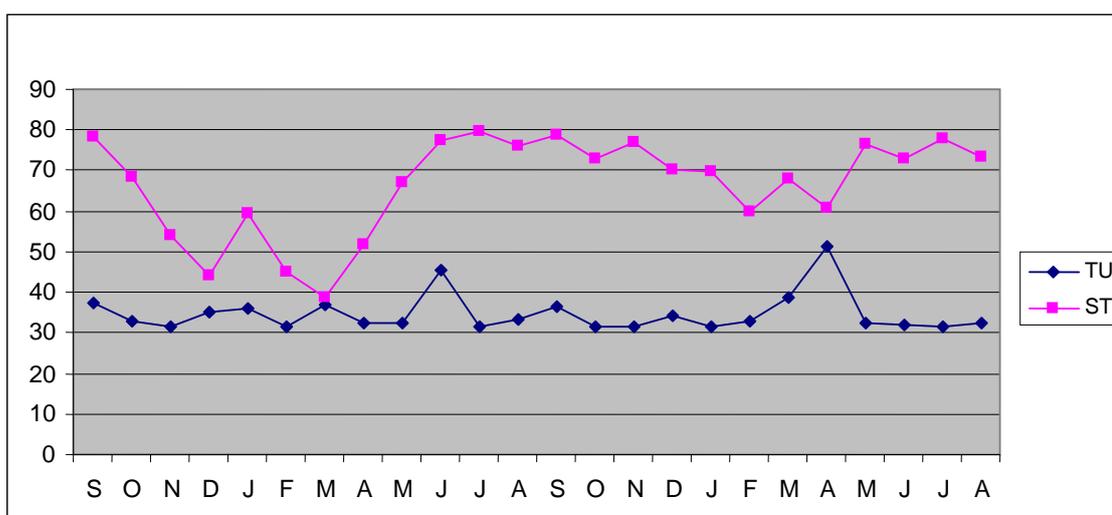


Figura 61 – Contribuição dos parâmetros de baixo peso para o  $IQA_{NSF}$

4.7 CONTRIBUIÇÃO DOS SUBSISTEMAS *FUZZY* PARA O VALOR DO IQA

Configurou-se a interface do sistema IQA<sub>fuzzy</sub> de forma que é possível mostrar tanto os *qi*'s e pesos da forma tradicional, como também a contribuição de cada subsistema (alto, médio e baixo peso) nos dois sistemas *fuzzy* (triangular/trapezoidal e Gaussiano). Tal possibilidade torna-se útil para saber qual dos subsistemas e consequentemente os parâmetros a ele pertencentes está se tornando o gargalo para se obter um IQA *fuzzy* final mais elevado.

Tabela 13 – Contribuição dos subsistemas para obtenção do IQA final

Índices Percentuais de Pertinência às categorias						
Ano	Funções Triangulares e Trapez.			Funções Gaussianas		
	Alto Peso	Médio Peso	Baixo Peso	Alto Peso	Médio Peso	Baixo Peso
2007						
Set	52,50	56,94	52,50	55,64	54,32	51,99
Out	61,60	64,72	66,47	58,61	64,90	66,34
Nov	52,50	70,47	52,50	52,48	69,33	52,92
Dez	52,50	79,77	52,50	54,93	71,78	50,12
2008						
Jan	52,50	76,87	52,50	64,59	71,30	53,49
Fev	52,50	83,86	52,50	70,52	75,08	50,82
Mar	68,49	84,25	42,60	67,62	75,46	39,80
Abr	62,83	88,16	52,50	60,52	73,60	52,30
Mai	63,92	83,99	76,59	64,87	71,53	70,89
Jun	52,50	82,03	80,85	50,74	69,31	77,11
Jul	61,87	85,92	77,50	55,16	74,46	72,02
Ago	74,37	74,60	64,19	70,80	70,64	64,10
Set	52,50	59,49	52,50	56,89	57,37	52,68
Out	64,53	81,11	77,50	63,02	73,66	73,25
Nov	61,20	81,76	77,50	57,98	66,50	72,02
Dez	75,75	77,80	59,43	70,08	70,15	58,62
2009						
Jan	52,50	83,46	77,50	66,12	69,04	72,61
Fev	52,50	85,34	58,91	64,07	77,36	58,08
Mar	63,28	86,05	77,50	61,79	63,77	71,71
Abri	60,77	89,28	60,65	57,35	72,92	59,94
Mai	57,29	72,30	77,50	52,83	64,97	74,06
Jun	58,28	81,24	77,50	53,86	71,76	73,51
Jul	64,53	83,20	77,50	63,02	71,04	72,02
Ago	52,50	76,26	70,03	71,59	71,68	68,74
Média	59,32	78,70	65,30	61,04	69,66	62,88

Fonte: Dados Primários

Observa-se a partir dos dados desta Tabela, cuja representação gráfica se segue, é que para o caso do  $IQA_{\text{tritrapp}}$  o subsistema ou grupo que mais contribui para obtenção de um resultado mais elevado é o grupo de médio peso, seguido pelo subsistema ou grupo de baixo peso e, por último, o subsistema ou grupo de alto peso. Tal comportamento pode ser facilmente explicado pelo fato de que para os casos do grupo de alto peso, qualquer pequena inadequação aos padrões esperados, tem forte influência no resultado, devido a sua alta indexação, conferida pelo alto peso que cada um dos parâmetros deste grupo carrega sobre si.

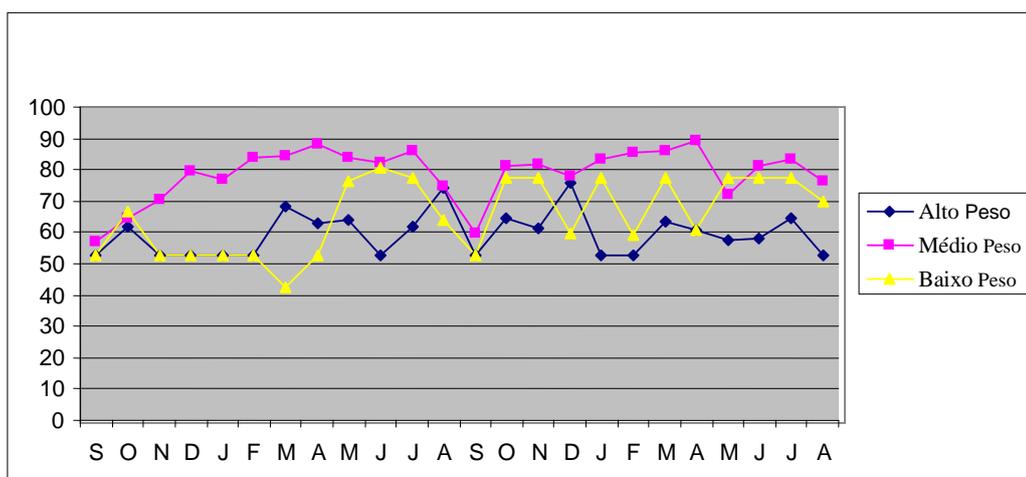


Figura 62 – Contribuição dos subsistemas tritrap para obtenção do IQA.

Os subsistemas do  $IQA_{\text{Gauss}}$  seguem o mesmo padrão de comportamento do  $IQA_{\text{tritrapp}}$ , em que na ordem decrescente, mais contribuem para o resultado, os de médio, baixo e alto peso. Porém, neste caso, a contribuição dos subsistemas de alto e baixo peso são muito próximas, como pode ser confirmado pelos valores médios na Tabela 13 [61,04 e 62,88, respectivamente] e também pelo comportamento gráfico da série, conforme Figura 63:

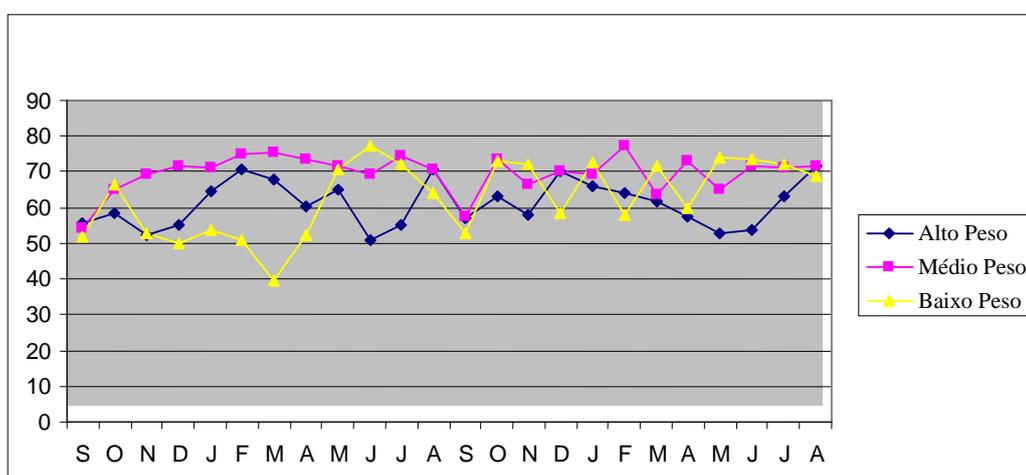


Figura 63 – Contribuição dos subsistemas gaussianos para obtenção do IQA

4.8 PERTINÊNCIA DO IQA<sub>NSF</sub> E DO IQA<sub>FUZZY</sub> ÀS CLASSES DE QUALIDADE

Ao se aplicar o padrão de avaliação *fuzzy*, admite-se de antemão, que um mesmo valor pode pertencer simultaneamente a mais de um conjunto. Esta condição que é inerente à lógica *fuzzy*, permite que o resultado do IQA, pertença a mais de uma categoria da tabela da *NSF*. Os resultados obtidos do IQA<sub>NSF</sub> e do IQA<sub>fuzzy</sub> foram compilados na Tabela 14, que permite observar qual é o grau percentual de pertinência do IQA a cada uma das categorias de classificação. No caso do IQA<sub>NSF</sub> a pertinência é exclusiva a uma única categoria.

Tabela 14 – Percentuais de pertinência do IQA<sub>NSF</sub> e DO IQA<sub>fuzzy</sub> às categorias da tabela da *NSF*

	IQA NSF					IQA Fuzzy Gauss					IQA Fuzzy Tritrap				
	E	B	Reg	R	P	E	B	Reg	R	P	E	B	Reg	R	P
<b>2007</b>															
Set	0	0	55,07	0	0	0,19	0,02	70,66	23,57	0	0	0	99,43	0	0
Out	0	0	52,99	0	0	1,16	1,98	86,74	4,18	0	0	0	99,43	0	0
Nov	0	0	0	47,38	0	0,19	0,02	70,66	23,57	0	0	0	99,43	0	0
Dez	0	0	0	45,30	0	0,133	0	54,61	30,55	0	0	0	99,43	0	0
<b>2008</b>	<b>E</b>	<b>B</b>	<b>Reg</b>	<b>R</b>	<b>P</b>	<b>E</b>	<b>B</b>	<b>Reg</b>	<b>R</b>	<b>P</b>	<b>E</b>	<b>B</b>	<b>Reg</b>	<b>R</b>	<b>P</b>
Jan	0	0	0	48,59	0	0,22	0,03	76,42	21,25	0	0	0	99,43	0	0
Fev	0	0	52,67	0	0	0,16	0	62,67	26,92	0	0	0	99,43	0	0
Mar	0	0	56,28	0	0	0	0	1,35	90,77	0,27	0	0	28,57	30,30	0
Abr	0	0	57,34	0	0	0,19	0,01	68,69	24,39	0	0	0	99,43	0	0
Mai	0	0	57,75	0	0	6,78	52,61	8,89	0,20	0	0	0	99,43	0	0
Jun	0	0	53,94	0	0	0,13	0	54,61	30,55	0	0	0	99,43	0	0
Jul	0	0	51,51	0	0	0,42	0,15	96,51	12,48	0	0	0	99,43	0	0
Ago	0	0	59,04	0	0	5,44	39,30	14,46	0,33	0	0	0	99,43	0	0
Set	0	0	55,66	0	0	0,23	0,03	78,27	20,51	0	0	0	99,43	0	0
Out	0	0	55,63	0	0	4,04	24,94	24,94	0,60	0	0	0	99,43	0	0
Nov	0	0	55,03	0	0	0,87	1,00	95,60	5,89	0	0	0	99,43	0	0
Dez	0	0	54,39	0	0	1,03	1,49	91,04	4,85	0	0	0	99,43	0	0
<b>2009</b>	<b>E</b>	<b>B</b>	<b>Reg</b>	<b>R</b>	<b>P</b>	<b>E</b>	<b>B</b>	<b>Reg</b>	<b>R</b>	<b>P</b>	<b>E</b>	<b>B</b>	<b>Reg</b>	<b>R</b>	<b>P</b>
Jan	0	0	55,15	0	0	8,89	70,66	4,39	0,11	0	0	0	99,43	0	0
Fev	0	0	52,77	0	0	0,98	1,35	92,31	5,10	0	0	0	99,43	0	0
Mar	0	0	54,44	0	0	3,18	16,45	35,80	0,93	0	0	0	99,43	0	0
Abr	0	0	56,01	0	0	0,19	0,01	68,69	24,39	0	0	0	99,43	0	0
Mai	0	0	51,20	0	0	0,19	0,01	68,69	24,39	0	0	0	99,43	0	0
Jun	0	0	52,68	0	0	0,32	0,07	89,68	15,83	0	0	0	99,43	0	0
Jul	0	0	54,81	0	0	4,04	24,94	24,94	0,60	0	0	0	99,43	0	0
Ago	0	0	58,52	0	0	14,27	96,51	0,91	0,03	0	0	0	99,43	0	0
Média			53,92			2,22	13,82	55,90	16,33	0,01	0	0	96,48	1,26	0

E = Excelente, B = Bom, Reg = Regular, R = Ruim e P = Péssimo

Fonte: Dados Primários

#### 4.8.1 Pertinência do $IQA_{\text{tritrapp}}$ às Classes de Qualidade da Água

A análise gráfica permite afirmar que para o caso do  $IQA_{\text{tritrapp}}$  dos 24 meses analisados, somente em um deles (março de 2008), os resultados não pertencem exclusivamente à categoria regular. Tal comportamento mostra que este sistema de avaliação é pouco sensível às mudanças nos valores dos parâmetros que compõe o IQA, bem como, assemelha-se em muito ao padrão de julgamento convencional, em que cada valor do IQA pertence unicamente a uma categoria.

É válido enaltecer que a configuração do sistema permite aos resultados pertencerem à várias categorias simultaneamente, no entanto, em função da pouca sensibilidade do  $IQA_{\text{tritrapp}}$  às mudanças nos valores dos parâmetros, os resultados obtidos neste estudo permaneceram, quase que em sua totalidade, em uma única categoria, não sendo até o momento, condizente com o comportamento que se esperava.

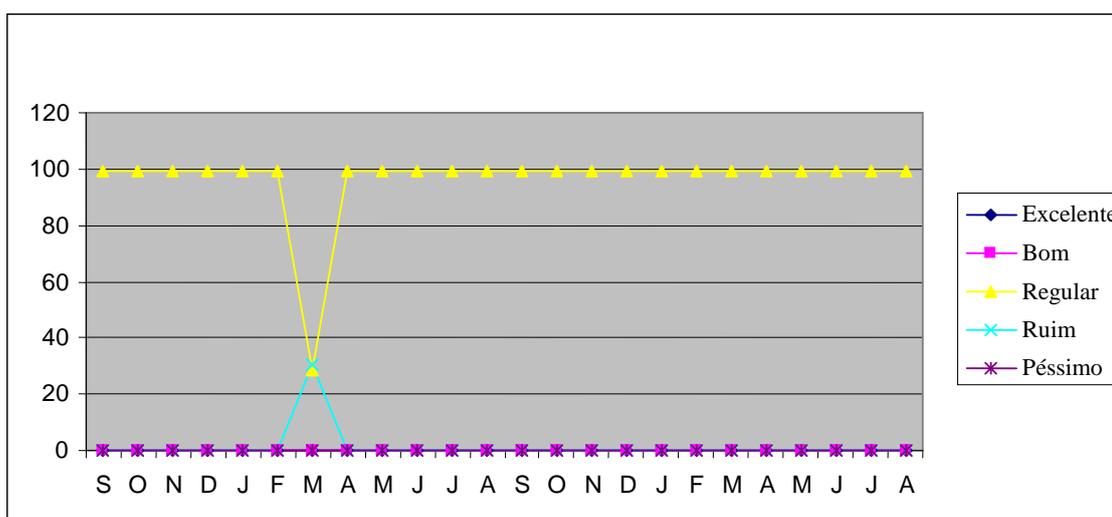


Figura 64 – Pertinência do  $IQA_{\text{tritrapp}}$  às categorias da tabela da NSF

#### 4.8.2 Pertinência do $IQA_{\text{Gauss}}$ às Classes de Qualidade da Água

Já a análise dos níveis de pertinência do sistema Gaussiano leva a concluir que existem níveis variáveis de inclusão em todas as categorias da tabela, com maior destaque para as categorias “ruim”, “regular” e “bom”, dentre estas, com predominância da categoria “regular”.

