



UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ
CENTRO DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA HIDRÁULICA E AMBIENTAL
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL

RODRIGO AMARAL DE CODES

**PROPOSTA METODOLÓGICA DE AVALIAÇÃO INTEGRADA DE RISCOS NA
INFRAESTRUTURA DE SISTEMAS HÍDRICOS POR MEIO DO PROGRAMA
RISCO-FUZZY – ESTUDO DE CASO: SISTEMA DE APORTE DE ÁGUA BRUTA
PARA A REGIÃO METROPOLITANA DE FORTALEZA**

FORTALEZA

2016

RODRIGO AMARAL DE CODES

**PROPOSTA METODOLÓGICA DE AVALIAÇÃO INTEGRADA DE RISCOS NA
INFRAESTRUTURA DE SISTEMAS HÍDRICOS POR MEIO DO PROGRAMA
RISCO-FUZZY – ESTUDO DE CASO: SISTEMA DE APORTE DE ÁGUA BRUTA
PARA A REGIÃO METROPOLITANA DE FORTALEZA**

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, do Departamento de Engenharia Hidráulica e Ambiental, da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial à obtenção do título de Doutor em Engenharia Civil. Área de concentração: Saneamento Ambiental.

Orientador: Prof. Dr. Francisco de Assis de Souza Filho.

Coorientador: Prof. Dr. Silvrano Adonias Dantas Neto.

FORTALEZA

2016

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação
Universidade Federal do Ceará
Biblioteca Universitária
Gerada automaticamente pelo módulo Catalog, mediante os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

- C599p Codes, Rodrigo Amaral de.
Proposta metodológica de avaliação integrada de riscos na infraestrutura de sistemas hídricos por meio do programa Risco-Fuzzy – estudo de caso: sistema de aporte de água bruta para a Região Metropolitana de Fortaleza / Rodrigo Amaral de Codes. – 2016.
111 f. : il. color.
- Tese (doutorado) – Universidade Federal do Ceará, Centro de Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil: Saneamento Ambiental, Fortaleza, 2016.
Orientação: Prof. Dr. Francisco de Assis de Souza Filho.
Coorientação: Prof. Dr. Silvrano Adonias Dantas Neto.
1. Sistemas hídricos. 2. Análise de riscos. 3. Gestão de riscos. 4. Lógica fuzzy. 5. Sistemas de inferência fuzzy. I. Título.

CDD 628

RODRIGO AMARAL DE CODES

**PROPOSTA METODOLÓGICA DE AVALIAÇÃO INTEGRADA DE RISCOS NA
INFRAESTRUTURA DE SISTEMAS HÍDRICOS POR MEIO DO PROGRAMA
RISCO-FUZZY – ESTUDO DE CASO: SISTEMA DE APORTE DE ÁGUA BRUTA
PARA A REGIÃO METROPOLITANA DE FORTALEZA**

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, do Departamento de Engenharia Hidráulica e Ambiental, da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial à obtenção do título de Doutor em Engenharia Civil. Área de concentração: Saneamento Ambiental.

Aprovada em: 25/02/2016.

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Francisco de Assis de Souza Filho (Orientador)
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Prof. Dr. José Nilson Bezerra Campos
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Profa. Dra. Ticiano Marinho de Carvalho Studart
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Prof. Dr. José Maria Brabo Alves
Universidade Estadual do Ceará (UECE)

Dr. Rubens Sonsol Gondim
Embrapa Agroindústria Tropical (EMBRAPA)

A Deus.

A Santo Expedito.

Aos meus pais, Alfonso (in memoriam) e Regina; e à minha irmã Jacqueline.

À minha esposa, Geórgia; aos meus filhos, Rodrigo, Beatriz e Bernardo; e aos meus netos, Rafael e Josué.

AGRADECIMENTOS

À Universidade Federal do Ceará (UFC), por possibilitar a minha qualificação.

Ao Prof. Assis, orientador deste trabalho, por toda a sua competência, dedicação e participação, além do seu incentivo, paciência e amizade.

Ao Prof. Silvrano, coorientador deste trabalho, pelas colaborações e sugestões, como também por seu incentivo e amizade.

Aos professores do Departamento de Engenharia Estrutural e Construção Civil (DEECC), por permitirem o meu afastamento parcial para aperfeiçoamento.

Aos professores do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, do Departamento de Engenharia Hidráulica e Ambiental (Pós-DEHA), pelos valiosos conhecimentos adquiridos.

Aos professores participantes da banca examinadora de qualificação, Prof. Assis, Prof. Nilson, Profa. Ticianá, Prof. Capelo e Profa. Carla, pelo tempo despendido e pelas valiosas colaborações e sugestões.

Aos professores participantes da banca examinadora de defesa de tese, nominados na folha de aprovação, pelo tempo despendido na avaliação e julgamento deste trabalho, como também pelas enriquecedoras sugestões e colaborações.

Aos colegas da turma de doutorado, pela amizade construída e pela troca de conhecimentos.

Ao Prof. Capelo, pela disponibilização dos dados levantados por seu grupo de pesquisa junto à Companhia de Gestão dos Recursos Hídricos (COGERH).

Ao mestrando Daniel Cid, pelo auxílio computacional durante a elaboração do programa Risco-Fuzzy.

Ao doutorando Francisco Alberto, pelo auxílio na formatação do texto deste trabalho.

Ao Erivelton, técnico em informática do Pós-DEHA, pela atenção e disponibilidade na instalação e manutenção dos softwares utilizados.

Às funcionárias do Pós-DEHA, Shirley, Neuza e Teresinha, pela constante atenção e dedicação, sempre que solicitadas.

Aos familiares e aos amigos que incentivaram a realização deste trabalho. Com o receio de cometer alguma injustiça, esquecendo algum, prefiro não nominá-los.