Ao criar um sistema que permite que os resultados possam ser classificados em mais de uma das categorias, da tabela de classificação da qualidade da água, chegou-se ao cerne, a essência do que se buscou apresentar como caráter inovador neste estudo. Fez-se com isto uma contraposição da lógica tradicional que só permite duas possibilidades de pertinência de um elemento a um conjunto (pertence ou não) e transcendeu-se para uma abordagem sob a perspectiva *fuzzy* em que um mesmo resultado tem diferentes níveis de pertinência aos diferentes conjuntos, sendo tal o que se buscou.

A Figura seguinte permite a visualização dos níveis de pertinência de um mesmo resultado a várias categorias da tabela, simultaneamente.

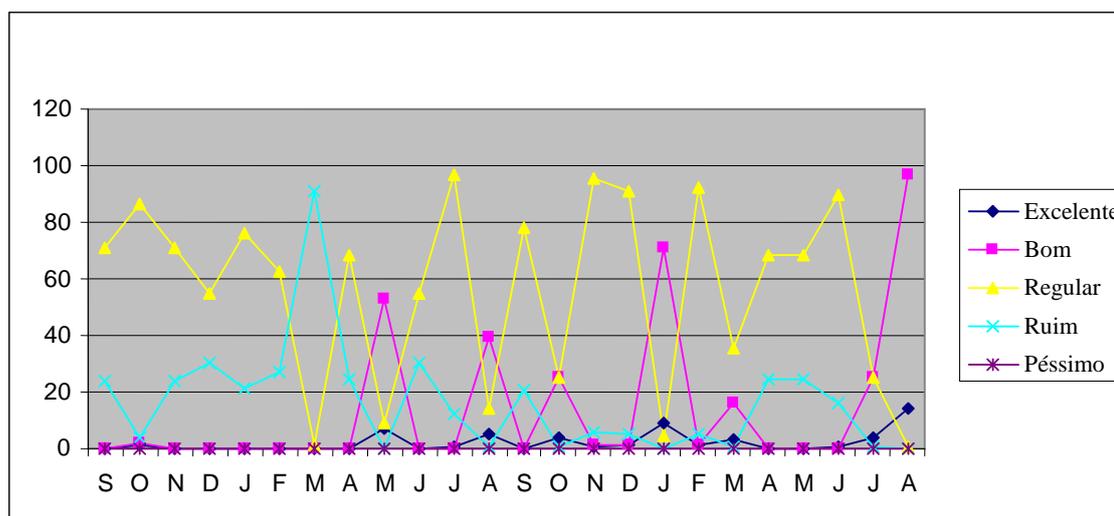


Figura 65 – Pertinência do IQA<sub>Gauss</sub> às categorias da tabela da NSF

## 5 AVALIAÇÃO ESTATÍSTICA DOS RESULTADOS DOS IQA'S

Neste capítulo são feitas algumas inferências estatísticas, incluindo os testes de hipóteses, com o objetivo de validar o IQA<sub>fuzzy</sub> proposto.

### 5.1 INFERÊNCIAS ESTATÍSTICAS

Os cálculos de algumas medidas estatísticas que são requeridas para as análises e inferências realizadas foram efetuados com o apoio das ferramentas do Microsoft<sup>®</sup> Excel e do *software* estatístico denominado comercialmente de MINITAB<sup>®</sup>, versão 15.

Ao se calcular as medidas estatísticas dos três IQA's observa-se que existe uma proximidade entre os valores da mediana, da média e do desvio padrão. Os testes de significância foram realizados e as implicações de cada uma destas medidas discutidas.

Tabela 15 – Medidas Estatísticas dos IQA's

Medidas Estatísticas	IQA NSF	IQA TriTrap	IQA Gauss
Mediana	54,62	52,50	51,74
1º Quartil	52,67	52,50	46,88
3º Quartil	55,75	52,50	60,89
Valor Máximo	59,04	52,50	70,34
Valor Mínimo	45,30	40,06	34,42
Média	53,92	51,98	53,15
Variância	11,26	6,45	74,98
Desvio Padrão	3,36	2,54	8,66
Coeficiente de Assimetria	-0,94	-4,90	0,24

Fonte: Dados Primários

### 5.2 GRÁFICOS DE *BOX & WHISKERS* PARA AS MEDIDAS SEPARATRIZES

O gráfico de “*Box & Whiskers*” (caixas e bigodes) se utiliza das medidas separatrizes de um distribuição (mediana, quartis e valores máximos e mínimos) para representar graficamente um conjunto de valores. A Figura 66 apresenta este tipo de gráfico para os resultados dos IQA's do período estudado. A linha central

representa a Mediana, os limites inferiores e superiores da caixa, representam o 1º e o 3º Quartil, respectivamente e, as linhas (bigodes) representam o Valor Mínimo e o Valor Máximo, de acordo com sua direção.

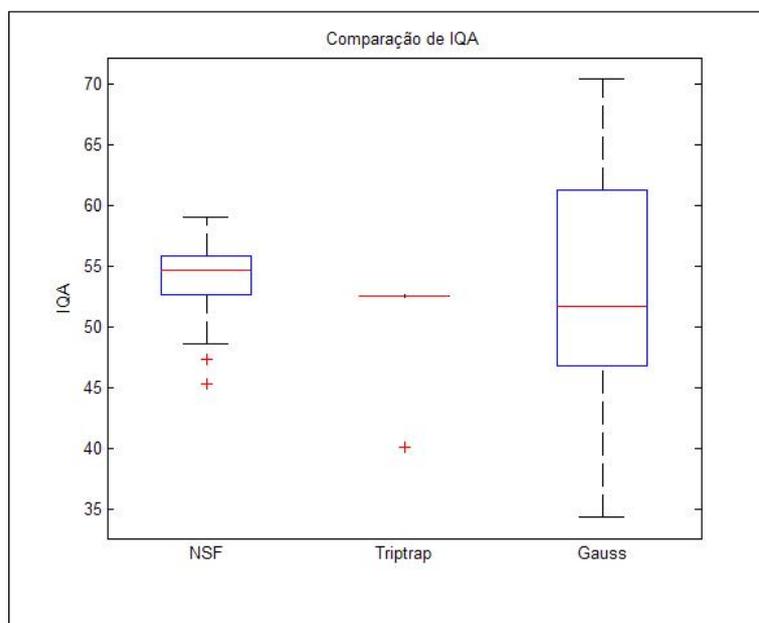


Figura 66 – Gráfico de “box & whiskers”

Observa-se que para o caso do  $IQA_{NSF}$  em dois pontos os processo está fora de controle, ou seja, existem dois valores do IQA que fogem do padrão, da tendência de comportamento desta distribuição, sendo estes valores correspondentes aos meses de novembro e dezembro de 2007.

Para o caso do  $IQA_{triptrap}$ , o único mês em que o resultado se diferenciou dos demais foi classificado como fora de controle. Este valor corresponde ao mês de março de 2008. Já para o  $IQA_{Gauss}$  os resultados estão inteiramente dentro dos limites de controle estabelecidos.

### 5.3 GRÁFICOS DE *BOX & WHISKERS* PARA A MÉDIA E DESVIO PADRÃO

Para uma distribuição normal, 68,26% das medidas (observações) estão localizadas no intervalo de até um desvio padrão da média. Se for considerado o intervalo de até duas unidades de desvio padrão da média, o número de medidas (observações) que se incluem neste intervalo aumenta para aproximadamente

95,46%. Ao considerar o intervalo cujas fronteiras são definidas pela distância de três unidades de desvio padrão da média da distribuição, engloba-se 99,73% das medidas (observações) do estudo (94).

Tabela 16 – Intervalos de controle

Intervalo	IQA NSF	IQA TriTrap	IQA Gauss
$\mu - 1s$	50,56	49,44	44,49
$\mu + 1s$	57,28	54,52	61,81
$\mu - 2s$	47,20	46,90	35,83
$\mu + 2s$	60,64	57,06	70,47
$\mu - 3s$	43,84	44,36	27,17
$\mu + 3s$	63,00	59,60	79,13

Fonte: Dados Primários

Intervalo da Média  $\pm 1$  desvio padrão, que corresponde a 68,26% das observações:

$$(\mu \pm 1s) IQA_{NSF} = [50,56; 57,28]$$

$$(\mu \pm 1s) IQA_{tritrap} = [49,44; 54,52]$$

$$(\mu \pm 1s) IQA_{Gauss} = [44,49; 61,81]$$

Intervalo da Média  $\pm 2$  desvios padrão, que corresponde a 95,46% das observações:

$$(\mu \pm 2s) IQA_{NSF} = [47,20; 60,64]$$

$$(\mu \pm 2s) IQA_{tritrap} = [46,90; 57,06]$$

$$(\mu \pm 2s) IQA_{Gauss} = [35,83; 70,47]$$

Intervalo da Média  $\pm 3$  desvios padrão, que corresponde a 99,73% das observações:

$$(\mu \pm 3s) IQA_{NSF} = [43,84; 63,00]$$

$$(\mu \pm 3s) IQA_{tritrap} = [44,36; 59,60]$$

$$(\mu \pm 3s) IQA_{Gauss} = [27,17; 79,13]$$

Em suma, o  $IQA_{tritrap}$  apresentou a menor dispersão, conferida pela pouca sensibilidade do sistema às variações dos valores dos parâmetros e por sua vez o  $IQA_{Gauss}$  que apresenta a maior sensibilidade às variações dos valores dos parâmetros e portanto, maior dispersão nos resultados. Entre os dois, está o  $IQA_{NSF}$ .

Estas medidas estão graficamente organizadas e apresentadas nas Figuras 71, 72 e 73 seguintes. O limite superior da caixa representa a média e as linhas (bigodes) representam a soma e a diferença da média com 1, 2 ou 3 desvios padrão, para cada um dos casos. Para o caso específico do  $IQA_{Gauss}$  ao considerar  $(\mu \pm 3s)$ , tendo os limites [27,17; 79,13], pode se generalizar que 99,73% das observações que forem realizadas no mesmo ponto e nas mesmas condições da amostragem realizada para este estudo do rio Pimenta Bueno, terão resultados que estarão dentro deste conjunto.

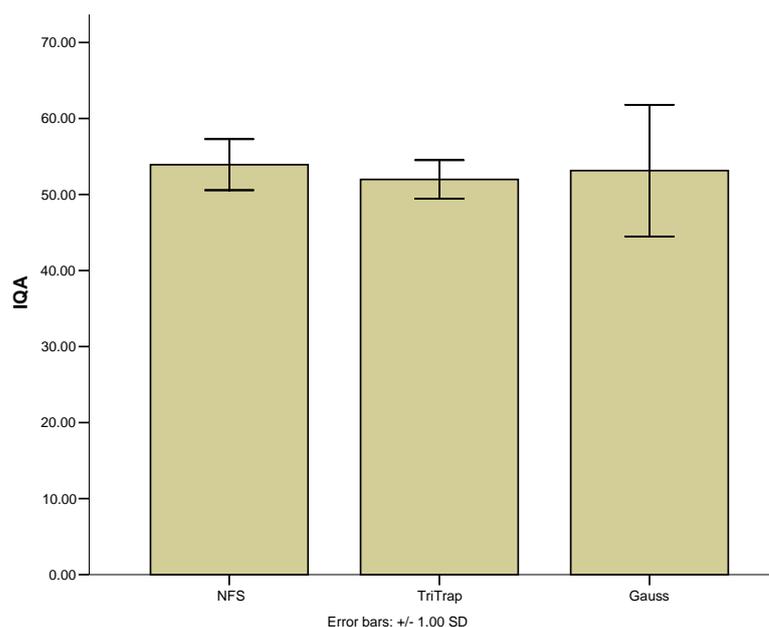


Figura 67 – Média  $\pm$  1 desvio padrão ( $\mu \pm 1s$ )

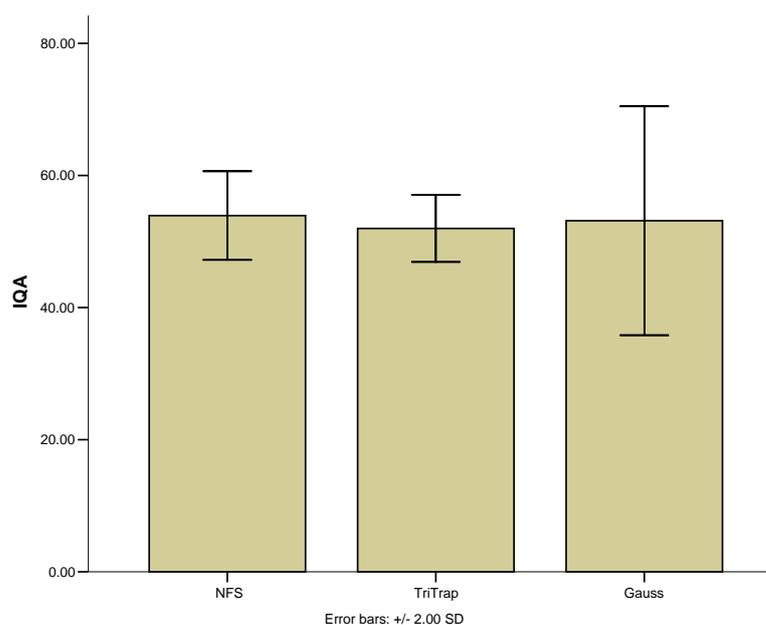


Figura 68 – Média  $\pm$  2 desvios padrão ( $\mu \pm 2s$ )

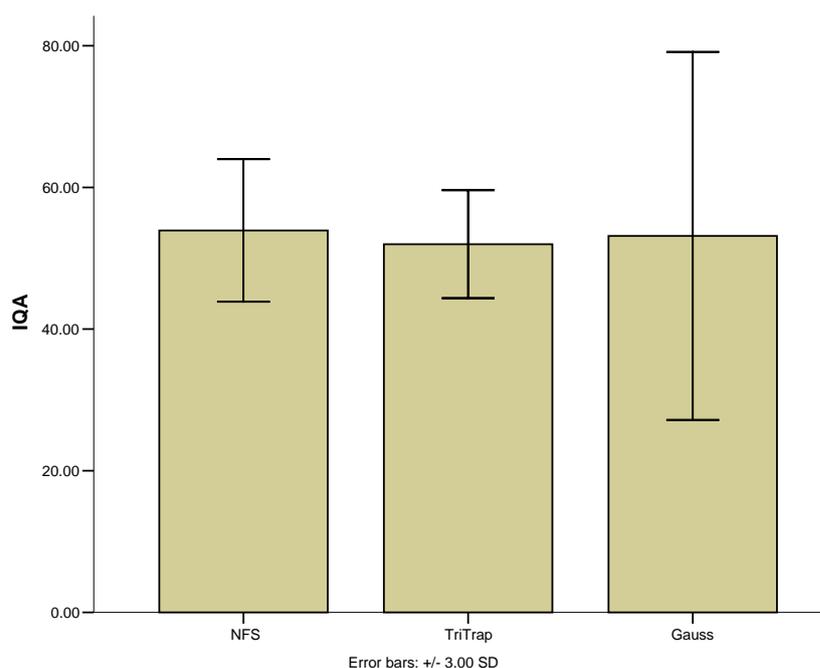


Figura 69 – Média  $\pm$  3 desvios padrão ( $\mu \pm 3s$ )

#### 5.4 GRÁFICOS DE CONTROLE DOS IQA'S

Os gráficos de controle são medidas estatísticas utilizadas para o monitoramento da qualidade de um processo ao longo do tempo. Quando uma medida individual de uma variável estiver normalmente distribuída, um gráfico de controle é utilizado para detectar processos que possam estar fora do controle estatístico. Os limites superiores e inferiores de controle são obtidos a partir da soma ou subtração, respectivamente, com um, dois ou três desvios padrão da distribuição, ou seja, os limites de controle são iguais a  $\mu \pm 1S$ ,  $\mu \pm 2S$  e  $\mu \pm 3S$ .

Os três sinais de advertência que devem ser considerados para decidir se um processo está fora de controle são (95):

- Um ponto está além de três desvios padrão da média;
- Há nove pontos consecutivos que estão de um lado da média;
- Pelo menos dois entre três pontos consecutivos estão a mais do que dois desvios padrão da média.

Considerando estes três sinais de advertência para analisar os três gráficos de controle seguintes, pode se concluir que:

- Apenas o  $IQA_{\text{tritrapp}}$  falhou para o teste da letra “a”, pois no mês de março 2008 o ponto ficou mais do que três desvios padrão da média. O  $IQA_{\text{NSF}}$  e o  $IQA_{\text{Gauss}}$  estão durante todo o processo, a menos de três desvios padrão da média, indicando que para estes das, o processo está dentro dos medidas de controle estatístico.
- Com relação ao sinal de advertência “b”, novamente apenas o  $IQA_{\text{tritrapp}}$  falhou no teste, tendo 23 pontos consecutivos do mesmo lado da média, indicando mais um vez que o processo está fora do controle estatístico;
- Quanto ao sinal de advertência da letra “c” não foram observadas falhas nenhum dos três gráficos de controle.

Mediante análise dos sinais de advertência e dos gráficos apresentados nas Figuras 70, 71 e 72, pode-se dizer que  $IQA_{\text{tritrapp}}$  está fora do controle estatístico e que o  $IQA_{\text{NSF}}$  e  $IQA_{\text{Gauss}}$ , atendem as medidas de controle estatístico estabelecidas.

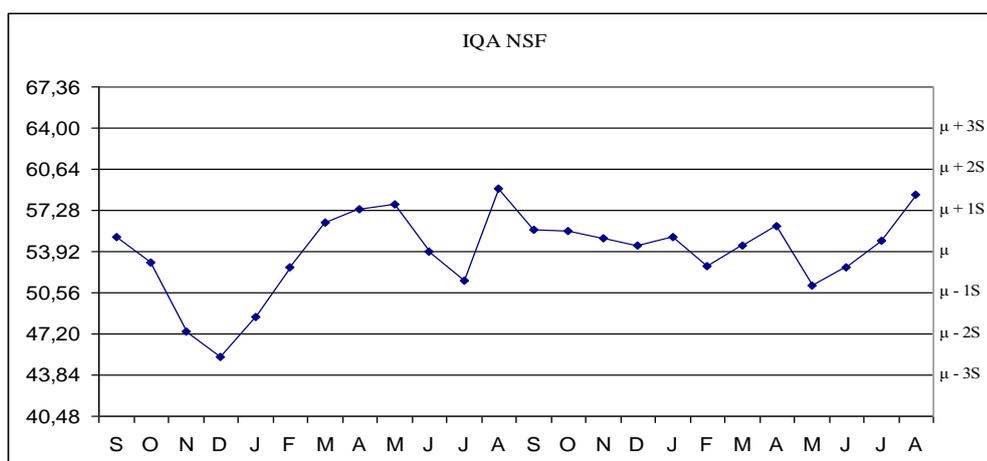


Figura 70 – Gráfico de controle do  $IQA_{\text{NSF}}$ .

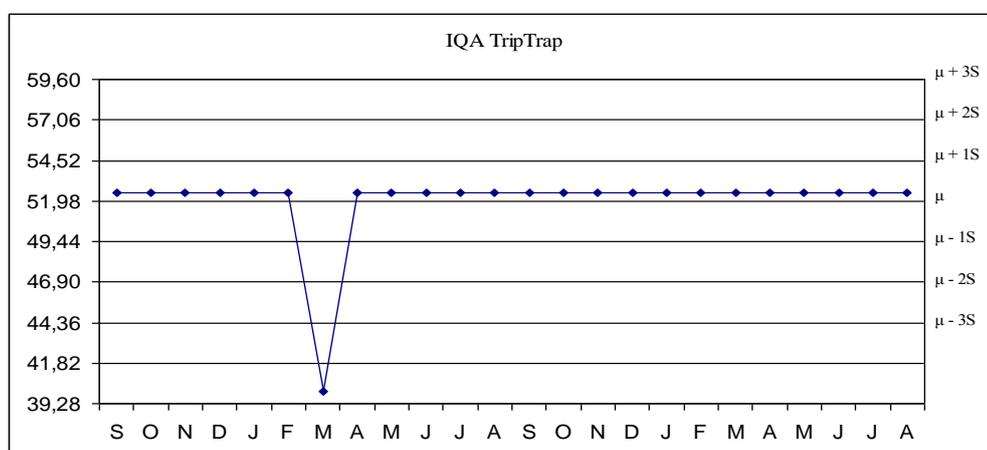


Figura 71 – Gráfico de controle do  $IQA_{\text{tritrapp}}$ .

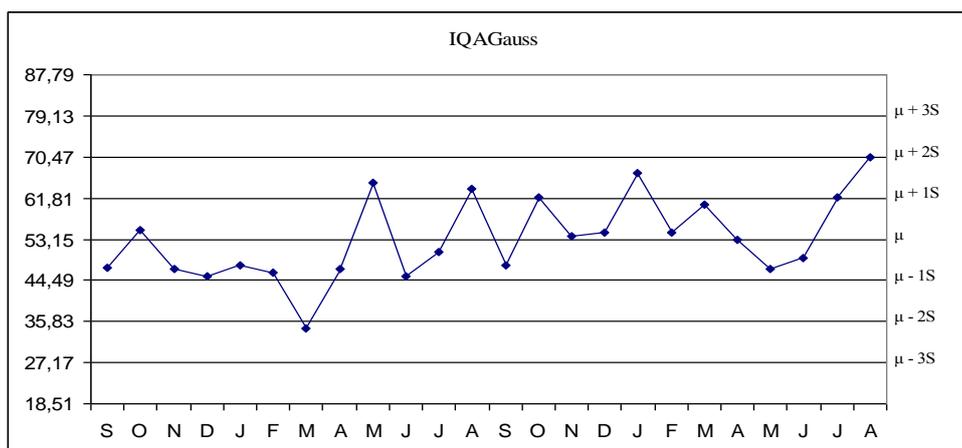


Figura 72 – Gráfico de controle do IQA<sub>Gauss</sub>

## 5.5 HISTOGRAMA DOS VALORES DOS IQA'S

A seguir estão construídos todos os histogramas dos resultados dos IQA's calculados, precedidos cada um deles por uma breve análise. Na Figura 73, que apresenta o Histograma do IQA<sub>NSF</sub> é possível confirmar a ocorrência da assimetria negativa anteriormente calculada, ou seja, pode se entender que há uma maior concentração do número de observações acima da média da distribuição. Verifica-se também que a classe que contém maior número de observações é a de 54 a 57, o que caracteriza água como de qualidade média.

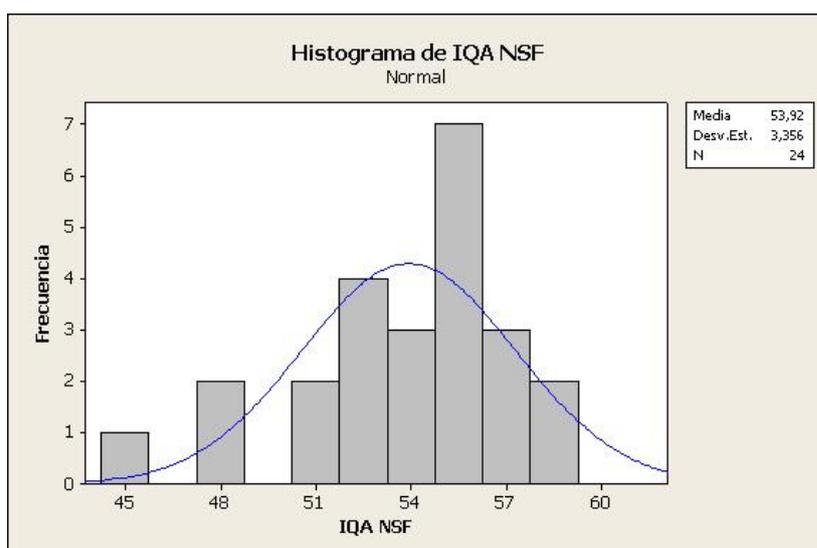


Figura 73 – Histograma o IQA<sub>NSF</sub>

A Figura 74 apresenta o histograma IQA<sub>tritrapp</sub>. Neste caso, é possível verificar também ocorrência da assimetria negativa conferida apenas pelo resultado do mês

de março de 2008, ou seja, todos os valores estão situados na classe que contém o 52,5, com exceção de um único que está abaixo deste valor, o que acaba mascarando o resultado do coeficiente de assimetria.

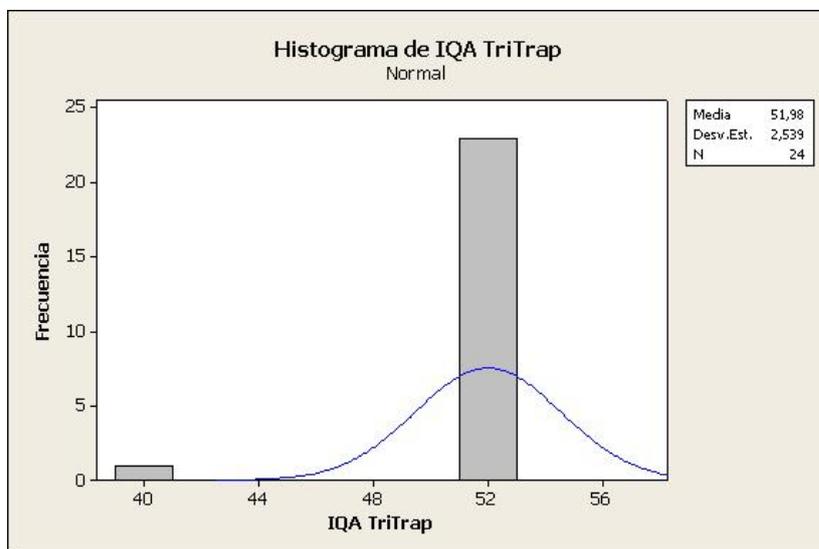


Figura 74 – Histograma do  $IQA_{\text{tritrap}}$

O Histograma do  $IQA_{\text{Gauss}}$  conduz a confirmação do coeficiente de assimetria positiva anteriormente apresentado na Tabela 16. Nestas condições é possível afirmar que o maior número de resultados obtidos (observações) estão abaixo da média da distribuição, o que caracteriza que o  $IQA_{\text{Gauss}}$  é mais rigoroso em seu método de avaliação do os outros dois IQA's. Verifica-se também que a classe que contém o maior número de observações é a que tem como valor central 45, que está como já dito, abaixo do valor da média.

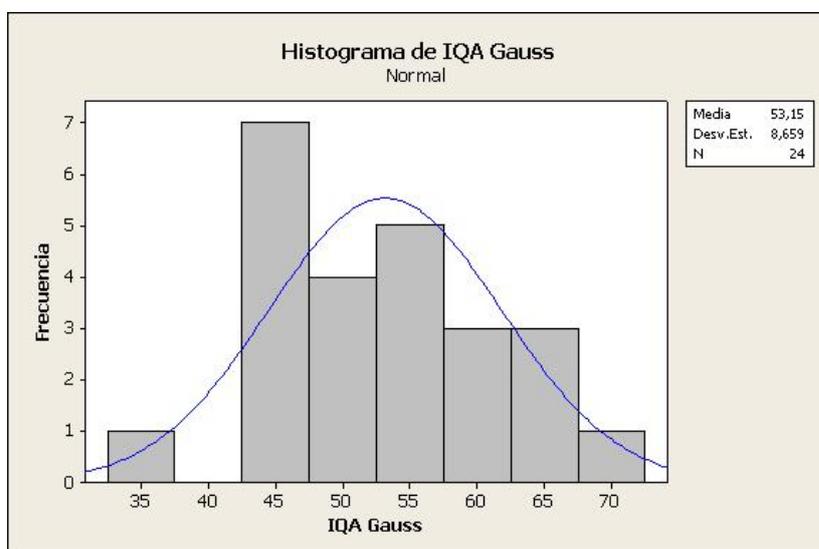


Figura 75 – Histograma do  $IQA_{\text{Gauss}}$

## 5.6 COEFICIENTE DE CORRELAÇÃO LINEAR ENTRE OS IQA'S

Quanto a correlação linear entre os três IQA's calculados, tem-se que a correlação entre o  $IQA_{NSF}$  x  $IQA_{tritrap}$  é uma correlação negativa e muito fraca, podendo ser considerada nula. O valor calculado é de  $r_{NSF \times tritrap} = -0,15$ .

Por sua vez as correlações entre o  $IQA_{NSF}$  x  $IQA_{Gauss}$  e o  $IQA_{tritrap}$  x  $IQA_{Gauss}$ , existe, é positiva e não muito forte, porém, não podendo ser desprezada. Os valores calculados são  $r_{tritrap \times Gauss} = 0,46$  e  $r_{NSF \times Gauss} = 0,47$

No caso do  $IQA_{tritrap}$ , o que permitiu que o seu coeficiente de correlação linear fosse determinado, foi a existência do único valor diferente de 52,5, encontrado no mês de março de 2007 (40,06). Este valor caracterizou a existência de uma correlação linear, no entanto, numa simulação, ao substituí-lo pelo valor comum deste IQA a todos os demais meses, obteve-se como resultado o que se segue:

$r_{NSF \times tritrap} = \text{Inexistente}$ ,  $r_{tritrap \times Gauss} = \text{Inexistente}$  e  $r_{NSF \times Gauss} = 0,46$ . Pode-se aceitar então, que a correlação linear, para os casos em que o  $IQA_{tritrap}$  é admitido, é um resultado enviesado, não representado a realidade do fenômeno em estudo, devendo ser desconsiderada. Já para o caso do caso da correlação  $IQA_{NSF}$  x  $IQA_{Gauss}$ , o valor encontrado reflete a realidade do fenômeno em estudo, corroborando mais uma vez para a tentativa de validação do  $IQA_{Gauss}$ .

Na Figura seguinte, observa-se a correlação linear, entre os IQA's.

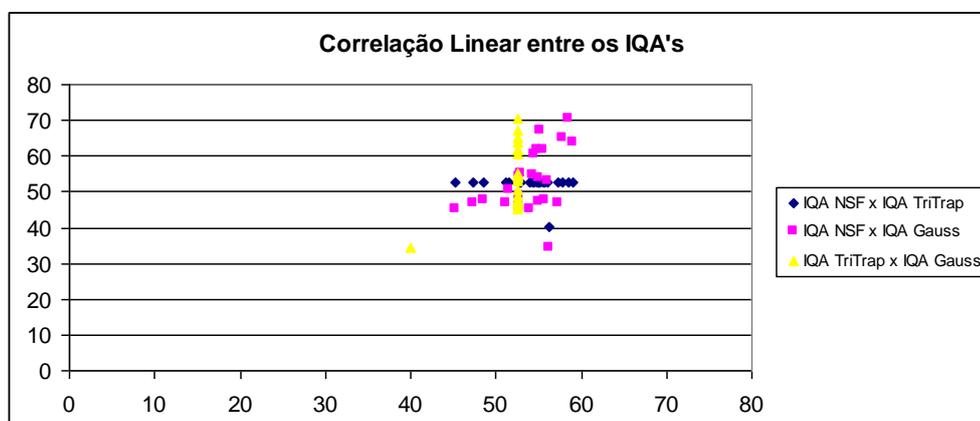


Figura 76 – Gráfico da correlação linear entre os IQA's

## 5.7 TESTES DE HIPÓTESES

Para testar as hipóteses, que consistem neste caso em verificar se existe diferença significativa entre as médias dos valores dos IQA's foram realizados três testes estatísticos distintos, que ao final permitiram decidir pela aceitação ou rejeição das hipóteses estabelecidas. Para os três testes o nível de significância utilizado é 5%, ou seja,  $\alpha=0,05$ . Em outras palavras, a certeza é de 95%.