“Tão próximas as leis da matemática estejam da realidade, menos próximas da certeza elas estarão. E tão próximas elas estejam da certeza, menos elas se referirão à realidade.”
(Albert Einstein)

RESUMO

As comunidades desenvolvidas, em todas as suas atividades, estão permanentemente, e cada vez mais, submetidas a um complexo conjunto de riscos. Risco é, portanto, um conceito que tem uma importância crescente na sociedade contemporânea com incidência em diferentes aspectos da mesma. Os sistemas hídricos, por sua vez, são domínios de aplicação potencial do conceito de avaliação e gestão de riscos, tendo em conta que os objetivos fixados podem sofrer desvios, no ambiente ou na sustentabilidade econômica, resultantes de incertezas, eventos extremos, erros ou outros acontecimentos. Para garantir a segurança de sistemas hídricos, diversas metodologias têm sido desenvolvidas com aplicações a casos específicos. Por se tratarem de processos complexos, que tomam como base informações imprecisas ou aproximadas, muitos dos estudos têm também considerado a utilização de Sistemas Fuzzy, que são baseados na Lógica Fuzzy, por se adequarem bem ao tipo de análise em questão. O presente trabalho discorre inicialmente sobre aspectos gerais da avaliação e gestão de riscos relacionados a alguns sistemas hídricos, abordando ainda os fundamentos teóricos da Análise Preliminar de Perigos (APP) e dos Sistemas Fuzzy. Tem como principal objetivo, entretanto, a apresentação de uma proposta metodológica que consiste na formulação de uma avaliação integrada de riscos em que é possível a subdivisão do sistema hídrico analisado em diversos níveis. Podem ser obtidos, portanto, os valores individuais dos diversos tipos de risco envolvidos no estudo, os riscos dos subsistemas em que estes estejam distribuídos, bem como o risco global do sistema. Propõe também a construção de um sistema de inferência fuzzy, onde são sugeridas as funções de pertinência para as variáveis linguísticas de entrada *Possibilidade de Ocorrência* e *Severidade das Consequências* e para a variável linguística de saída *Risco*, como também estabelece escalas de valores para as mesmas. Para a realização da análise proposta, foi ainda desenvolvido o Programa Risco-Fuzzy, específico para este fim. Avalia, em seguida, a metodologia proposta, como Estudo de Caso, a partir de dados já existentes, que foram levantados junto à Companhia de Gestão dos Recursos Hídricos (COGERH), no Sistema de Aporte de Água Bruta para a Região Metropolitana de Fortaleza (SAAB/RMF). Conclui também que, para os cenários considerados, a situação do SAAB/RMF, no que diz respeito à frequência e à gravidade dos possíveis riscos, é confortável, tanto em relação à quantidade como também à qualidade da água. Apresenta, finalmente, novas perspectivas de estudos e pesquisas que possam complementar ou aprofundar o estudo em questão.

Palavras-chave: Recursos hídricos. Sistemas hídricos. Análise de riscos. Gestão de riscos. Plano de segurança da água. Lógica fuzzy. Sistemas de inferência fuzzy.

ABSTRACT

Developed communities, in all their activities, are permanently and increasingly subject to a complex set of risks. Risk is therefore a concept that has become increasingly important in contemporary society with a focus on different aspects of the same. Water systems are areas of potential application of the concept of risk assessment and risk management, given that the set goals can be skewed, in the environment or economic sustainability, resulting from uncertainties, extreme events, errors or other events. To ensure the safety of water systems, several methods have been used with applications to specific cases. Because these are complex processes, taking as a basis inaccurate or approximate information, many of the studies have also considered the use of Fuzzy Systems, which are based on Fuzzy Logic, by suit well to the type of analysis in question. This work discusses initially on general aspects of risk assessment and risk management related to some water systems, yet approaching the theoretical foundations of Preliminary Hazard Analysis (PHA) and Fuzzy Systems. It has as main objective, however, the presentation of a methodology purpose that consists of forming an integrated risk assessment for possible subdivision of the water system analyzed at different levels. It can be obtained, therefore, the individual values of the various types of risk involved in the study, the risk of subsystems as they are distributed and the overall risk of the system. It also proposes the construction of a fuzzy inference system, which are suggested the membership functions for the input linguistic variables *Possibility of Occurrence* and *Severity of Consequences* and the linguistic variable output *Risk*, but also establishes scales of values for them. To carry out the proposed analysis, the Risk-Fuzzy Program has been developed, specifically for this purpose. It evaluates then the proposed methodology, as Case Study, from existing data that have been raised by the Company of Water Resources Management (COGERH) in the Contribution System Raw Water for the Metropolitan Region of Fortaleza (SAAB/RMF). It also concludes that for the scenarios considered, the situation of SAAB/RMF, with regard to the frequency and severity of possible risks, is comfortable both in terms of quantity but also the quality of water. It has finally new prospects for studies and researches that can complement or deepen the study.

Keywords: Water resources. Water systems. Risk analysis. Risk management. Water safety plan. Fuzzy logic. Fuzzy inference systems.

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 – Estrutura geral de um sistema de gestão de riscos.....	24
Figura 2.2 – Responsabilidade partilhada na gestão de riscos de barragens.....	28
Figura 2.3 – Exemplos de funções de pertinência de forma triangular, trapezoidal e gaussiana.....	42
Figura 2.4 – Funções de pertinência para a variável temperatura.....	43
Figura 2.5 – Etapas de um sistema de inferência fuzzy.....	46
Figura 2.6 – Saída gráfica do programa Matlab®: resultado do processamento de um sistema de inferência fuzzy.....	49
Figura 3.1 – Mapa das bacias hidrográficas do Estado do Ceará.....	52
Figura 3.2 – Mapa da área de aplicação do estudo onde se destacam os reservatórios e os canais.....	53
Figura 3.3 – Diagrama unifilar do Sistema de Aporte de Água Bruta para a Região Metropolitana de Fortaleza (SAAB/RMF).....	54
Figura 4.1 – Funções de pertinência de entrada para a variável <i>Possibilidade de Ocorrência</i>	64
Figura 4.2 – Funções de pertinência de entrada para a variável <i>Severidade das Consequências</i>	65
Figura 4.3 – Funções de pertinência de saída para a variável <i>Risco</i>	66
Figura 4.4 – Fluxograma do programa Risco-Fuzzy.....	70
Figura 5.1 – Saída gráfica do Matlab®: superfície que relaciona <i>Possibilidade de Ocorrência</i> × <i>Severidade das Consequências</i> × <i>Risco</i>	77
Figura 5.2 – Entrada da variável <i>Possibilidade de Ocorrência</i> por meio de um intervalo de confiança triangular para a contaminação da água nos subsistemas 1, 4, 6, 9 e 11 (Aplicação 1).....	85
Figura 5.3 – Entrada da variável <i>Severidade das Consequências</i> por meio de um intervalo de confiança triangular para a contaminação da água nos subsistemas 1, 4 e 6 (Aplicação 1).....	86