As hipóteses a serem testadas são:

$H_0$ :  $\mu \text{ IQA}_{\text{NSF}} = \mu \text{ IQA}_{\text{tritrapp}} = \mu \text{ IQA}_{\text{Gauss}}$ , ou seja, não existe diferença significativa entre as média dos três IQA's.

$H_1$ :  $\mu \text{ IQA}_{\text{NSF}} \neq \mu \text{ IQA}_{\text{tritrapp}} \neq \mu \text{ IQA}_{\text{Gauss}}$ , ou seja, existe diferença significativa entre as médias dos IQA's.

### 5.7.1 Análise de Variância

A análise de variância permite afirmar se existe ou não diferença significativa entre as médias das amostras de uma mesma população. Para tanto, é necessário calcular o fator denominado Anova e realizar os testes de verificação para definir quanto à aceitação ou rejeição das hipóteses ( $H_0$  e  $H_1$ ).

#### 5.7.1.1 Cálculo da Anova: Fator Único

Tabela 17 – Cálculo da ANOVA entre o  $\text{IQA}_{\text{NSF}}$  x  $\text{IQA}_{\text{tritrapp}}$  utilizando excel

ANOVA: Fator único dos $\text{IQA}_{\text{NSF}}$ x $\text{IQA}_{\text{tritrapp}}$				
Fonte da variação	<i>Gl</i>	<i>F</i>	<i>valor-P</i>	<i>F crítico</i>
Entre grupos	1	5,1064	0,0286	4,0517

Fonte: Dados Primários

Como o *F observado* 5,1064 é maior que o *F crítico* 4,0517 correspondente ao nível de significância adotado de  $\alpha = 0,05$ , conclui-se que  $H_0$  deve ser rejeitada.

Outra análise desta mesma medida que pode ser feita e que corrobora com esta afirmação é a de que, como o *valor p* 0,0286 do *F observado* 5,1064 é menor que o nível de significância  $\alpha = 0,05$  adotado,  $H_0$  deve ser rejeitada. Ao rejeitar  $H_0$ , aceita-se  $H_1$ .

Tabela 18 – Cálculo da ANOVA entre o IQA<sub>NSF</sub> x IQA<sub>Gauss</sub> utilizando excel

ANOVA: fator único do IQA <sub>NSF</sub> x IQA <sub>Gauss</sub>				
Fonte da variação	Gl	F	valor-P	F crítico
Entre grupos	1	0,1679	0,6839	4,0517

Fonte: Dados Primários

Considerando o nível de significância adotado de  $\alpha = 0,05$  e sendo:

$$f_{\text{observado}} < f_{\text{Crítico}}$$

$$0,1679 < 4,0517 \Rightarrow \text{aceita-se } H_0$$

Ou ainda, como o *valor p* 0,6839  $> \alpha$  adotado (0,05), então  $H_0$  deve ser aceita.

Tabela 19 – Cálculo da ANOVA entre o IQA<sub>tritrap</sub> x IQA<sub>Gauss</sub> utilizando excel

ANOVA: fator único do IQA <sub>tritrap</sub> x IQA <sub>Gauss</sub>				
Fonte da variação	Gl	F	valor-P	F crítico
Entre grupos	1	0,3995	0,5305	4,0517

Fonte: Dados Primários

Como o  $F_{\text{observado}} = 0,3995$  é menor que o  $F_{\text{crítico}} = 4,0517$ , com  $\alpha = 0,05$ , então  $H_0$  deve ser aceita, e da mesma forma, como o *valor p* 0,5305 do  $F_{\text{observado}}$  0,3995 é maior que o nível de significância  $\alpha=0,05$  adotado,  $H_0$  deverá ser aceita.

Como conclusão final deste teste tem-se:

- Existe diferença significativa, entre as médias dos IQA<sub>NSF</sub> x IQA<sub>tritrap</sub> e portanto, rejeita-se  $H_0$  para este caso.
- Não existe diferença significativa entre as médias do IQA<sub>NSF</sub> x IQA<sub>Gauss</sub> e do IQA<sub>tritrap</sub> x IQA<sub>Gauss</sub>, e portanto, aceita-se  $H_0$  para estes casos.

Ao aceitar a hipótese nula  $H_0$ , para o caso da letra “b” confirmando que não há diferença significativa entre as médias para àqueles casos, está se caminhando para a tentativa de validação do IQA<sub>Gauss</sub> que se apresenta, até o momento, como uma proposta viável de avaliação da qualidade da água baseada na lógica *fuzzy*.

### 5.7.2 Teste – T: Duas Amostras Presumindo Variâncias Diferentes

Para tirar conclusões a partir do teste t para duas amostras, presumindo variâncias diferentes, é necessário comparar o *p value* com o nível de significância  $\alpha$  adotado. Se este for maior que o valor de  $\alpha$  então, aceita-se  $H_0$ . (94).

Para o caso das Tabelas 24, 25 e 26 seguintes, o *p value* aparece com a notação  $P(T \leq t)$  bi-caudal, que será sempre comparado ao valor  $\alpha=0,05$  que é o nível de significância que se adotou.

Tabela 20 – Teste t para o  $IQA_{NSF} \times IQA_{tritrap}$

Teste-t: duas amostras	$IQA_{NSF}$	$IQA_{tritrap}$
Variância	11,26	6,45
Observações	24	24
Hipótese da diferença de média	0	
$P(T \leq t)$ bi-caudal	0,0290	

Fonte: Dados Primários

Para este caso, como  $p\ value=0,0290$  é menor que  $\alpha=0,05$ , então rejeita-se a  $H_0$ , ou seja, a diferença entre as médias para este caso é significativa.

Tabela 21 – Teste t para o  $IQA_{NSF} \times IQA_{Gauss}$

Teste-t: duas amostras	$IQA_{NSF}$	$IQA_{Gauss}$
Variância	11,2597	74,9850
Observações	24	24
Hipótese da diferença de média	0	
$P(T \leq t)$ bi-caudal	0,6849	

Fonte: Dados Primários

Na Tabela 21 é possível notar que  $p\ value > \alpha$ , então aceita-se  $H_0$  para este par amostral.

Tabela 22 – Teste t para o  $IQA_{tritrap} \times IQA_{Gauss}$

Teste-t: duas amostras	$IQA_{TriTrap}$	$IQA_{Gauss}$
Variância	6,4456	74,9850
Observações	24	24
Hipótese da diferença de média	0	
$P(T \leq t)$ bi-caudal	0,5327	

Fonte: Dados Primários

Na Tabela 22, novamente o  $p\ value > \alpha$  ( $0,5327 > 0,05$ ), decorrendo daí o dever de aceitar  $H_0$ , concluindo que, também para este caso, não há diferença significativa entre as médias.

### 5.7.3 Teste – T: Duas Amostras em Par para Médias

Este tipo de teste é utilizado para analisar duas populações relacionadas (associadas). Para tanto a variável de interesse deve ser diferente entre os pares das duas amostras, que devem ter o mesmo tamanho. Duas amostras são ditas emparelhadas ou associadas quando cada elemento de uma amostra corresponde a um elemento da outra, o que é o caso. Satisfeitas estas condições procedeu-se o novo teste, cujos resultados estão apresentados nas Tabelas seguintes:

Tabela 23 – Teste-t: duas amostras em par para médias

Resumo	$IQA_{NSF} \times IQA_{tritrap}$
Observações	24
Hipótese da diferença de média	0
P(T<=t) bi-caudal	0,0457

Fonte: Dados Primários

A análise dos dados obtidos como resultado deste teste levam a concluir que a hipótese nula deve ser rejeitada para o par de amostras  $IQA_{NSF} \times IQA_{tritrap}$  uma vez que o *p value* (P(T<=t) bi-caudal) é menor que o nível de significância  $\alpha=0,05$ .

Tanto para o caso do teste que compara o par de amostras  $IQA_{NSF} \times IQA_{Gauss}$  como para do teste que compara o par de amostras  $IQA_{tritrap} \times IQA_{Gauss}$   $H_0$  deverá ser aceita, pois *p value* >  $\alpha$ , advindo daí a possibilidade de enunciar a assertiva de que não existe diferença significativa entre os pares de amostras para ambos os casos descritos, cujos resultados estão apresentados na Tabela 24 e 25.

Tabela 24 – Teste-t: duas amostras em par para médias

Resumo	$IQA_{NSF} \times IQA_{Gauss}$
Observações	24
Hipótese da diferença de média	0
P(T<=t) bi-caudal	0,6249

Fonte: Dados Primários

Tabela 25 – Teste-t: duas amostras em par para médias

Resumo	$IQA_{TriTrap} \times IQA_{Gauss}$
Observações	24
Hipótese da diferença de média	0
P(T<=t) bi-caudal	0,4733

Fonte: Dados Primários

## 6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A água do Rio Pimenta Bueno, tomando-se por base os valores dos parâmetros das 48 amostras coletadas por um período de 24 meses, quando submetida ao padrão de julgamento do  $IQA_{NSF}$  ofereceu como resultado uma classificação que a enquadrava na categoria “média”, em 21 dos 24 meses, ou seja, em 87,5% dos casos. Nos outros três meses, a água foi enquadrada na categoria “ruim”, não obstante o fato de que, em um dos meses (jan/2008) o resultado foi de 48,59, ou seja, próximo ao limite superior da categoria “ruim”, mesmo assim, para a metodologia de julgamento convencional, a pertinência deste valor é inteiramente a esta categoria.

A lógica *fuzzy* tem grande potencial de aplicação em diversos campos do conhecimento e se mostrou favorável para elaboração dos IQA's, nela fundamentados. Dos dois novos IQA's propostos neste trabalho, um deles se demonstrou como ferramenta funcional e eficaz para interpretar e integrar os diversos parâmetros que compõe um índice de qualidade da água. A utilização do MATLAB® para configuração do novo IQA mostrou-se uma ferramenta robusta e satisfatória para as necessidades que se apresentaram no decurso desta pesquisa.

Dos dois novos IQA's *fuzzy* apresentados, um deles foi configurado com a utilização de funções de pertinência triangulares e trapezoidais, convenientemente combinadas ( $IQA_{\text{tritrap}}$ ) e o outro, foi configurado com funções de pertinência Gaussianas ( $IQA_{\text{Gauss}}$ ).

Para testar os novos IQA's propostos, inseriu-se as mesmas informações coletadas para o cálculo do  $IQA_{NSF}$  e comparou-se os resultados deste, com os obtidos pelo julgamento dos dois modelos *fuzzy*. As comparações realizadas ao longo do trabalho permitem as seguintes afirmações:

- a. O  $IQA_{\text{tritrap}}$  é pouco sensível às variações dos valores dos parâmetros que o compõe, gerando durante 23 dos 24 meses (96% dos casos) sempre o mesmo resultado.
- b. O  $IQA_{\text{Gauss}}$  é mais sensível que o  $IQA_{NSF}$  e que o  $IQA_{\text{tritrap}}$  às variações dos valores dos parâmetros que o compõe. Gerando sempre valores de IQA

- fortemente influenciados pelos valores dos parâmetros.
- c. Os testes de hipóteses realizados permitem afirmar que não existe diferença significativa entre as médias do  $IQA_{Gauss}$  e do  $IQA_{NSF}$  bem como entre as médias do  $IQA_{Gauss}$  e do  $IQA_{tritrap}$ .
  - d. Os mesmos testes de hipóteses realizados permitem afirmar que existe diferença significativa entre as médias do  $IQA_{tritrap}$  e do  $IQA_{Gauss}$ .
  - e. Quando submetidos ao gráfico de controle, com os limites superiores e inferiores estabelecido pela média mais ou menos três desvios padrão, apenas o  $IQA_{tritrap}$  falhou, sendo que este último, comportou-se praticante como uma função constante. O  $IQA_{NSF}$  e o  $IQA_{Gauss}$  mostraram-se dentro dos controles estatísticos durante todo o processo de avaliação.
  - f. O  $IQA_{Gauss}$  apresentou maior dispersão e conseqüentemente maior desvio padrão que os demais;

O modelo de julgamento convencional classifica os resultados obtidos como pertencente a uma única categoria de classificação da água, enquanto, o modelo de julgamento da lógica *fuzzy*, permitiu o enquadramento de um mesmo resultado em mais de uma das categorias de classificação da qualidade da água, porém, tal fato não ocorreu no sistema *tritrap* da forma esperada, sendo que, em apenas um dos meses este sistema retornou valores pertencentes a mais de uma categoria simultaneamente e, em todos os demais, o resultado ficou inteiramente pertencente a categoria “média”, comportando-se então, de forma muito próxima a do IQA convencional. Já o  $IQA_{Gauss}$  em todos os meses retornou valores de pertinência às inúmeras categorias possíveis, com predominância para categoria “média”.

A Correlação Linear nos casos em que envolvem os resultados do  $IQA_{tritrap}$  como uma das variáveis de correlação, deverá ser desconsiderada, haja vista, que em apenas uma das vezes, o resultado obtido foi diferente dos demais meses, ou seja, conclui-se que há ausência de correlação linear entre o  $IQA_{tritrap}$  x  $IQA_{Gauss}$  e entre o  $IQA_{tritrap}$  x  $IQA_{NSF}$ . Já entre o  $IQA_{NSF}$  x  $IQA_{Gauss}$  existe correlação linear positiva da ordem de 0,47.

O cálculo do  $IQA_{NSF}$  ao longo deste trabalho foi realizado com o intuito de

servir como referencial de comparação, uma vez que, este IQA foi elaborado, testado e validado por uma equipe de especialistas e é mundialmente aceito, sendo utilizado em diversos países do mundo por organizações governamentais e não governamentais. Para que o IQA proposto pudesse ser aceito, a premissa era de que ele gerasse resultados diferentes do  $IQA_{NSF}$ , porém suas médias não deveriam ter diferenças significativas, pois, o principal objetivo não era a construção de um IQA que apresentasse resultados mais ou menos rígidos do proposto pela *National Sanitation Foundation – NSF* e sim, apresentar uma proposta que gerasse resultados o quanto mais próximo possível do  $IQA_{NSF}$ , contudo, utilizando um novo padrão de julgamento que permitisse ao resultado obtido, o pertencimento a inúmeras categorias da *NSF* simultaneamente e, foi o que se conseguiu com o  $IQA_{Gauss}$ , não ocorrendo o mesmo com o  $IQA_{tritrap}$ .

Diante dos fatos expostos ao longo desta pesquisa e do que se apresentou como considerações finais, conclui-se de forma derradeira que o  $IQA_{tritrap}$  não deve ser aceito como nova alternativa de avaliação da qualidade da água, ou seja, este IQA é inválido, inseguro e não atendeu ao proposto, devendo ser rejeitado. Por sua vez, o  $IQA_{Gauss}$  se mostrou como alternativa viável, segura e mais flexível para avaliação da qualidade da água, confirmado inclusive pelos testes estatísticos, devendo portanto, ser considerado aceito como alternativa válida para classificação da qualidade da água, ou seja, é a confirmação da validade de um novo IQA, fundamentado na lógica *fuzzy*, conforme proposto nos objetivos deste trabalho.

## 6.1 DIFICULDADES ENCONTRADAS

Duas foram as principais dificuldades encontradas para a realização deste estudo: a primeira delas diz respeito ao levantamento dos dados para serem utilizados na pesquisa, haja vista que as informações necessárias, não estavam todas disponíveis em nenhuma organização governamental ou não governamental, o que levou à espera pelo transcorrer de dois anos para se coletar as informações a serem analisadas.

A segunda dificuldade está relacionada a obrigatoriedade que acaba existindo

em se agrupar os parâmetros em subgrupos, formando os subsistemas para processarem as informações. O desejo inicial era de se inserir todas as informações em uma única máquina de inferência e esta geraria o resultado do IQA, no entanto, este caminho se inviabilizou dado o número de regras que se criou (quase 2 milhões de regras) que para serem processadas demoravam muitas horas, inviabilizando as simulações.

## 6.2 RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Para a realização de trabalhos futuros, recomenda-se inicialmente a utilização do IQA<sub>Gauss</sub> desta proposta, para avaliar diferentes corpos d'água, comparando os resultados, com vistas ao abastecimento humano. Como segunda recomendação, a avaliação poderá incluir os níveis de incerteza na variável de saída, ou seja, avaliar a qualidade da água segundo os seus múltiplos e difusos interesses (indústria, irrigação, piscicultura, pecuária).

Outra possibilidade, é a incorporação deste IQA<sub>Gauss</sub> como ferramenta de avaliação da qualidade no pontos de captação da companhia de águas e esgotos (CAERD) em todo o estado de Rondônia.

Recomenda-se, ainda a aplicação da lógica *fuzzy* para:

- a. Monitorar a qualidade de um corpo hídrico, coletando amostras em diversos pontos de captação, de preferência próximo à centros urbanos distintos;
- b. Realizar o desenvolvimento de outros indicadores de qualidade ambiental;
- c. Desenvolver novos padrões de classificação para os resultados de exames laboratoriais, onde as fronteiras para os limites mínimos e máximos de determinada substância ou patógeno, são rigidamente definidas;
- d. Estudar alternativas de configuração de um sistema *fuzzy* que elimine a necessidade de agrupamento dos parâmetros em subsistemas, como foi o caso deste trabalho, comparando os resultados.

## REFERÊNCIAS

- (1) Borsoi ZMF, Torres SDA. A Política de Recursos Hídricos no Brasil. Revista do BNDES: 1997. [acesso em 16/03/2007]; Disponível em: [www.bndes.gov.br/conhecimento/revista/rev806.pdf](http://www.bndes.gov.br/conhecimento/revista/rev806.pdf).
- (2) Richter CA, Azevedo Netto JM. Tratamento de Água: Tecnologia atualizada. São Paulo: Edgard Blücher; 2007.
- (3) Ferreira, MR. Problemas ambientais como desafio para Psicologia. In: Günther H; Pinheiro JQ, Guzzo RSL. Psicologia Ambiental: entendendo as relações do homem com seu ambiente. 2ª ed. Campinas: Alínea; 2006.
- (4) Castro CFA, Scariot A. A água e o objetivos de desenvolvimento do Milênio. In: Dowbor L, Tagnin RA (Orgs.). Administrando a água como se fosse importante. São Paulo: Editora Senac; 2005. p. 99-108.
- (5) Gomes PCFL. Análise físico-química e microbiológica da água de bebedouros de uma IFES do sul de Minas Gerais. Hig. aliment. 2005 jun;133(19): 63-5.
- (6) Tundisi JG. Água no século XXI: enfrentado a escassez. 2ª ed. São Paulo: Rima; 2005.
- (7) Sá LLC, *et al.* Qualidade microbiológica da água para consumo humano em duas áreas contempladas com intervenções de saneamento – Belém do Pará, Brasil. Epidemiol. serv. saúde. 2005 jul-set;4(3):171-80.
- (8) Ocampo-Duque W, Ferré-Huguet N, Domingo JL, Schuhmacher M. Assessing water quality in rivers with fuzzy inference systems: A case study. Environ Int. 2006 mai; 32:733-2.
- (9) Speidel DH, Ruedisili LC, Agnew AF. Perspectives on water: uses and abuses. New York: Oxford University Press; 2004.
- (10) Malutta C. Método de apoio à tomada de decisão sobre a adequação de aterros sanitários utilizando a lógica *fuzzy* [tese]. Florianópolis: Universidade Federal de Santa Catarina, Doutorado em Engenharia de Produção e Sistemas (EPS); 2004.
- (11) Icajá Y. Fuzzy evaluation of water quality classification. Ecological Indicators. 2007 jul;7(3):710-8.
- (12) Lermontov A, Yokoyama L, Lermontov M, Machado MAS. River quality analysis using *fuzzy* water quality index: Ribeira do Iguape river watershed, Brazil. Ecological Indicators. 2009 nov;9(6):1188-7.
- (13) RONDÔNIA. Lei Complementar nº 233, de 06 de junho de 2000. Dispõe sobre o Zoneamento Socioeconômico-Ecológico do Estado de Rondônia – ZSEE e dá outras providências. Porto Velho, 2000.

- (14) BRASIL. Decreto n. 5.440, de 04 de maio de 2005. Estabelece definições e procedimentos sobre o controle de qualidade da água de sistemas de abastecimento e institui mecanismos e instrumentos para divulgação de informação ao consumidor sobre a qualidade da água para consumo humano. Brasília, 2005.
- (15) ABNT/NBR. Associação Brasileira de Normas e Técnicas. Preservação e técnicas de amostragem de efluentes líquidos e corpos receptores. NBR 9898. Cópia autorizada para uso exclusivo de Aécio A.Pereira. 22 p. Rio de Janeiro;1987.
- (16) Bilich MR, Lacerda MPC. Avaliação da qualidade da água do Distrito Federal (DF), por meio de geoprocessamento. Anais do XII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto; 16-21 abril 2005; Goiânia, Brasil; INPE: 2059-5; 2005.
- (17) Libânio M. Fundamentos de qualidade e tratamento de Água. Campinas: Átomo; 2005.
- (18) BRASIL. Secretaria de Estado do Meio Ambiente e Desenvolvimento Sustentável de Minas Gerais. Sistema de Cálculo da Qualidade da Água (SCQA): Estabelecimento das Equações do índice de Qualidade das Águas (IQA). Disponível em: <http://www.igam.mg.gov.br>. Belo Horizonte, 2005.
- (19) BRASIL. Programa Nacional do Meio Ambiente PNMA II. Agência Estadual de Meio Ambiente e Recursos Hídricos do Estado do Pernambuco. Índices e Indicadores de Qualidade de Água. Recife: 2006. [acesso em 07/06/2009]; Disponível em: <http://www.cprh.pe.gov.br>.
- (20) Elmiro MAT, Freitas, CR *et al.* Análise da redução do Índice de Qualidade da Água (IQA) utilizando Ambientes de Geoprocessamento. Belo Horizonte: Universidade Federal de Minas Gerais; 2009. [acesso em 06/07/2009]; Disponível em: <http://www.cartografia.cl/>
- (21) Lima EBNR. Modelagem Integrada para Gestão da Qualidade da Água na Bacia do Rio Cuiabá [tese].Rio de Janeiro: Universidade Federal do Rio de Janeiro; 2001.
- (22) Stambuk-Giljanovci N. Water Quality Evaluation by Index in Dalmatia. Wat. Res. 1999 nov;33(16):3423-40.
- (23) Lima AJB, Costa GRLX, Soares LPC. Avaliação do Índice de Qualidade da Água (IQA) nos reservatórios com capacidade de acumulação de água acima de 5 milhões de metros cúbicos, monitorados pelo IGARN na bacia hidrográfica Apodí-Mossoró/RN nos anos de 2005 e 2006. Anais do VIII Congresso de Ecologia do Brasil; 23 a 28 de set 2007; Caxambu – MG, 2007.
- (24) Haasee J, Possoli S. Estudo da Utilização da Técnica de Análise Fatorial na Elaboração de um Índice de Qualidade da Água: Comparação entre dois Regimes Hidrológicos diferentes, RS. Acta Limnológica Brasiliensia. 1993 jun; 6(1): 245-5.
- (25) Abbasi SA. Water Quality Indices: State of the art. Centre for Pollution Control & Energy Technology Pondicherry University. Journal of the Institution of Public Health Engineers; 13-24; Pondicherry; 1999.

- (26) Marques MN, *et al.* Avaliação de um índice dinâmico de qualidade de água para abastecimento: um estudo de caso. *Exacta*. 2007 jan; 5 (1):47-5.
- (27) Toledo LG, Deschamps FC, Nicolella G, *et al.* Impacto Ambiental da Cultura do Arroz Irrigado com Uso de Índice de Qualidade de Água (IQA). São Paulo: Embrapa Meio Ambiente, 2002, Comunicado Técnico 8.
- (28) Toledo LG, Nicolella G. Índice de qualidade de Água em Microbacia sob uso agrícola e urbano. *Scientia Agrícola*. 2002 jan; 59(1): 181-6.
- (29) Lermontov A, Yokoyama L, Lermontov M; Machado MAS. Aplicação da Lógica Nebulosa na Parametrização de um novo índice qualidade de água. *Engevista*. 2008 dez;10(2):106-25.
- (30) Song T, Kim K. Development of a water quality loading index based on water quality modeling. *Journal of Environmental Management*. 2009 mar; 90(3):1534-3.
- (31) Ghiselli G. Avaliação da qualidade da água destinada ao abastecimento público na região de Campinas: Ocorrência e determinação dos interferentes endócrinos (IE) e produtos farmacêuticos e de higiene pessoal (PFHP) [tese]. Campinas: Instituto de Química da Universidade Estadual de Campinas; 2006.
- (32) Amendola, M, Souza AL, Barros LC. Manual do uso da teoria dos conjuntos *fuzzy* no MATLAB 6.5. FEAGRI & IMECC/ UNICAMP. Versão II, maio de 2005.
- (33) Wen K-L. A Matlab toolbox for grey clustering and fuzzy comprehensive evaluation. *Advances in Engineering Software*. 2008 fev;39(2):137-5.
- (34) Pruski FF, Silva DD. Gestão de Recursos Hídricos: aspectos legais, econômicos, administrativos e sociais. Viçosa: Ed. Folha de Viçosa; 2000.
- (35) Rebouças AC. Água e Desenvolvimento Rural. *Estudos Avançados*. 2001 set; 15(43):327-344.
- (36) Graf, ACB. Água, bem mais precioso do milênio: o papel dos Estados. Centro de Estudos Judiciários do Conselho da Justiça. 2000 set/dez; 12: 30-39.
- (37) Kahraman C, Kaya I. Fuzzy process capability indices for quality control of irrigation water. *Stoch Environ Res Risk Assess*. 2009 mai;23(4):451-62.
- (38) Oliveira EM. Educação Ambiental: uma possível abordagem. 2ª ed. Brasília: IBAMA; 2000.
- (39) Dowbor L. Economia da Água. In: Dowbor L, Tagnin R (Orgs.). Administrando a água como se fosse importante. São Paulo: Editora Senac; 2005. p.27-36.
- (40) Simons MO. A educação Ambiental e a água nossa de cada dia. In.: Dowbor L, Tagnin R (Orgs.). Administrando a água como se fosse importante. São Paulo: Editora Senac; 2005. p. 191-2005.

- (41) Branco SM, *et al.* Água e saúde humana. In: Rebouças AC, Braga B, Tundisi JG (Orgs.). Águas Doces no Brasil: capital ecológico, uso e conservação. 3ªed. São Paulo: Escritura Editora; 2006. p.241-265.
- (42) Salati E, Lemos HM, Salati, E. Água e o desenvolvimento Sustentável. In: Rebouças AC, Braga B, Tundisi JC (Orgs.). Águas doces no Brasil: capital ecológico, uso e conservação. 3ª ed. São Paulo: Escritura Editora; 2006. p.37-60.
- (43) Freitas MB, Freitas CM. A vigilância da qualidade da água da água para consumo humano – desafios e perspectivas para o sistema único de saúde. Ciênc.e saúde coletiva. 2005 out;10(4):993-04.
- (44) D'Águila PS. Avaliação da qualidade de água para o abastecimento público do Município de Nova Iguaçu. Cad. saúde pública. 2000 jul;16(3):791-8.
- (45) Moura LAA. Qualidade e Gestão Ambiental. 3ª ed. São Paulo: Editora Juarez de Oliveira; 2002.
- (46) Yassin MM, AMR SSA, Al-Najar HM. Assessment of microbiological water quality and its relation to human health in Gaza Governorate, Gaza Strip. Public Health. 2006 dez;120(12):1177-7.
- (47) Spanos T, Simeonov V, Stratis J, Xristina X. Assessment of Water Quality for Human Consumption. Microchimica Acta. 2003 jan ;141(1-2):35-0.
- (48) Sadiq Rehan, Kleiner Y, Rajani B. Water Quality Failures in Distribution Networks-Risk Analysis Using Fuzzy Logic and Evidential Reasoning. Risk Analysis. 2007 out;27(5):1381-94.
- (49) Freitas MB, *et al.* Importância da análise da água para saúde pública em duas regiões do Estado do Rio de Janeiro: enfoque para coliformes fecais, nitrato e alumínio. Cad. saúde pública. 2001 mai;17(3):651-660.
- (50) MOISÉS, M. As redes de atenção primária ambiental e a rede de dirigentes e técnicos em vigilância ambiental em saúde. [Banco de dados na Internet]. 2005. [acesso em 22/07/2005]; Disponível em: [www.ensp.fiocruz.br/rbhs/Docs/fsm](http://www.ensp.fiocruz.br/rbhs/Docs/fsm)
- (51) Santos FJ. Oficina de trabalho: ampliando o debate sobre as águas brasileiras. Políticas públicas: infra-estrutura, atuação do setor saúde em saneamento e saúde ambiental; [acesso em 27/03/2005]; Disponível em: [www.pnrh.cnrh-srh.gov.br/pág/documentos](http://www.pnrh.cnrh-srh.gov.br/pág/documentos).
- (52) OMS/OPAS (Organização Mundial de Saúde/ Organização Pan-americana de Saúde). Água e saúde. Brasil, 30/05/2001. [acesso em 18/09/2005]; Disponível em: [www.opas.org.br/sistema/fotos/agua.PDF](http://www.opas.org.br/sistema/fotos/agua.PDF).
- (53) UNIÁGUA – Universidade da água. [acesso em 26/10/2008]; Disponível em: [www.uniagua.org.br](http://www.uniagua.org.br).(73) Oliveira B, Negrão FI, Silva AGLS. Mapeamento dos Aquíferos do Estado da Bahia utilizando Índice de Qualidade Natural das Águas Subterrâneas – IQNAS. Águas Subterrâneas. 2007;21(1):123-37.