Figura 5.4 – Entrada da variável <i>Severidade das Consequências</i> por meio de um intervalo de confiança triangular para a contaminação da água nos subsistemas 9 e 11 (Aplicação 1).....	86
Figura 5.5 – Entrada da variável <i>Possibilidade de Ocorrência</i> por meio de um intervalo de confiança triangular para a contaminação da água nos subsistemas 1, 4, 6, 9 e 11 (Aplicação 2).....	88
Figura 5.6 – Entrada da variável <i>Severidade das Consequências</i> por meio de um intervalo de confiança triangular para a contaminação da água nos subsistemas 1, 4 e 6 (Aplicação 2).....	89
Figura 5.7 – Entrada da variável <i>Severidade das Consequências</i> por meio de um intervalo de confiança triangular para a contaminação da água nos subsistemas 9 e 11 (Aplicação 2).....	89
Figura 5.8 – Entrada da variável <i>Possibilidade de Ocorrência</i> por meio de um intervalo de confiança trapezoidal para a contaminação da água nos subsistemas 1, 4, 6, 9 e 11 (Aplicação 1).....	92
Figura 5.9 – Entrada da variável <i>Severidade das Consequências</i> por meio de um intervalo de confiança trapezoidal para a contaminação da água nos subsistemas 1, 4 e 6 (Aplicação 1).....	92
Figura 5.10 – Entrada da variável <i>Severidade das Consequências</i> por meio de um intervalo de confiança trapezoidal para a contaminação da água nos subsistemas 9 e 11 (Aplicação 1).....	93
Figura 5.11 – Entrada da variável <i>Possibilidade de Ocorrência</i> por meio de um intervalo de confiança trapezoidal para a contaminação da água nos subsistemas 1, 4, 6, 9 e 11 (Aplicação 2).....	95
Figura 5.12 – Entrada da variável <i>Severidade das Consequências</i> por meio de um intervalo de confiança trapezoidal para a contaminação da água nos subsistemas 1, 4 e 6 (Aplicação 2).....	95
Figura 5.13 – Entrada da variável <i>Severidade das Consequências</i> por meio de um intervalo de confiança trapezoidal para a contaminação da água nos subsistemas 9 e 11 (Aplicação 2).....	96

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 – Escala de Possibilidade de Ocorrência	34
Tabela 2.2 – Escala de Severidade de Consequências.....	34
Tabela 2.3 – Matriz de Priorização Qualitativa de Riscos.....	34
Tabela 2.4 – Categorias de frequências de ocorrência dos cenários.....	36
Tabela 2.5 – Categorias de severidade dos perigos identificados.....	37
Tabela 2.6 – Matriz de Classificação de Riscos (Frequência × Impacto).....	37
Tabela 2.7 – Legenda da Matriz de Classificação de Riscos (Frequência × Impacto).....	38
Tabela 4.1 – Risco associado ao estado de seca	61
Tabela 4.2 – Escala de valores da variável <i>Possibilidade de Ocorrência</i>	64
Tabela 4.3 – Escala de valores da variável <i>Severidade das Consequências</i>	65
Tabela 4.4 – Escala de valores da variável <i>Risco</i>	66
Tabela 4.5 – Matriz de Classificação de Riscos	67
Tabela 5.1 – Riscos individuais para o Açude Castanhão (Subsistema 1)	72
Tabela 5.2 – Riscos individuais para a Estação Elevatória do Açude Castanhão (Subsistema 2).....	72
Tabela 5.3 – Riscos individuais para o Canal da Integração (Subsistema 3)	73
Tabela 5.4 – Riscos individuais para o Açude Curral Velho (Subsistema 4).....	73
Tabela 5.5 – Riscos individuais para o Canal do Trabalhador (Subsistema 5)	74
Tabela 5.6 – Riscos individuais para o Açude Pacajus (Subsistema 6).....	74
Tabela 5.7 – Riscos individuais para o Estações Elevatórias EB1 e EB2 (Subsistema 7)	75
Tabela 5.8 – Riscos individuais para o Canal do Ererê (Subsistema 8)	75
Tabela 5.9 – Riscos individuais para o Açudes Pacoti e Riachão (Subsistema 9)	76
Tabela 5.10 – Riscos individuais para o Sistema de Túneis (Subsistema 10).....	76
Tabela 5.11 – Riscos individuais para o Açude Gavião (Subsistema 11)	76

Tabela 5.12 – Riscos dos subsistemas para o caso dos antecedentes com grau de pertinência a apenas um conjunto fuzzy	78
Tabela 5.13 – Riscos individuais para o Açude Castanhão (Subsistema 1)	81
Tabela 5.14 – Riscos individuais para o Açude Curral Velho (Subsistema 4).....	81
Tabela 5.15 – Riscos individuais para o Açude Pacajus (Subsistema 6).....	82
Tabela 5.16 – Riscos individuais para os Açudes Pacoti e Riachão (Subsistema 9) e para o Açude Gavião (Subsistema 11).....	82
Tabela 5.17 – Riscos dos subsistemas 1, 4, 6, 9 e 11 para o caso dos antecedentes com grau de pertinência a dois conjuntos fuzzy	84
Tabela 5.18 – Riscos individuais para os antecedentes impostados por meio de intervalos de confiança triangulares nos subsistemas 1, 4, 6, 9 e 11 (Aplicação 1).....	87
Tabela 5.19 – Riscos dos subsistemas 1, 4, 6, 9 e 11 para o caso dos antecedentes impostados por meio de intervalos de confiança triangulares (Aplicação 1) ...	87
Tabela 5.20 – Riscos individuais para os antecedentes impostados por meio de intervalos de confiança triangulares nos subsistemas 1, 4, 6, 9 e 11 (Aplicação 2).....	90
Tabela 5.21 – Riscos dos subsistemas 1, 4, 6, 9 e 11 para o caso dos antecedentes impostados por meio de intervalos de confiança triangulares (Aplicação 2) ...	90
Tabela 5.22 – Riscos individuais para os antecedentes impostados por meio de intervalos de confiança trapezoidais nos subsistemas 1, 4, 6, 9 e 11 (Aplicação 1).....	93
Tabela 5.23 – Riscos dos subsistemas 1, 4, 6, 9 e 11 para o caso dos antecedentes impostados por meio de intervalos de confiança trapezoidais (Aplicação 1)...	94
Tabela 5.24 – Riscos individuais para os antecedentes impostados por meio de intervalos de confiança trapezoidais nos subsistemas 1, 4, 6, 9 e 11 (Aplicação 2).....	96
Tabela 5.25 – Riscos dos subsistemas 1, 4, 6, 9 e 11 para o caso dos antecedentes impostados por meio de intervalos de confiança trapezoidais (Aplicação 2)...	97
Tabela 5.26 – Análise de sensibilidade da metodologia proposta por meio da comparação dos resultados obtidos anteriormente.....	99
Tabela B.1 – Dados de entrada do programa Risco-Fuzzy para a determinação dos riscos individuais, dos riscos dos subsistemas e do risco global do sistema.....	111

LISTA DE QUADROS

Quadro A.1 – Script principal <i>Risco Fuzzy</i>	108
Quadro A.2 – Script <i>Dados Entrada</i>	109
Quadro A.3 – Script <i>Conjuntos Fuzzy</i>	109
Quadro A.4 – Script da função <i>Inferência</i>	110