- (54) Branco SM. O Meio Ambiente em Debate. 3ª ed. São Paulo: Moderna; 2004.
- (55) Rocha GA. O grande manancial do Cone Sul. Estud. av. 1997 mai/ago; 11(30):191-12.
- (56) Freitas MB, Almeida LM. Qualidade da água subterrânea e sazonalidade de organismos coliformes em áreas densamente povoadas com saneamento básico precário. Anais do X Congresso Brasileiro de Águas Subterrâneas. São Paulo: Sonopress-Rimo; 1998. 1441-6.
- (57) Borguetti NRB, *et al.* Aquífero Guarani: A Verdadeira Integração dos Países do Mercosul. São Paulo: Fundação Roberto Marinho; 2005.
- (58) Google Earth. [Acesso em junho de 2009]; Disponível em <http://earth.google.com/intl/pt-BR/>.
- (59) Bauchspiess A. Introdução aos Sistemas Inteligentes. Apostila de Mini-curso. Departamento de Engenharia Elétrica da Universidade de Brasília-UnB. Brasília: março de 2004. [acesso em 05/02/2008]; Disponível em: <http://www.ene.unb.br/adolfo/ISI>.
- (60) Ortega NRS. Aplicação da Teoria de Conjuntos *Fuzzy* a Problemas da Biomedicina [tese]. São Paulo: Universidade de São Paulo; 2001.
- (61) Massad E, Ortega NRS, Struchiner CJ. Fuzzy epidemics. Artificial Intelligence in Medicine, 2003 nov;29(3):241-59.
- (62) Altunkaynak A, Özger M, Çakmakci M. Water Consumption Prediction of Istanbul City by Using *Fuzzy* Logic Approach. Water Resources Management. 2005 out;19(5):641-54.
- (63) Thé MAL. Raciocínio baseado em casos uma abordagem *fuzzy* para diagnóstico nutricional [tese]. Florianópolis: Universidade Federal de Santa Catarina, Doutorado em Engenharia de Produção; 2001
- (64) Porto RL (Organizador). Técnicas quantitativas para o gerenciamento de Recursos Hídricos. 2ª ed. Porto Alegre: Editora da UFRGS; 2002.
- (65) Vieira FHT, Ling LL. Modelagem fuzzy utilizando funções de base ortonormais aplicada à predição adaptativa de tráfego de redes. Learning and Nonlinear Models . Rev. Socied. Brasileira de Redes Neurais (SBRN). 2006; 4(2):93-11.
- (66) Ruhoff AL, Souza BSP, Giotto E, Pereira RS. Lógica *fuzzy* e zoneamento ambiental da bacia do Arroio Grande. Anais do XII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, 16-21 abril 2005, Goiânia, Brasil; INPE, 2005. 2355-62.
- (67) Martins NSM. Mundos da Incerteza: A lógica fuzzy na contemporaneidade. Rev. Mackenzie de Educação, Arte e Cultura. 2003/2004; 3/4:135-140.
- (68) Costa AJL, *et al.* Perception of disability in a public health perspective: a model

based on *fuzzy* logic. International Journal of Medical Informatics, 2004 ago;73(7):647-6.

(69) Dias HA, Mathias MI, Biagionni MAM, et al. Teoria *Fuzzy* aplicada à automação da condução racional da aeração de grãos de milho. V Congresso Brasileiro de AgroInformática, Londrina, 2005.

(70) Li YP, Huang GH, Huang YF, Zhou HD. A multistage fuzzy-stochastic programming model for supporting sustainable water-resources allocation and management. Environmental Modelling & Software. 2009 jul;24(7):786-97.

(71) Singh AP, Ghosh SK, Sharma P. Water quality management of a stretch of river Yamuna: An interactive fuzzy multi-objective approach. Water Resour Manage. 2007 fev;21(2):515-32.

(72) Lu R-S, Lo SL, Hu J-Y. Analysis of reservoir water quality using fuzzy synthetic evaluation. Stochastic Environmental Research and Risk Assessment. 2001 nov.13(3):327-6.

(73) Qin XS, Huang GH, Zeng GM, et al. An interval-parameter fuzzy nonlinear optimization model for stream water quality management under uncertainty. European Journal of Operational Research. 2007 ago;180(3):1331-57.

(74) Lee C-S, Wen C-G. Fuzzy goal programming approach for water quality management in a river basin. Fuzzy Sets and Systems. 1997 jul;89(2):181-92.

(75) Karmakar S, Mujumdar PP. Grey fuzzy optimization model for water quality management of a river system. Advances in Water Resources. 2006;29(7):1088 -05.

(76) Zarghami M; Szidarovszky F. Stochastic-fuzzy multi criteria decision making for robust water resources management. Stoch Environ Res Risk Assess. 2009 mar;23(3):329-9.

(77) Iliev B, Lindquist M, Robertsson L, Wide P. A fuzzy technique for food- and water quality assessment with an electronic tongue. Fuzzy Sets and Systems. 2006 mai;157(9):1155-68.

(78) Kuo T-C; Wu H-H, Shieh J-I. Integration of environmental considerations in quality function deployment by using fuzzy logic. Expert Systems with Applications. 2009 abr;36(3):7148-56.

(79) Zhu H, Huang GH, Guo P, Qin XS. A Fuzzy Robust Nonlinear Programming Model for Stream Water Quality Management. Water Resour Manage. 2009 fev; 23(14):2913-40.

(80) Sârbu C, Pop HF. Principal component analysis versus fuzzy principal component analysis. A case study: the quality of danube water (1985-1996). Talanta. 2005; 65:1215-0.

(81) Rebouças AC, Braga B, Tundisi JG (Orgs.). Águas doces no Brasil: capital

ecológico, uso e conservação. 3ª ed. São Paulo: Escritura Editora; 2006.

(82) Dotto SE, Santos RF, Singer EM. Determinação de um índice qualidade de água para algumas culturas irrigadas em São Paulo. *Bragantia*. 1996;55(1):193-0.

(83) Silva GS, Jardim WF. Um novo índice de qualidade das águas para proteção da vida aquática aplicada ao rio Atibaia, Região de Campinas/Paulínia-SP. *Quím. Nova*. 2006;29(4):689-4.

(84) Avvannavar SM, Shrihari S. Evaluation of water quality index for drinking purposes for river Netravathi, Mangalore, South India. *Environ Monit Assess*. 2008;143: 279-90.

(85) Branco SM. Água: Origem, uso e preservação. São Paulo: Moderna; 1993.

(86) BRASIL. Ministério da Saúde. Portaria n. 518, de 25 de março de 2004. Estabelece os procedimentos e responsabilidades relativas ao controle e vigilância da qualidade da água para consumo humano e seu padrão de potabilidade, e dá outras providências. *Diário Oficial da União*. Brasília, 2004.

(87) BRASIL. Conselho Nacional do Meio Ambiente – CONAMA. Resolução n. 357, de 17 de março de 2005. Dispõe sobre a classificação dos corpos de água e diretrizes ambientais para o seu enquadramento, estabelece as condições e padrões de lançamento de efluentes, e da outras providencias. [acesso em 12/06/2006]; Disponível em: [www.mma.gov.br](http://www.mma.gov.br).

(88) Faria AL. Condições ambientais e características de potabilidade da água de bicas de uso público da cidade de Taubaté - SP [Dissertação]. Taubaté: Universidade de Taubaté, Mestrado em Ciências Ambientais 2006.

(89) BRASIL. Ministério da Saúde. Portaria n. 36/GM. Padrão de Potabilidade da água destinada ao consumo humano. Brasília, 1990.

(90) Alaburda J, Nishihara L. Presença de compostos de nitrogênio em água de poços. *Rev. saúde pública*. 1998 abril; 32(2):160-5.

(91) POLICONTROL. Boletim Técnico, 3ª ed, julho 2006. [acesso em 11/11/2009]; Disponível em: [www.ufrb.edu.br/fadigas/index2.php?option=com](http://www.ufrb.edu.br/fadigas/index2.php?option=com).

(92) NSF-NATIONAL SCIENCE FOUNDATION. *Water Quality Index*. [acesso em 12/07/2007]; Disponível em: [www.nsf.org/consumer/just\\_for\\_kids/wqi.asp](http://www.nsf.org/consumer/just_for_kids/wqi.asp).

(93) Charnpratheep K, Zhou Q, Ganer BZQ. Preliminary landfill site screening using fuzzy geographical information systems. *Waste Manag Res*. 1997 abr;15(2):197-5.

(94) Lapponi JC. Estatística usando excel. São Paulo: Lapponi; 2000.

(95) Larson R, Farber B. Estatística Aplicada. 2ª ed. São Paulo: Pearson Prentice Hall; 2007.

## APÊNDICE A – VALORES MENSAIS GERADOS PELO MATLAB®

Os resultados mensais das avaliações realizadas a partir da inserção dos valores dos parâmetros obtidos por meio das análises das amostras de água do Rio Pimenta Bueno no sistema de inferência construído a partir do *tolbox fuzzy* do MATLAB® estão apresentados nas Tabelas 30 a 54, que foram obtidas a partir da opção de exportação da ferramenta. As informações inseridas são tratadas à luz da lógica *fuzzy*, valendo-se dos subsistemas construídos. Apresenta-se também os resultados do IQA, segundo os critérios da *NSF*.

A diferença das Tabelas seguintes para as já apresentadas resume-se no fato de aqui são apresentados todos os valores calculados, relativos apenas ao mês de observação, ao passo que, anteriormente apresentou-se separadamente, um tipo de informação, referente a todo o período observado.

Tabela 30 – Resultados do mês de setembro de 2007

Contribuição de cada parâmetro (qi) no mês observado									
Parâmetro	%OD	CT	pH	DBO	NO3	PO4	Temp.	Tu	ST
Valor	78,00	520,00	8,10	14,15	3,35	0,55	23,50	74,50	165,00
qi	84,43	25,40	83,02	20,95	83,09	55,45	93,00	37,23	78,17
IQA		Percentual de Pertinência							
WQI NSF	55,07			%Excelen.	%Bom	%Regular	%Ruim	%Péssimo	
WQI TriTrap	52,50	tritrapp		0,00	0,00	99,43	0,00	0,00	
WQI Gauss	47,08	Gauss		0,19	0,02	70,66	23,57	0,00	
Níveis de contribuição dos subsistemas para o IQA final									
	Alto	Médio	Baixo		Alto	Médio	Baixo		
tritrapp	52,50	56,94	52,50	Gauss	55,64	54,32	51,99		

Fonte: Dados Primários

Tabela 31 – Resultados do mês de outubro de 2007

Contribuição de cada parâmetro (qi) no mês observado									
Parâmetro	%OD	CT	pH	DBO	NO3	PO4	Temp.	Tu	ST
Valor	68,5	390	7	11,95	5,7	0,9	25	55	241,5
qi	73,03	27,72	91,33	26,68	71,10	42,69	93,00	32,73	68,37
IQA		Percentual de Pertinência							
WQI NSF	52,99			%Excelen.	%Bom	%Regular	%Ruim	%Péssimo	
WQI TriTrap	52,50	tritrapp		0	0	99,43	0	0	
WQI Gauss	55,10	Gauss		1,16	1,98	86,74	4,18	0	
Níveis de contribuição dos subsistemas para o IQA final									
	Alto	Médio	Baixo		Alto	Médio	Baixo		
tritrapp	61,60	64,72	66,47	Gauss	58,61	64,90	66,34		

Fonte: Dados Primários

Tabela 32 – Resultados do mês de novembro de 2007

Contribuição de cada parâmetro (qi) no mês observado									
Parâmetro	%OD	CT	pH	DBO	NO3	PO4	Temp.	Tu	ST
Valor	63	340	6,35	10,75	8,4	1,4	23,5	49	340
qi	64,64	28,86	66,43	30,52	57,33	31,84	93,00	31,68	53,99
IQA					Percentual de Pertinência				
WQI NSF	47,38			%Excelen.	%Bom	%Regular	%Ruim	%Péssimo	
WQI TriTrap	52,50		tritrap	0	0	99,43	0	0	
WQI Gauss	46,91		Gauss	0,19	0,02	70,66	23,57	0,00	
Níveis de contribuição dos subsistemas para o IQA final									
	Alto	Médio	Baixo		Alto	Médio	Baixo		
tritrap	52,5	70,47	52,50	Gauss	52,482	69,33	52,92		

Fonte: Dados Primários

Tabela 33 – Resultados do mês de dezembro de 2007

Contribuição de cada parâmetro (qi) no mês observado									
Parâmetro	%OD	CT	pH	DBO	NO3	PO4	Temp.	Tu	ST
Valor	73	1000	6,05	9,2	10,7	1,3	24	63,5	409
qi	79,00	20,54	54,73	36,36	47,01	33,57	93,00	35,13	44,26
IQA					Percentual de Pertinência				
WQI NSF	45,30			%Excelen.	%Bom	%Regular	%Ruim	%Péssimo	
WQI TriTrap	52,50		tritrap	0	0	99,43	0	0	
WQI Gauss	45,33		Gauss	0,13	0,00	54,61	30,55	0,00	
Níveis de contribuição dos subsistemas para o IQA final									
	Alto	Médio	Baixo		Alto	Médio	Baixo		
tritrap	52,50	79,77	52,50	Gauss	54,93	71,78	50,12		

Fonte: Dados Primários

Tabela 34 – Resultados do mês de janeiro de 2008

Contribuição de cada parâmetro (qi) no mês observado									
Parâmetro	%OD	CT	pH	DBO	NO3	PO4	Temp.	Tu	ST
Valor	82	705	6,35	10,05	10,5	1,4	26	67,5	305
qi	87,67	23,07	66,43	33,03	47,44	31,84	93	36,18	59,19
IQA					Percentual de Pertinência				
WQI NSF	48,59			%Excelen.	%Bom	%Regular	%Ruim	%Péssimo	
WQI TriTrap	52,50		tritrap	0	0	99,43	0	0	
WQI Gauss	47,62		Gauss	0,22	0,03	76,42	21,25	0	
Níveis de contribuição dos subsistemas para o IQA final									
	Alto	Médio	Baixo		Alto	Médio	Baixo		
tritrap	52,50	76,87	52,50	Gauss	64,59	71,30	53,49		

Fonte: Dados Primários

Tabela 35 – Resultados do mês de fevereiro de 2008

Contribuição de cada parâmetro (qi) no mês observado									
Parâmetro	%OD	CT	pH	DBO	NO3	PO4	Temp.	Tu	ST
Valor	87	295	6,45	7,65	7,7	1,25	24,5	48	404
qi	90,90	30,07	70,65	43,35	60,90	34,50	93	31,60	44,92
IQA		Percentual de Pertinência							
WQI NSF	52,67			%Excelen.	%Bom	%Regular	%Ruim	%Péssimo	
WQI TriTrap	52,50	tritrapp		0	0	99,43	0	0	
WQI Gauss	46,19	Gauss		0,16	0	62,67	26,92	0	
Níveis de contribuição dos subsistemas para o IQA final									
	Alto	Médio	Baixo		Alto	Médio	Baixo		
tritrapp	52,50	83,86	52,50	Gauss	70,52	75,08	50,82		

Fonte: Dados Primários

Tabela 36 – Resultados do mês de março de 2008

Contribuição de cada parâmetro (qi) no mês observado									
Parâmetro	%OD	CT	pH	DBO	NO3	PO4	Temp.	Tu	ST
Valor	81	210	6,6	7,5	6,35	0,7	24,5	72,5	454
qi	86,96	33,07	77,31	44,09	67,79	49,21	93	37,07	38,74
IQA		Percentual de Pertinência							
WQI NSF	56,28			%Excelen.	%Bom	%Regular	%Ruim	%Péssimo	
WQI TriTrap	40,06	tritrapp		0	0	28,57	30,30	0	
WQI Gauss	34,42	Gauss		0	0	1,35	90,77	0,27	
Níveis de contribuição dos subsistemas para o IQA final									
	Alto	Médio	Baixo		Alto	Médio	Baixo		
tritrapp	68,49	84,25	42,60	Gauss	67,62	75,46	39,80		

Fonte: Dados Primários

Tabela 37 – Resultados do mês de abril de 2008

Contribuição de cada parâmetro (qi) no mês observado									
Parâmetro	%OD	CT	pH	DBO	NO3	PO4	Temp.	Tu	ST
Valor	70	280	6,85	6,2	4,75	0,7	22	40,5	356
qi	75,12	30,52	89,22	51,07	75,95	49,21	93	32,40	51,64
IQA		Percentual de Pertinência							
WQI NSF	57,34			%Excelen.	%Bom	%Regular	%Ruim	%Péssimo	
WQI TriTrap	52,50	tritrapp		0	0	99,43	0	0	
WQI Gauss	46,78	Gauss		0,19	0,01	68,69	24,39	0	
Níveis de contribuição dos subsistemas para o IQA final									
	Alto	Médio	Baixo		Alto	Médio	Baixo		
tritrapp	62,83	88,16	52,50	Gauss	60,52	73,60	52,30		

Fonte: Dados Primários

Tabela 38 – Resultados do mês de maio de 2008

Contribuição de cada parâmetro (qi) no mês observado									
Parâmetro	%OD	CT	pH	DBO	NO3	PO4	Temp.	Tu	ST
Valor	74	90	6,65	7,6	5,1	1,3	22,5	40	251,5
qi	80,20	41,19	79,61	43,59	74,16	33,57	93	32,55	66,98
IQA		Percentual de Pertinência							
WQI NSF	57,75				%Excelen.	%Bom	%Regular	%Ruim	%Péssimo
WQI TriTrap	52,50	tritrap			0	0	99,43	0	0
WQI Gauss	65,11	Gauss			6,78	52,61	8,89	0,20	0
Níveis de contribuição dos subsistemas para o IQA final									
		Alto	Médio	Baixo		Alto	Médio	Baixo	
	tritrap	63,92	83,99	76,59	Gauss	64,87	71,53	70,89	

Fonte: Dados Primários

Tabela 39 – Resultados do mês de junho de 2008

Contribuição de cada parâmetro (qi) no mês observado									
Parâmetro	%OD	CT	pH	DBO	NO3	PO4	Temp.	Tu	ST
Valor	61,5	115	6,5	8,35	6,8	1,75	22	24	172
qi	62,19	38,75	72,83	40,04	65,49	26,91	93	45,35	77,34
IQA		Percentual de Pertinência							
WQI NSF	53,94				%Excelen.	%Bom	%Regular	%Ruim	%Péssimo
WQI TriTrap	52,50	tritrap			0	0	99,43	0	0
WQI Gauss	45,36	Gauss			0,13	0	54,61	30,55	0
Níveis de contribuição dos subsistemas para o IQA final									
		Alto	Médio	Baixo		Alto	Médio	Baixo	
	tritrap	52,50	82,03	80,85	Gauss	50,74	69,31	77,11	

Fonte: Dados Primários

Tabela 40 – Resultados do mês de julho de 2008

Contribuição de cada parâmetro (qi) no mês observado									
Parâmetro	%OD	CT	pH	DBO	NO3	PO4	Temp.	Tu	ST
Valor	65,5	300	6,55	6,6	6,6	2,3	23	48	153,5
qi	68,58	29,93	75,05	48,82	66,51	21,53	93	31,60	79,49
IQA		Percentual de Pertinência							
WQI NSF	51,51				%Excelen.	%Bom	%Regular	%Ruim	%Péssimo
WQI TriTrap	52,5	tritrap			0	0	99,43	0	0
WQI Gauss	50,47	Gauss			0,42	0,15	96,51	12,48	0
Níveis de contribuição dos subsistemas para o IQA final									
		Alto	Médio	Baixo		Alto	Médio	Baixo	
	tritrap	61,87	85,92	77,50	Gauss	55,16	74,46	72,02	

Fonte: Dados Primários

Tabela 41 – Resultados do mês de agosto de 2008

Contribuição de cada parâmetro (qi) no mês observado									
Parâmetro	%OD	CT	pH	DBO	NO3	PO4	Temp.	Tu	ST
Valor	84	165	7,35	10,25	4,55	0,9	24	56,5	181
qi	88,87	35,29	92,85	32,29	76,97	42,69	93	33,12	76,26
IQA					Percentual de Pertinência				
WQI NSF	59,04			%Excelen.		%Bom	%Regular	%Ruim	%Péssimo
WQI TriTrap	52,50		tritrap		0	0	99,43	0	0
WQI Gauss	63,84		Gauss		5,44	39,30	14,46	0,33	0
Níveis de contribuição dos subsistemas para o IQA final									
	Alto	Médio	Baixo		Alto	Médio	Baixo		
tritrap	74,37	74,60	64,19	Gauss	70,80	70,64	64,10		

Fonte: Dados Primários

Tabela 42 – Resultados do mês de setembro de 2008

Contribuição de cada parâmetro (qi) no mês observado									
Parâmetro	%OD	CT	pH	DBO	NO3	PO4	Temp.	Tu	ST
Valor	91,5	350	8,15	13,5	2,9	1	21,5	69	159
qi	94,08	28,62	81,63	22,48	85,38	40,00	93	36,51	78,86
IQA					Percentual de Pertinência				
WQI NSF	55,66			%Excelen.		%Bom	%Regular	%Ruim	%Péssimo
WQI TriTrap	52,50		tritrap		0	0	99,43	0	0
WQI Gauss	47,72		Gauss		0,23	0,03	78,27	20,51	0
Níveis de contribuição dos subsistemas para o IQA final									
	Alto	Médio	Baixo		Alto	Médio	Baixo		
tritrap	52,50	59,49	52,50	Gauss	56,89	57,37	52,68		

Fonte: Dados Primários

Tabela 43 – Resultados do mês de outubro de 2008

Contribuição de cada parâmetro (qi) no mês observado									
Parâmetro	%OD	CT	pH	DBO	NO3	PO4	Temp.	Tu	ST
Valor	72	470	7,25	8,7	3,8	1	25	44	206,5
qi	77,76	26,20	91,99	38,48	80,79	40,00	93	31,71	73,06
IQA					Percentual de Pertinência				
WQI NSF	55,63			%Excelen.		%Bom	%Regular	%Ruim	%Péssimo
WQI TriTrap	52,50		tritrap		0	0	99,43	0	0
WQI Gauss	61,95		Gauss		4,04	24,94	24,94	0,60	0
Níveis de contribuição dos subsistemas para o IQA final									
	Alto	Médio	Baixo		Alto	Médio	Baixo		
tritrap	64,53	81,11	77,50	Gauss	63,02	73,66	73,25		

Fonte: Dados Primários

Tabela 44 – Resultados do mês de novembro de 2008

Contribuição de cada parâmetro (qi) no mês observado									
Parâmetro	%OD	CT	pH	DBO	NO3	PO4	Temp.	Tu	ST
Valor	68	440	6,9	8,45	4,05	1,1	21	48	177
qi	72,31	26,73	91,73	39,59	79,52	37,62	93,00	31,60	76,75
IQA		Percentual de Pertinência							
WQI NSF	55,03				%Excelen.	%Bom	%Regular	%Ruim	%Péssimo
WQI TriTrap	52,50	tritrap			0	0	99,43	0	0
WQI Gauss	53,87	Gauss			0,87	1,00	95,60	5,89	0
Níveis de contribuição dos subsistemas para o IQA final									
	Alto	Médio	Baixo				Alto	Médio	Baixo
tritrap	61,20	81,76	77,50	Gauss	57,98	66,50	72,02		

Fonte: Dados Primários

Tabela 45 – Resultados do mês de dezembro de 2008

Contribuição de cada parâmetro (qi) no mês observado									
Parâmetro	%OD	CT	pH	DBO	NO3	PO4	Temp.	Tu	ST
Valor	84	410	6,7	9,9	3,6	1,5	23,5	60	229
qi	88,87	27,31	81,95	33,59	81,81	30,26	93	34,11	70,09
IQA		Percentual de Pertinência							
WQI NSF	54,39				%Excelen.	%Bom	%Regular	%Ruim	%Péssimo
WQI TriTrap	52,50	tritrap			0	0	99,43	0	0
WQI Gauss	54,55	Gauss			1,03	1,49	91,04	4,85	0
Níveis de contribuição dos subsistemas para o IQA final									
	Alto	Médio	Baixo				Alto	Médio	Baixo
tritrap	75,75	77,80	59,43	Gauss	70,08	70,15	58,62		

Fonte: Dados Primários

Tabela 46 – Resultados do mês de janeiro de 2009

Contribuição de cada parâmetro (qi) no mês observado									
Parâmetro	%OD	CT	pH	DBO	NO3	PO4	Temp.	Tu	ST
Valor	83	500	6,4	7,8	4,05	0,95	21,5	46	231,5
qi	88,31	25,71	68,52	42,62	79,52	41,31	93	31,57	69,75
IQA		Percentual de Pertinência							
WQI NSF	55,15				%Excelen.	%Bom	%Regular	%Ruim	%Péssimo
WQI TriTrap	52,50	tritrap			0	0	99,43	0	0
WQI Gauss	67,03	Gauss			8,89	70,66	4,39	0,11	0
Níveis de contribuição dos subsistemas para o IQA final									
	Alto	Médio	Baixo				Alto	Médio	Baixo
tritrap	52,50	83,46	77,50	Gauss	66,12	69,04	72,61		

Fonte: Dados Primários

Tabela 47 – Resultados do mês de fevereiro de 2009

Contribuição de cada parâmetro (qi) no mês observado									
Parâmetro	%OD	CT	pH	DBO	NO3	PO4	Temp.	Tu	ST
Valor	75	1050	6,45	7,1	4,5	0,85	25	39	302
qi	81,34	20,20	70,65	46,13	77,22	44,16	93	32,89	59,64
IQA		Percentual de Pertinência							
WQI NSF	52,77				%Excelen.	%Bom	%Regular	%Ruim	%Péssimo
WQI TriTrap	52,50	tritrap			0	0	99,43	0	0
WQI Gauss	54,44	Gauss			0,98	1,35	92,31	5,10	0
Níveis de contribuição dos subsistemas para o IQA final									
		Alto	Médio	Baixo		Alto	Médio	Baixo	
	tritrap	52,5	85,34	58,91	Gauss	64,07	77,36	58,08	

Fonte: Dados Primários

Tabela 48 – Resultados do mês de março de 2009

Contribuição de cada parâmetro (qi) no mês observado									
Parâmetro	%OD	CT	pH	DBO	NO3	PO4	Temp.	Tu	ST
Valor	71	775	6,7	6,4	4,65	1,2	20	30	243,5
qi	76,46	22,36	81,95	49,93	76,46	35,49	93	38,64	68,10
IQA		Percentual de Pertinência							
WQI NSF	54,44				%Excelen.	%Bom	%Regular	%Ruim	%Péssimo
WQI TriTrap	52,50	tritrap			0	0	99,43	0	0
WQI Gauss	60,54	Gauss			3,18	16,45	35,80	0,93	0
Níveis de contribuição dos subsistemas para o IQA final									
		Alto	Médio	Baixo		Alto	Médio	Baixo	
	tritrap	63,28	86,05	77,50	Gauss	61,79	63,77	71,71	

Fonte: Dados Primários

Tabela 49 – Resultados do mês de abril de 2009

Contribuição de cada parâmetro (qi) no mês observado									
Parâmetro	%OD	CT	pH	DBO	NO3	PO4	Temp.	Tu	ST
Valor	67,5	950	6,83	5,9	5,1	0,8	21,5	20	295,5
qi	71,58	20,90	88,23	52,83	74,16	45,73	93	51,13	60,60
IQA		Percentual de Pertinência							
WQI NSF	56,01				%Excelen.	%Bom	%Regular	%Ruim	%Péssimo
WQI TriTrap	52,5	tritrap			0	0	99,43	0	0
WQI Gauss	53,01	Gauss			0,74	0,66	98,62	7,10	0
Níveis de contribuição dos subsistemas para o IQA final									
		Alto	Médio	Baixo		Alto	Médio	Baixo	
	tritrap	60,77	89,28	60,65	Gauss	57,35	72,92	59,94	

Fonte: Dados Primários

Tabela 50 – Resultados do mês de maio de 2009

Contribuição de cada parâmetro (qi) no mês observado									
Parâmetro	%OD	CT	pH	DBO	NO3	PO4	Temp.	Tu	ST
Valor	63,5	305	7,22	10,5	6,65	1,7	21,5	41	178
qi	65,44	29,79	91,60	31,39	66,26	27,52	93,00	32,26	76,62
IQA		Percentual de Pertinência							
WQI NSF	51,20			%Excelen.	%Bom	%Regular	%Ruim	%Péssimo	
WQI TriTrap	52,50	tritráp		0	0	99,43	0	0	
WQI Gauss	46,76	Gauss		0,19	0,01	68,69	24,39	0	
Níveis de contribuição dos subsistemas para o IQA final									
		Alto	Médio	Baixo		Alto	Médio	Baixo	
	tritráp	57,29	72,30	77,50	Gauss	52,83	64,97	74,06	

Fonte: Dados Primários

Tabela 51 – Resultados do mês de junho de 2009

Contribuição de cada parâmetro (qi) no mês observado									
Parâmetro	%OD	CT	pH	DBO	NO3	PO4	Temp.	Tu	ST
Valor	64,5	335	7,22	8,65	6,25	1,5	23,5	43	208
qi	67,03	28,99	91,60	38,70	68,30	30,26	93	31,84	72,87
IQA		Percentual de Pertinência							
WQI NSF	52,68			%Excelen.	%Bom	%Regular	%Ruim	%Péssimo	
WQI TriTrap	52,50	tritráp		0	0	99,43	0	0	
WQI Gauss	49,12	Gauss		0,32	0,07	89,68	15,83	0	
Níveis de contribuição dos subsistemas para o IQA final									
		Alto	Médio	Baixo		Alto	Médio	Baixo	
	tritráp	58,28	81,24	77,50	Gauss	53,86	71,76	73,51	

Fonte: Dados Primários

Tabela 52 – Resultados do mês de julho de 2009

Contribuição de cada parâmetro (qi) no mês observado									
Parâmetro	%OD	CT	pH	DBO	NO3	PO4	Temp.	Tu	ST
Valor	72	180	7,15	7,9	5,8	2,1	22,5	48	169
qi	77,76	34,48	90,45	42,14	70,59	23,23	93	31,60	77,70
IQA		Percentual de Pertinência							
WQI NSF	54,81			%Excelen.	%Bom	%Regular	%Ruim	%Péssimo	
WQI TriTrap	52,50	tritráp		0	0	99,43	0	0	
WQI Gauss	61,95	Gauss		4,04	24,94	24,94	0,60	0	
Níveis de contribuição dos subsistemas para o IQA final									
		Alto	Médio	Baixo		Alto	Médio	Baixo	
	tritráp	64,53	83,20	77,50	Gauss	63,02	71,04	72,02	

Fonte: Dados Primários

Tabela 53 – Resultados do mês de agosto de 2009

Contribuição de cada parâmetro (qi) no mês observado									
Parâmetro	%OD	CT	pH	DBO	NO3	PO4	Temp.	Tu	ST
Valor	90,5	105	7,75	10,1	4,8	1,35	25,5	53	203,5
qi	93,38	39,65	90,58	32,84	75,69	32,68	93	32,28	73,45
IQA		Percentual de Pertinência							
WQI NSF	58,52			%Excelen.	%Bom	%Regular	%Ruim	%Péssimo	
WQI TriTrap	52,50	tritrap		0	0	99,43	0	0	
WQI Gauss	70,34	Gauss		14,27	96,51	0,91	0,03	0	
Níveis de contribuição dos subsistemas para o IQA final									
	Alto	Médio	Baixo		Alto	Médio	Baixo		
tritrap	52,50	76,26	70,03	Gauss	71,59	71,68	68,74		

Fonte: Dados Primários

Tabela 54 – Resultados médios do período observado

Contribuição de cada parâmetro (qi) no mês observado									
Parâmetro	%OD	CT	pH	DBO	NO3	PO4	Temp.	Tu	ST
Valor	74,58	428,33	6,9	8,96	5,69	1,23	23,19	49,17	251,46
qi	79	28,97	80,85	38,4	71,23	36,72	93	34,7	44,95
IQA		Percentual de Pertinência							
WQI NSF	53,92			%Excelen.	%Bom	%Regular	%Ruim	%Péssimo	
WQI TriTrap	51,98	tritrap		0	0	96,48	1,26	0	
WQI Gauss	53,15	Gauss		2,22	13,82	55,9	16,33	0,01	
Níveis de contribuição dos subsistemas para o IQA final									
	Alto	Médio	Baixo		Alto	Médio	Baixo		
tritrap	52,5	76,26	70,02	Gauss	71,58	71,67	68,73		