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ABRH	Associação Brasileira de Recursos Hídricos
APP	Análise Preliminar de Perigo
CNPq	Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico
COGERH	Companhia de Gestão dos Recursos Hídricos
ETA	Estação de Tratamento de Água
FIFA	Federação Internacional de Futebol
<i>FP</i>	Função de Pertinência (Conjunto Fuzzy)
IPECE	Instituto de Pesquisa e Estratégia Econômica do Ceará
MATLAB [®]	Matrix Laboratory
<i>PO</i>	Possibilidade de Ocorrência
Pós-DEHA	Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, do Departamento de Engenharia Hidráulica e Ambiental, da Universidade Federal do Ceará
PSA	Plano de Segurança da Água
<i>R</i>	Risco
RMF	Região Metropolitana de Fortaleza
<i>RS</i>	Relevância do Subsistema
SAAB	Sistema de Aporte de Água Bruta
<i>SC</i>	Severidade das Consequências
UFC	Universidade Federal do Ceará

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	18
1.1	Objetivo geral	20
1.2	Objetivos específicos	20
2	REVISÃO DA LITERATURA	21
2.1	Riscos e incertezas	21
2.2	Gestão de riscos	24
2.3	Gestão de riscos aplicada a barragens	25
2.4	Plano de segurança da água (PSA)	32
2.5	Análise preliminar de perigo (APP)	35
2.6	Sistemas fuzzy	38
2.6.1	<i>Lógica fuzzy</i>	38
2.6.2	<i>Teoria dos conjuntos fuzzy</i>	40
2.6.2.1	<i>Fundamentos</i>	40
2.6.2.2	<i>Funções de pertinência</i>	41
2.6.2.3	<i>Variáveis linguísticas</i>	42
2.6.2.4	<i>Operações envolvendo conjuntos fuzzy</i>	43
2.6.3	<i>Sistemas de inferência fuzzy</i>	46
3	ÁREA DE APLICAÇÃO DO ESTUDO	51
3.1	Sistema hídrico analisado	51
3.2	Dados utilizados na avaliação dos riscos	55
3.3	Características do trabalho que possibilitou os dados utilizados	57
3.4	Descrição do sistema de aporte de água bruta para a Região Metropolitana de Fortaleza (SAAB/RMF)	57
4	METODOLOGIA	60
4.1	Proposta metodológica	60

4.2	Fluxo da estratégia metodológica	62
4.3	Construção do sistema de inferência fuzzy	63
4.4	Desenvolvimento do programa Risco-Fuzzy	68
5	RESULTADOS E DISCUSSÃO	71
5.1	Antecedentes com grau de pertinência a apenas um conjunto fuzzy	71
5.1.1	<i>Riscos individuais</i>	71
5.1.2	<i>Riscos dos subsistemas</i>	78
5.1.3	<i>Risco global do sistema</i>	79
5.2	Antecedentes com grau de pertinência a dois conjuntos fuzzy	79
5.2.1	<i>Riscos individuais</i>	80
5.2.2	<i>Riscos dos subsistemas</i>	83
5.2.3	<i>Risco global do sistema</i>	84
5.3	Antecedentes impostados por meio de intervalos de confiança triangulares	85
5.3.1	<i>Aplicação 1</i>	85
5.3.2	<i>Aplicação 2</i>	88
5.4	Antecedentes impostados por meio de intervalos de confiança trapezoidais	91
5.4.1	<i>Aplicação 1</i>	92
5.4.2	<i>Aplicação 2</i>	94
5.5	Risco global do sistema considerando a relevância de subsistemas	98
5.6	Análise de sensibilidade da metodologia proposta por meio da comparação dos resultados obtidos anteriormente	99
6	CONCLUSÃO E PERSPECTIVAS	100
	REFERÊNCIAS	104
	APÊNDICE A – SCRIPTS DO PROGRAMA RISCO-FUZZY	108
	APÊNDICE B – DADOS DE ENTRADA DO PROGRAMA RISCO-FUZZY	111

1 INTRODUÇÃO

Todas as sociedades, em suas diversas atividades, estão permanentemente, e cada vez mais, submetidas a um complexo conjunto de riscos. (ALMEIDA, 2003).

Os riscos decorrem não apenas das múltiplas situações perigosas impostas pela natureza, mas são também gerados pela própria atividade humana que, com o uso da tecnologia, agravam os riscos naturais ou criam riscos artificiais.

Tendo como finalidade a garantia da segurança de sistemas hídricos, distintas metodologias de avaliação de riscos têm sido empregadas, com aplicações a casos específicos, nos mais variados estudos. Por serem processos complexos, que se baseiam em informações aproximadas ou imprecisas, muitos dos trabalhos, particularmente os mais recentes, têm levado em consideração a utilização de Sistemas Fuzzy, que são fundamentados na Lógica Fuzzy, por se adequarem bem ao tipo de análise em questão.

O presente trabalho se propõe à formulação de uma avaliação integrada de riscos em que é permitida a subdivisão do sistema hídrico considerado em diversos níveis. Permite-se, assim, que a análise seja caracterizada pela obtenção de valores absolutos para os riscos, dentro de uma escala estabelecida previamente, em sucessivas etapas. Podem, portanto, ser calculados os valores individuais dos diversos tipos de risco envolvidos no estudo, dos subsistemas em estes estejam distribuídos, das unidades de risco que englobam determinados subsistemas, além da obtenção do risco global do sistema. A quantidade de níveis, inclusive, pode variar em função do sistema hídrico escolhido.

Para a realização do estudo descrito no parágrafo anterior, propôs-se também a utilização de um sistema de inferência fuzzy, onde foram sugeridas funções de pertinência de entrada para as variáveis linguísticas de entrada *Possibilidade de Ocorrência* e *Severidade das Consequências*, como também para a variável linguística de saída *Risco*. Foram também estabelecidas escalas de valores para citadas variáveis.

Tornou-se também necessária a elaboração de um programa para computador, que foi denominado de Risco-Fuzzy, que tem como finalidade a avaliação dos riscos, por intermédio de um sistema de inferência fuzzy, e dentro das escalas sugeridas, a que este trabalho se propõe a realizar. Visando a aplicação no Estudo de Caso descrito no parágrafo seguinte, referido software considerou o sistema hídrico subdividido em três níveis. Com

adaptações relativamente simples, o mesmo pode levar em conta uma maior quantidade de níveis.

Como Estudo de Caso, foi analisado o Sistema de Aporte de Água Bruta para a Região Metropolitana de Fortaleza (SAAB/RMF), cujos dados foram levantados por Capelo Neto, Brito e Viana (2014) junto à Companhia de Gestão dos Recursos Hídricos (COGERH), que foi assim subdividido:

- a) sistema global: SAAB/RMF;
- b) subsistemas: as 11 (onze) unidades hídricas constantes no levantamento realizado (obras de armazenamento de água, obras de transferência hídrica e estações elevatórias);
- c) tipos de risco: os diferentes riscos que foram considerados.

Para uma completa abordagem do tema em questão, este trabalho foi subdividido em etapas. A primeira delas, indicada no Capítulo 2, que corresponde à Revisão da Literatura, ilustra o levantamento teórico de temas envolvidos com o assunto em questão. Discorre inicialmente sobre conceitos básicos relativos a riscos e incertezas, destacando a estrutura geral de um sistema de gestão de riscos. Apresenta também aspectos gerais da análise e gestão de riscos em barragens e seus vales e do Plano de Segurança da Água (PSA). Em seguida, exhibe aspectos fundamentais da Análise Preliminar de Perigos (APP) e dos Sistemas Fuzzy.

O Capítulo 3 mostra a região selecionada como Estudo de Caso, descrevendo cada uma das unidades hídricas, ou seja, cada um dos subsistemas em que foi subdividido o SAAB/RMF, onde foram avaliados os riscos considerados.

No Capítulo 4 é apresentado o detalhamento da metodologia empregada no desenvolvimento do estudo em questão. Engloba tanto a construção do sistema de inferência fuzzy sugerido como o desenvolvimento do programa Risco-Fuzzy.

Os resultados obtidos durante a pesquisa são mostrados no Capítulo 5. Uma discussão dos mesmos, com base na fundamentação teórica, é também abordada.

No Capítulo 6, por fim, são expostas as conclusões relativas à análise dos resultados obtidos na aplicação da metodologia proposta. Além do mais, são apresentadas

novas perspectivas de estudos e pesquisas que possam complementar ou aprofundar o trabalho ora desenvolvido.

1.1 Objetivo geral

O Objetivo geral deste trabalho é o desenvolvimento de uma metodologia de avaliação integrada de riscos (estruturais, geotécnicos, hidrológicos, hidráulicos, ambientais et cetera) em infraestruturas de sistemas de recursos hídricos (obras de armazenamento de água, obras de transferência hídrica e estações elevatórias) por meio de um sistema de inferência fuzzy e utilizando um programa para computador (Risco-Fuzzy) elaborado especificamente para este propósito. Tem também a finalidade de possibilitar a subdivisão do sistema hídrico estudado em subsistemas que possuam, por sua vez, os diversos tipos de risco a serem analisados.

1.2 Objetivos específicos

Os objetivos específicos são relacionados no que se segue:

- a) realização de levantamento dos conceitos e das etapas envolvidos na elaboração e na implementação de processos referentes à análise e gestão de riscos em sistemas hídricos diversos;
- b) proposição de uma metodologia de avaliação integrada de riscos, por intermédio de um sistema de inferência fuzzy, em que o sistema hídrico possa ser subdividido em vários níveis de análise;
- c) definição de um critério que possibilite a determinação, além dos riscos individuais, como geralmente são estudados, dos riscos das unidades de risco (reservatórios, canais, túneis e estações elevatórias) e do risco global do hidrossistema;
- d) desenvolvimento de um software para computador (Risco-Fuzzy) com a finalidade de permitir a avaliação dos riscos individuais, dos riscos dos subsistemas e do risco global do sistema, priorizando a simplicidade de imposição dos dados e facilidade da obtenção dos resultados para posterior análise; e
- e) aplicação da metodologia proposta, como Estudo de Caso, ao SAAB/RMF, possibilitando a compatibilização da propositura a dados reais já existentes.

2 REVISÃO DA LITERATURA

A fundamentação teórica deste trabalho está dividida em seis tópicos distintos, que são discriminados abaixo:

- a) Riscos e incertezas;
- b) Gestão de riscos;
- c) Gestão de riscos aplicada a barragens;
- d) Plano de Segurança da Água (PSA);
- e) Análise Preliminar de Perigo (APP); e
- f) Sistemas Fuzzy.

2.1 Riscos e incertezas

Conforme Vieira (2005, p. 1), “são as incertezas que nos cercam a fonte geradora dos riscos que nos ameaçam”. As incertezas são, portanto, o pano de fundo onde são originados os riscos.

Em um mundo menos e menos previsível, nos tornamos mais e mais conscientes da incerteza. Talvez o ambiente hoje não seja mais incerto do que era no passado, mas a velocidade com que a informação é transferida para qualquer parte do mundo, faz com que assim pareça. (KAUFMANN; GUPTA, 1991).

Segundo Campos e Studart (2006, p. 77) e Studart (2000, p. 11), “é importante distinguir claramente os diferentes tipos e fontes de incertezas, uma vez que os mesmos necessitam ser tratados de diferentes formas.” Comentam ainda que, na literatura, vários autores têm analisado diferentes tipos de incerteza e feito distinções entre elas, tais como objetivas e subjetivas, primárias e secundárias, naturais e tecnológicas.

As mais diversas classificações de tipos de incertezas podem ser encontradas em Morgan e Henrion (1993).

Conforme Ganoulis (1995), as incertezas, geralmente, podem ser classificadas em dois grandes grupos: incertezas aleatórias (ou naturais) e incertezas epistêmicas.

As incertezas aleatórias (ou naturais) são inerentes ao processo e não podem ser reduzidas com a utilização de um modelo mais aprimorado ou com a obtenção de dados adicionais.

As incertezas epistêmicas podem ser de três diferentes tipos: incertezas nos dados, incerteza do modelo e incertezas operacionais. Campos e Studart (2006, p. 78) e Studart (2000, p. 13) acrescentam que, “diferentemente das incertezas naturais, as epistêmicas podem ser reduzidas pela coleta de mais informações ou pelo aperfeiçoamento do modelo matemático.”

Vincens, Rodrigues-Iturbe e Shaake (1975) propuseram, para o caso específico de modelagem hidrológica, a classificação das incertezas em três tipos:

- a) Tipo I – ocasionadas pelo desconhecimento do verdadeiro modelo que rege o processo natural;
- b) Tipo II – geradas na avaliação dos parâmetros dos modelos matemáticos; e
- c) Tipo III – aquelas inerentes aos processos naturais.