Fonte: Dados Primários

## APÊNDICE B – REGRAS DE INFERENCIA IMPLEMENTADAS NO MATLAB®

```

clear all
clc

rhigh=150;
rmedium=625;
rlow=25;
rfinal=125;

estados=[6 5 5 5 5 5 5 5 5];

e{1}=1:estados(1);
e{2}=1:estados(2);
e{3}=1:estados(3);
e{4}=1:estados(4);
e{5}=1:estados(5);
e{6}=1:estados(6);
e{7}=1:estados(7);
e{8}=1:estados(8);
e{9}=1:estados(9);

ruleshigh=zeros(rhigh,3);
filahigh=1;
for i1=1:estados(1)
    ruleshigh(filahigh,1)=e{1}(i1);
    for i2=1:estados(2)
        ruleshigh(filahigh,2)=e{2}(i2);
        for i3=1:estados(3)
            ruleshigh(filahigh,3)=e{3}(i3);
            ruleshigh(filahigh+1,1)=ruleshigh(filahigh,1);
            ruleshigh(filahigh+1,2)=ruleshigh(filahigh,2);
            filahigh=filahigh+1;
        end
    end
end
ruleshigh(filahigh,:)=[];

ruleshighcopy=ruleshigh;
for i=1:rhigh
    switch ruleshighcopy(i,3)
        case 2
            ruleshighcopy(i,3)=1;
        case 4
            ruleshighcopy(i,3)=3;
    end
    switch ruleshighcopy(i,1)
        case 6
            ruleshighcopy(i,1)=3;
    end
end
outputhigh=min(ruleshighcopy,[],2);
ruleshigh(:,4)=outputhigh;
ruleshigh(:,5)=1;
ruleshigh(:,6)=1;
disp('Rules High Level OK')
save ruleshigh ruleshigh
rulesmedium=zeros(rmedium,4);
filamedium=1;

```

```

for i4=1:estados(4)
    rulesmedium(filamedium,1)=e{4}(i4);
    for i5=1:estados(5)
        rulesmedium(filamedium,2)=e{5}(i5);
        for i6=1:estados(6)
            rulesmedium(filamedium,3)=e{6}(i6);
            for i7=1:estados(7)
                rulesmedium(filamedium,4)=e{7}(i7);
                rulesmedium(filamedium+1,1)=rulesmedium(filamedium,1);
                rulesmedium(filamedium+1,2)=rulesmedium(filamedium,2);
                rulesmedium(filamedium+1,3)=rulesmedium(filamedium,3);
                filamedium=filamedium+1;
            end
        end
    end
end
rulesmedium(filamedium,:)=[];

rulesmediumcopy=rulesmedium;
for i=1:rmedium
    switch rulesmediumcopy(i,4)
        case 2
            rulesmediumcopy(i,4)=1;
        case 4
            rulesmediumcopy(i,4)=3;
    end
end
outputmedium=min(rulesmediumcopy,[],2);
rulesmedium(:,5)=outputmedium;
rulesmedium(:,6)=1;
rulesmedium(:,7)=1;
disp('Rules Medium Level OK')
save rulesmedium rulesmedium

ruleslow=zeros(rlow,2);
filalow=1;
for i8=1:estados(8)
    ruleslow(filalow,1)=e{8}(i8);
    for i9=1:estados(9)
        ruleslow(filalow,2)=e{9}(i9);
        ruleslow(filalow+1,1)=ruleslow(filalow,1);
        filalow=filalow+1;
    end
end
ruleslow(filalow,:)=[];
outputlow=min(ruleslow,[],2);
ruleslow(:,3)=outputlow;
ruleslow(:,4)=1;
ruleslow(:,5)=1;
disp('Rules Low Level OK')
save ruleslow ruleslow

estadosout=[5 5];
eout{1}=1:estadosout(1);
eout{2}=1:estadosout(2);
eout{3}=1:estadosout(3);
rulesfinal=zeros(rfinal,3);
filafinal=1;
for i1=1:estadosout(1)
    rulesfinal(filafinal,1)=eout{1}(i1);

```

```
for i2=1:estadosout(2)
    rulesfinal(filafinal,2)=eout{2}(i2);
    for i3=1:estadosout(3)
        rulesfinal(filafinal,3)=eout{3}(i3);
        rulesfinal(filafinal+1,1)=rulesfinal(filafinal,1);
        rulesfinal(filafinal+1,2)=rulesfinal(filafinal,2);
        filafinal=filafinal+1;
    end
end
end
rulesfinal(filafinal,:)=[];
rulesfinalcopy=rulesfinal;

for i=1:rfinal
    if rulesfinalcopy(i,3)<=2
        if rulesfinalcopy(i,1)>=4 || rulesfinalcopy(i,2)==5
            rulesfinalcopy(i,3)=2;
        end
    end
    if rulesfinalcopy(i,1)==2
        rulesfinalcopy(i,1)=1;
    end
end

outputfinal=min(rulesfinalcopy,[],2);
rulesfinal(:,4)=outputfinal;
rulesfinal(:,5)=1;
rulesfinal(:,6)=1;
disp('Rules Final Level OK')
save rulesfinal rulesfinal
```

## ANEXO A – LAUDO DE ANÁLISE DE ÁGUA (SET A DEZ/2007)



**LABOR 15**

**Laboratório de Análises Químicas e Bromatológicas**

Interessado: Aécio Alves Pereira

Município: Pimenta Bueno – RO

Ponto de Coleta: Rio Pimenta Bueno

Natureza: Água Bruta

### Laudo Técnico

#### Considerações

- Metodologia: Águas minerais, localização, definições e métodos. Vol. 7, Métodos e Ensaio. TECPAR.
- Obs.: Este laudo tem significado restrito à amostra analisada.
- Amostra coletado pelo solicitante.
- Laboratório cadastrado no CRQ-RO sob o nº 1455001124.

Parâmetro	Unidade	Meses do ano de 2007							
		Set		Out		Nov		Dez	
		1ªQ	2ªQ	1ªQ	2ªQ	1ªQ	2ªQ	1ªQ	2ªQ
O. Dissolvido	%	80,0	76,0	71,0	66,0	61,0	65,0	72,0	74,0
Coliformes Totais	NMP/100ml	650	390	480	300	300	380	700	1300
pH	--	8,3	7,9	7,1	6,9	6,5	6,2	6,0	6,1
DBO	mg/l	13,8	14,5	12,4	11,5	11,4	10,1	9,6	8,8
Nitratos	mg/l	2,9	3,8	4,5	6,9	7,8	9,0	10,4	11,0
Fosfatos	mg/l	0,5	0,6	0,8	1,0	1,2	1,6	1,5	1,1
Temperatura*	°C	23	24	25	25	23	24	23	25
Turbidez	NTU	72,0	77,0	54,0	56,0	50,0	48,0	61,0	66,0
Sólidos Totais	mg/l	150	180	220	263	320	360	386	432

\* As temperaturas foram verificadas no manancial, nas primeiras horas da manhã.

  
 Janete Ahmed Saleh  
 CRQ 14100291  
 Químico - Responsável

Labor 15 – Laboratório 15 de Novembro / Análises Químicas e Bromatológicas  
 Travessa Antonio Ferro, n. 70, Bairro Apidiá, Pimenta Bueno – RO, CEP – 76.970.000  
 Tel.: (69) 3451-6628 CNPJ: 08.928.493/0001-36

## ANEXO B – LAUDO DE ANÁLISE DE ÁGUA (1º SEMESTRE 2008)



**LABOR 15**

**Laboratório de Análises Químicas e Bromatológicas**

Interessado: Aécio Alves Pereira

Município: Pimenta Bueno – RO

Ponto de Coleta: Rio Pimenta Bueno

Natureza: Água Bruta

### Laudo Técnico

#### Considerações

- Metodologia: Águas minerais, localização, definições e métodos. Vol. 7, Métodos e Ensaio. TECPAR.
- Obs.: Este laudo tem significado restrito à amostra analisada.
- Amostra coletado pelo solicitante.
- Laboratório cadastrado no CRQ-RO sob o nº 1455001124.

		Primeiro semestre do ano de 2008											
		Jan		Fev		Mar		Abr		Mai		Jun	
Parâmetro	Unidade	1ªQ	2ªQ	1ªQ	2ªQ	1ªQ	2ªQ	1ªQ	2ªQ	1ªQ	2ªQ	1ªQ	2ªQ
O. Dissolvido	%	78,0	86,0	89,0	85,0	83,0	79,0	71,0	69,0	72,0	76,0	65,0	58,0
Coliformes Totais	NMP/100ml	540	870	360	230	180	240	260	300	100	80	90	140
pH	--	6,3	6,4	6,6	6,3	6,6	6,6	6,9	6,8	6,5	6,8	6,7	6,3
DBO	mg/l	8,9	11,2	7,0	8,3	7,8	7,2	6,4	6,0	7,0	8,2	10,2	6,5
Nitratos	mg/l	9,0	12,0	8,0	7,4	6,0	6,7	5,5	4,0	4,8	5,4	6,4	7,2
Fosfatos	mg/l	1,3	1,5	1,3	1,2	0,7	0,7	0,6	0,8	1,0	1,6	1,6	1,9
Temperatura	°C	26	26	25	24	25	24	21	23	24	21	20	24
Turbidez	NTU	67,0	68,0	50,0	46,0	71,0	74,0	43,0	38,0	40,0	40,0	26,0	22,0
Sólidos Totais	mg/l	318	292	350	458	443	465	390	322	281	222	190	154

\* As temperaturas foram verificadas no manancial, nas primeiras horas da manhã.

  
 Janete Ahmed Saleh  
 CRQ 14100291  
 Químico - Responsável

Labor 15 – Laboratório 15 de Novembro / Análises Químicas e Bromatológicas  
 Travessa Antonio Ferro, n. 70, Bairro Apidiá, Pimenta Bueno – RO, CEP – 76.970.000  
 Tel.: (69) 3451-6628 CNPJ: 08.928.493/0001-36

## ANEXO C – LAUDO DE ANÁLISE DE ÁGUA (2º SEMESTRE 2008)



**LABOR 15**

**Laboratório de Análises Químicas e Bromatológicas**

Interessado: Aécio Alves Pereira  
 Município: Pimenta Bueno – RO  
 Ponto de Coleta: Rio Pimenta Bueno  
 Natureza: Água Bruta

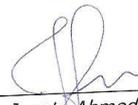
### Laudo Técnico

#### Considerações

- Metodologia: Águas minerais, localização, definições e métodos. Vol. 7, Métodos e Ensaio. TECPAR.
- Obs.: Este laudo tem significado restrito à amostra analisada.
- Amostra coletado pelo solicitante.
- Laboratório cadastrado no CRQ-RO sob o nº 1455001124.

		Segundo semestre do ano de 2008											
		Jul		Ago		Set		Out		Nov		Dez	
Parâmetro	Unidade	1ªQ	2ªQ	1ªQ	2ªQ	1ªQ	2ªQ	1ªQ	2ªQ	1ªQ	2ªQ	1ªQ	2ªQ
O. Dissolvido	%	64,0	67,0	79,0	89,0	89,0	94,0	68,0	76,0	63,0	73,0	80,0	88,0
Coliformes Totais	NMP/100ml	300	300	100	230	320	380	440	500	380	500	400	420
pH	--	6,6	6,5	7,5	7,2	8,1	8,2	7,2	7,3	7,0	6,8	6,8	6,6
DBO	mg/l	6,0	7,2	10,5	10,0	13,0	14,0	9,3	8,1	8,7	8,2	9,5	10,3
Nitratos	mg/l	7,0	6,2	4,3	4,8	3,2	2,6	4,0	3,6	4,0	4,1	3,8	3,4
Fosfatos	mg/l	2,0	2,6	1,0	0,8	0,8	1,2	1,2	0,8	1,0	1,2	1,4	1,6
Temperatura*	°C	23	23	23	25	21	22	24	26	20	22	23	24
Turbidez	NTU	46,0	50,0	55,0	58,0	68,0	70,0	48,0	40,0	45,0	51,0	66,0	54,0
Sólidos Totais	mg/l	147	160	170	192	138	180	199	214	189	165	208	250

\* As temperaturas foram verificadas no manancial, nas primeiras horas da manhã.

  
 Janete Ahmed Saleh  
 CRQ 14100291  
 Químico – Responsável

Labor 15 – Laboratório 15 de Novembro / Análises Químicas e Bromatológicas  
 Travessa Antonio Ferro, n. 70, Bairro Apidiá, Pimenta Bueno – RO, CEP – 76.970.000  
 Tel.: (69) 3451-6628 CNPJ: 08.928.493/0001-36

## ANEXO D – LAUDO DE ANÁLISE DE ÁGUA (JAN A AGO 2009)



**LABOR 15**  
Laboratório de Análises Químicas e Bromatológicas

Interessado: Aécio Alves Pereira Município: Pimenta Bueno – RO Ponto de Coleta: Rio Pimenta Bueno Natureza: Água Bruta

### Laudo Técnico

#### Considerações

- Metodologia: Águas minerais, localização, definições e métodos. Vol. 7, Métodos e Ensaios. TECPAR.
- Obs.: Este laudo tem significado restrito à amostra analisada.
- Amostra coletado pelo solicitante.
- Laboratório cadastrado no CRQ-RO sob o nº 1455001124.

Parâmetro	Unidade	Meses do ano de 2009															
		Jan		Fev		Mar		Abr		Mai		Jun		Jul		Ago	
		1ºQ	2ºQ	1ºQ	2ºQ	1ºQ	2ºQ	1ºQ	2ºQ	1ºQ	2ºQ	1ºQ	2ºQ	1ºQ	2ºQ	1ºQ	2ºQ
O. Dissolvido	%	80,0	86,0	77,0	73,0	73,0	69,0	63,0	72,0	68,0	59,0	68,0	61,0	71,0	73,0	89,0	92,0
Coliformes Totais	NMP/100ml	520	480	1350	750	810	740	900	1000	270	340	270	400	200	160	90	120
pH	--	6,5	6,3	6,4	6,5	6,8	6,6	6,8	6,9	7,3	7,1	7,3	7,1	7,0	7,3	7,7	7,8
DBO	mg/l	8,3	7,3	7,4	6,8	6,7	6,1	6,0	5,8	9,0	12,0	9,0	8,3	8,5	7,3	9,9	10,3
Nitratos	mg/l	4,1	4,0	4,6	4,4	4,5	4,8	5,0	5,2	6,0	7,3	6,0	6,5	6,0	5,6	4,8	4,8
Fosfatos	mg/l	1,2	0,7	1,0	0,7	1,0	1,4	0,8	0,8	1,6	1,8	1,6	1,4	1,8	2,4	1,2	1,5
Temperatura*	°C	21	22	25	25	19	21	20	23	22	21	24	23	22	23	25	26
Turbidez	NTU	52,0	40,0	45,0	33,0	32,0	28,0	10,0	30,0	44,0	38,0	44,0	42,0	44,0	52,0	50,0	56,0
Sólidos Totais	mg/l	243	220	288	316	297	190	311	280	196	160	196	220	190	148	177	230

\* As temperaturas foram verificadas no manancial, nas primeiras horas da manhã.

*Janete Ahmed Saleh*  
CRQ 14100291  
Química – Responsável

Labor 15 – Laboratório 15 de Novembro / Análises Químicas e Bromatológicas  
Travessa Antonio Ferro, n. 70, Bairro Apidiá, Pimenta Bueno – RO, CEP – 76.970.000  
Tel.: (69) 3451-6628 CNPJ: 08.928.493/0001-36

## ANEXO E – CERTIFICADO DO COMITÊ DE ÉTICA EM PESQUISA

 COMITÊ DE ÉTICA EM PESQUISA FACIMED	<b>COMITÊ DE ÉTICA EM PESQUISA</b> <b>FACIMED</b> <b>FACULDADE DE CIÊNCIAS BIOMÉDICAS DE CACOAL</b>	 <b>FACIMED</b>
<h3>CERTIFICADO</h3>		
<p>Certificamos que o Projeto de pesquisa intitulado UM MODELO FUZZY PARA APOIO À TOMADA DE DECISÃO NO CONTROLE DE QUALIDADE DA ÁGUA DO ESTADO DE RONDÔNIA, sob o protocolo nº. 213/2007, do Pesquisador <b>AÉCIO ALVES PEREIRA</b>, sob a responsabilidade do Orientador: Prof<sup>o</sup>. Dr. Carlos Aberto Bezerra Tomaz esta de acordo com a resolução 196/96 do Conselho Nacional de Saúde/MS, de 10/10/96, tendo sido aprovado pelo Comitê de Ética em Pesquisa-FACIMED.</p>		
<p>Cacoal, 10 de Setembro de 2007.</p>		
<p><i>Prof. Ms. Regina Célia Politano</i>          Prof. Ms. Regina Célia Politano          coordenadora          CEP/FACIMED</p>		