As incertezas do Tipo I são de difícil avaliação, uma vez que todo modelo é, inevitavelmente, uma simplificação da realidade. Com relação às incertezas do Tipo II, mesmo que a complexidade dos fenômenos hidrológicos pudesse ser fielmente reproduzida por um modelo, restaria ainda a estimativa dos parâmetros relacionados às informações disponíveis. As incertezas do Tipo III não podem ser reduzidas pelo uso de um modelo mais sofisticado ou pelo levantamento de mais informações. As mesmas não variam e, portanto, devem ser conhecidas e incorporadas ao planejamento. (CAMPOS; STUDART, 2006; STUDART, 2000).

O reconhecimento, a qualificação e, se possível, a quantificação dos riscos passaram a ser objeto de análise científica e, também, de preocupação política, incorporando-se, pouco a pouco, ao processo de decisão de todos os nossos atos, tanto em nível individual ou empresarial, quanto em nível coletivo ou nacional. (VIEIRA, 2005).

De acordo ainda com Vieira (2005), risco é a possibilidade ou probabilidade de ocorrência de eventos, fatos ou resultados indesejáveis. Por outro lado, os eventos desejáveis ou benéficos, por alguns chamados de oportunidades, conduzem à noção de garantia ou confiabilidade.

Vieira e Morais (2005, p. 22), por sua vez, definem “um risco como sendo a probabilidade de ocorrência de um perigo causador de danos a uma certa população a ele exposta num determinado intervalo de tempo e considerando a magnitude desse dano.”

De acordo com Rejda (2011), historicamente risco tem sido definido em termos de incerteza. Baseado neste conceito, ele define risco como sendo a incerteza quanto à ocorrência de uma perda.

Conforme Kerzner (2011, p. 457), “risco é uma medida de probabilidade e consequência de não se atingir uma meta definida no projeto.” Afirma ainda que “a maioria das pessoas concorda que o risco envolve a noção de incerteza.” Esclarece ainda que o risco possui dois componentes principais para determinado evento:

- a) uma probabilidade de ocorrência desse evento; e
- b) o impacto (ou consequência) de ocorrência do evento.

Segundo a ABNT (2009a, 2009b), risco é o efeito da incerteza nos objetivos. Um efeito, por sua vez, é um desvio em relação ao esperado, seja positivo e/ou negativo. Os objetivos podem ter diferentes aspectos (tais como metas financeiras, de saúde e segurança e ambientais) e podem ser aplicados em diferentes níveis (tais como estratégico, em toda a organização, de projeto, de produto e de processo).

A ABNT (2009a, 2009b) esclarece ainda que o risco é muitas vezes caracterizado pela referência aos eventos potenciais e às consequências, ou uma combinação destes. O risco é muitas vezes expresso em termos de uma combinação de consequências de um evento (incluindo mudanças nas circunstâncias) e a probabilidade de ocorrência associada. A incerteza, por outro lado, é o estado, mesmo que parcial, da deficiência das informações relacionadas a um evento, sua compreensão, seu conhecimento, sua consequência ou sua probabilidade.

Independentemente da definição que se adote para risco, cada indivíduo, ou uma comunidade, tem uma noção subjetiva de risco, que envolve as noções de receio e de perigo, o grau de possibilidade de ocorrência de um evento desfavorável e a avaliação de perdas ou prejuízos. Esta apreciação é o resultado de diversos fatores, do tipo cultural e psicológico, e envolve valores sociais que influenciam a postura de cada membro da comunidade perante a segurança e a incerteza da mesma no futuro. (ALMEIDA, 2003).

2.2 Gestão de riscos

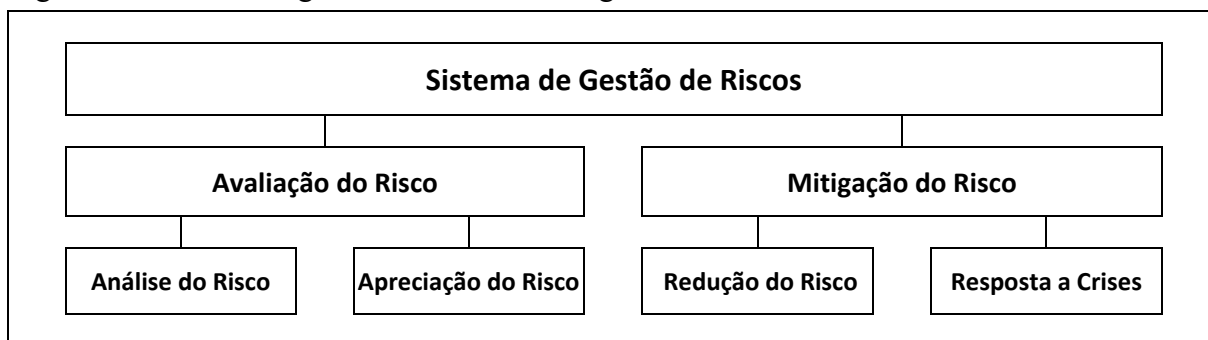
Organizações de todos os tipos e tamanhos enfrentam uma série de riscos que podem afetar a realização de seus objetivos. Estes objetivos podem estar relacionados a uma série de atividades da organização, desde iniciativas estratégicas até suas operações, processos e projetos, e se refletir em termos de resultados para a sociedade, ambientais, tecnológicos, de segurança, medidas comerciais, financeiras e econômicas, bem como impactos sociais, culturais, políticas e na reputação. (ABNT, 2012).

Todas as atividades de uma organização envolvem riscos que devem ser gerenciados. O processo de gestão de riscos auxilia a tomada de decisão, levando em consideração as incertezas e a possibilidade de circunstâncias ou eventos futuros (intencionais e não intencionais) e seus efeitos sobre os objetivos acordados. (ABNT, 2012).

Risco é um conceito que tem uma importância crescente na sociedade contemporânea com incidência em diferentes aspectos da mesma. A gestão de riscos pode ser definida, em um sentido amplo, como uma forma estruturada e integrada da sociedade responder a qualquer tipo de risco que constitua uma ameaça com possibilidade de ser avaliável. (ALMEIDA, 2003).

Segundo Almeida (2004), um sistema de gestão de riscos tem uma estrutura geral, mostrada Figura 2.1, que pode ser adotada a situações, domínios e tipos de riscos distintos: desde às cheias aos incêndios florestais, do combate à poluição à saúde pública e da gestão empresarial ou de projetos à gestão de recursos hídricos. Referido sistema considera a avaliação e a mitigação do risco.

Figura 2.1 – Estrutura geral de um sistema de gestão de riscos



Fonte: Adaptada de Almeida (2004).

A avaliação do risco é dividida em duas etapas:

- a) a análise do risco, que consiste na determinação de cenários e na avaliação de probabilidades ou possibilidades de ocorrência de eventos e das suas respectivas consequências; e
- b) a apreciação do risco, que corresponde à estimativa dos valores dos riscos, da compatibilização com critérios de aceitabilidade ou tolerância e do suporte à decisão.

A mitigação do risco se ramifica nos dois aspectos seguintes:

- a) a redução do risco, onde são realizadas a seleção e a implementação de medidas de prevenção de forma a reduzir a exposição ao insucesso ou ao perigo e os consequentes danos, ou seja, são estabelecidos os planos de contingência; e
- b) a resposta a crises, onde é efetivada a preparação da assistência adequada em caso de um acidente ou de um evento muito negativo, isto é, a gestão da crise.

Do ponto de vista epistemológico, não é possível obter valores de referência absolutos para a adoção de riscos aceitáveis pela sociedade em cada caso, ou para determinados tipos de situações. Para que a análise e a gestão do risco tenham uma estrutura coerente e, também, uma capacidade operacional forte torna-se imperioso definir ou selecionar critérios para a fixação dos valores dos riscos socialmente aceitáveis e o modo mais adequado de os definir, como por exemplo, probabilidades dos eventos, consequências ou danos admissíveis ou tolerados, relações limites entre probabilidades dos eventos e a magnitude dos respectivos danos. (ALMEIDA, 2004).

2.3 Gestão de riscos aplicada a barragens

A análise e gestão de riscos em barragens, tema de grande relevância para o semiárido da Região Nordeste do Brasil, foi objeto de pesquisa em dois doutoramentos do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, do Departamento de Engenharia Hidráulica e Ambiental (Pós-DEHA): Fontenelle (2007) e Menescal (2009).

“A água é um elemento essencial à vida em todas as suas formas. A água está presente em todos os organismos vivos dos reinos animal e vegetal e o acesso continuado à mesma se constitui num imperativo para a sobrevivência biológica.” (SILVA, 2011, p. 3).

Milhões de pessoas em nosso País dependem de barragens para obter água em condições adequadas em termos de quantidade, qualidade, localização e tempo. Os barramentos são, portanto, elementos de infraestrutura importantes para o desenvolvimento sustentável. Dentre as principais utilizações dos mesmos destacam-se o abastecimento de água, a irrigação, a aquicultura, o controle de cheias, a hidroeletricidade, a recreação, a acumulação de resíduos industriais líquidos e a disposição de rejeitos de mineração. (MENESCAL, 2009).

De acordo ainda com Menescal (2009), a ocorrência de enchentes encontra-se associada, a priori, a duas causas básicas. A primeira relaciona-se aos fatores climáticos, ou seja, intensidade e duração das precipitações que ocorrem na área das bacias, e a segunda aos fatores fisiográficos (por exemplo: área e formato das bacias, declividades das vertentes, tipo do solo, cobertura vegetal et cetera), que determinam o maior ou menor grau com que são sentidos os efeitos de uma precipitação nas bacias hidrográficas. Outro fator determinante para a manifestação de enchentes é o desmatamento e a ocupação desordenada das áreas de várzeas, com conseqüente assoreamento do leito dos cursos d'água, que é típico das regiões das bacias metropolitanas.

Desastres naturais, principalmente os relacionados com a água, sempre ocorreram, contudo, o crescimento demográfico, associado à degradação do meio ambiente, faz com que esses desastres tomem proporções gigantescas, com um elevado custo social, econômico e ambiental. Ao aumento na frequência e magnitude de enchentes, decorrente desta degradação, soma-se o grande número de pessoas que moram em áreas de risco, potencializando o problema. As barragens, portanto, ao mesmo tempo em que desempenham o papel de regularizar os rios, amortecer ondas de cheias, armazenar água para abastecimento humano e propiciar a geração de energia hidrelétrica, devem ser capazes de suportar condições adversas, sem potencializar os efeitos das enchentes. (MENESCAL, 2009).

Segundo Kreuzer (2005), entre as estruturas civis altamente perigosas, as barragens figuram entre aquelas cujo desempenho é predito com um dos níveis mais altos de incerteza. Algumas razões devem-se a:

- a) cada barragem é única. Encontrar referência útil de outras barragens de seu tipo e porte é difícil para um diagnóstico fiável de sintomas do comportamento não usual;
- b) barragens são estruturas complexas. A barragem artificial não é a parte predominante do sistema quando se julga a incerteza do comportamento. É a fundação menos controlável, que geralmente resulta ser uma conexão mais débil para predizer o desempenho. A interação intrincada entre estas duas partes aumenta o nível de incerteza; e
- c) barragens estão mais expostas às vicissitudes da natureza do que outras estruturas civis (por exemplo: geologia, inundações, terremotos, modificações climáticas et cetera).

O processo natural de envelhecimento das barragens, ou a tendência frequentemente verificada para a ocupação dos vales a jusante dos reservatórios, bem como o aumento da percepção dos riscos associados, conduzem a maiores exigências na segurança deste tipo de estrutura. Estas se traduzem, nomeadamente, pelo estabelecimento e cumprimento de normas de operação e de programas de inspeção, observação, monitoramento e manutenção. O objetivo de uma avaliação de segurança é determinar as condições relativas à estabilidade estrutural e operacional de uma barragem. (FONTENELLE, 2007).

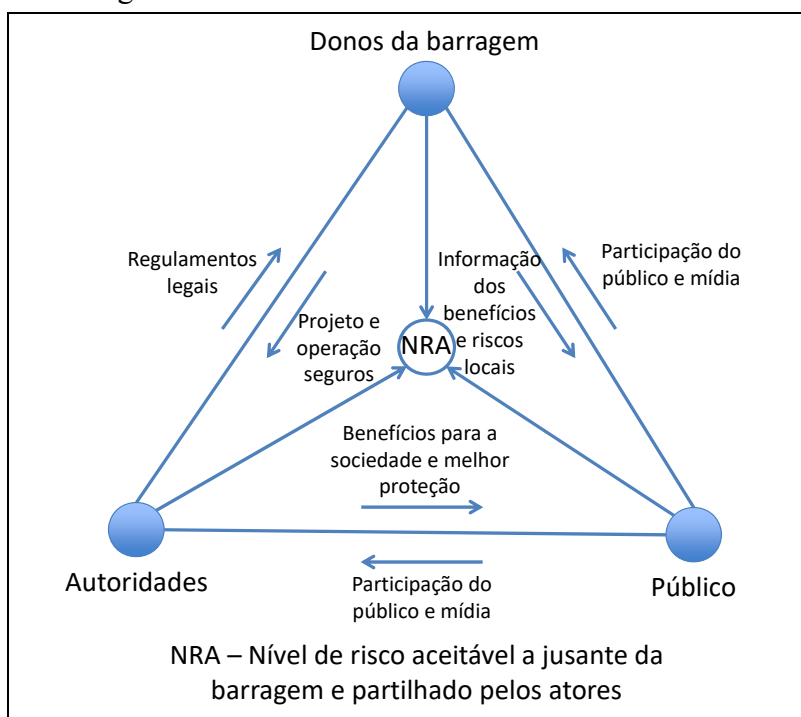
No caso de ruptura de barragens, devem ser consideradas as consequências com prejuízos diretos, como a perda de vidas humanas e os danos materiais no açude e nas áreas inundadas. Há ainda que considerar os prejuízos indiretos resultantes da interrupção das atividades produtivas nas zonas afetadas, da impossibilidade de exploração dos recursos hídricos e os resultantes de traumas psicológicos e físicos nos sobreviventes. A determinação do valor total dos prejuízos é difícil de ser estimada, se não mesmo impossível, principalmente no que concerne avaliar valores de vidas perdidas. (FONTENELLE, 2007).

A implementação do conceito de gestão de riscos é justificada pelas considerações gerais de cunho filosófico, sociológico e político que caracterizam a situação atual das sociedades mais desenvolvidas no que se refere aos riscos. Esta situação corresponde a uma mudança profunda do comportamento social relativamente aos eventos incertos com potenciais efeitos negativos, em particular às ações dos mesmos sob a forma de catástrofes ou de acidentes. (ALMEIDA, 2004).

A percepção dos riscos e a resposta da sociedade aos mesmos vai além de um componente técnico-científico objetivo. Envolve um componente subjetivo de apreciação e de transferência de responsabilidade cujo resultado visível é a denúncia de faltas sucessivas aos decisores de nível mais elevado, geralmente por omissão. Este contexto apresenta aspectos positivos, como, por exemplo, a atuação mais responsável dos políticos, uma maior cautela dos mesmos com relação a promessas difíceis de serem cumpridas, maior transparência e diagnósticos mais rigorosos de situações de risco, maior justiça e equidade na gestão da coisa pública e mais atenção à proteção de vidas. (ALMEIDA, 2004).

Neste contexto, são justificadas as ações que tendem a acompanhar e a reforçar as acusações por parte da sociedade civil aos poderes instituídos. Uma análise objetiva, contudo, leva a aceitar a situação atual como um sinal de desadaptação do sistema de prevenção e de proteção contra uma realidade com importância social emergente. A gestão de riscos pode ser a estrutura adequada para enquadrar e corrigir esta desadaptação, já que a proteção contra os riscos torna-se mais eficaz em virtude da responsabilidade ser compartilhada. A Figura 2.2 mostra, como exemplo, o nível de risco aceitável a jusante de uma barragem. (ALMEIDA, 2004).

Figura 2.2 – Responsabilidade partilhada na gestão de riscos de barragens



Fonte: Adaptada de Almeida (2004).

Conforme Codes e Souza Filho (2013), a análise de riscos em barragens pode ser aplicada considerando duas perspectivas distintas:

- a) o processo de decisão técnica referente a aspectos específicos de segurança da barragem; e
- b) o sistema de gestão de riscos associado a um vale com barragens.

Devem ser definidos, no processo de decisão técnica, o reforço da capacidade do escoadouro de cheias, a fixação ou a alteração da cota de coroamento e a implementação de um sistema integrado e automático de alerta e aviso.

No sistema de gestão de riscos devem ser ponderadas a avaliação do risco no vale a jusante, a adoção de medidas mitigadoras especiais para proteção da população e a comunicação, informação e participação do público tendo em vista a aceitação de um nível de risco partilhado.

Nos processos de decisão econômica, a análise de riscos está associada a avaliações do tipo custo-benefício. (CODES; SOUZA FILHO, 2013).

De acordo com Almeida (2003), dentre as justificativas que explicam o interesse na análise do risco no domínio das barragens salientam-se as seguintes:

- a) muitas barragens já atingiram um razoável período de sua respectiva vida útil e pretende-se que as mesmas sejam exploradas por um período mais longo de tempo, podendo exigir intervenções de reabilitação ou de reforço;
- b) sensível falta de experiência, em projeto e construção de barragens, das novas gerações de engenheiros que vão ter a responsabilidade da exploração e da segurança das barragens existentes;
- c) a modernidade foi exigindo cada vez mais a avaliação da segurança de atividades que podem constituir uma ameaça para as populações e a informação e participação pública com relação à segurança e ao risco;
- d) a avaliação da segurança está a ser incentivada pelos indícios de mudanças climáticas, pelo aumento da população em risco a jusante e pelos prejuízos resultantes de um eventual acidente;
- e) o movimento de privatizações na exploração de barragens levanta alguns receios pelos efeitos na segurança das mesmas; e

- f) o enorme potencial destrutivo das barragens relacionado à perda de vidas e de bens materiais.

Almeida (2003) afirma também que a análise de risco nos vales com barragens torna-se indispensável, no contexto do gerenciamento de risco, para que se obtenha uma referência sobre a segurança dos mesmos e sobre a prioridade ou necessidade de intervenção por meio da aplicação de medidas estruturais ou não estruturais. A avaliação de casos históricos de cheias reais, em número suficiente para terem relevância estatística, é ainda muito escassa pelo que se tem que aceitar as seguintes hipóteses:

- a) para cada cenário de ruptura de determinada barragem ocorre uma cheia cujas características dependem das condições e parâmetros estabelecidos ou previstos;
- b) as características hidrodinâmicas das cheias e os efeitos danosos ao longo do vale a jusante da barragem resultam da análise efetuada com as melhores técnicas possíveis e os critérios de previsão mais bem fundamentados; e
- c) a partir dos dois aspectos supracitados decorre que o risco global no vale correspondente pode ser calculado através do produto da probabilidade de ocorrência do acidente na barragem pelos danos estimados em função da área de inundação e respectiva ocupação e das características da cheia e do grau de operacionalidade dos sistemas de alerta e de proteção civil existentes.

Com relação à avaliação dos danos, devem ser considerados, na área potencial de inundação, a perda de vidas humanas correspondente a residentes, trabalhadores ou temporários, ou seja, a população em risco, e os danos econômicos, isto é, aqueles que podem ser expressos monetariamente. (CODES; SOUZA FILHO, 2013).

Concluída a avaliação do risco para uma determinada condição de referência, baseada na análise de risco da barragem, que fornece uma probabilidade de ocorrência de acidentes, e a avaliação das perdas de vidas humanas e econômicas, resultantes da cheia induzida pelo esvaziamento do reservatório, impõe-se proceder uma apreciação do risco e da situação de segurança do vale e tomar, eventualmente, a decisão de implementar novas medidas mitigadoras do risco. (ALMEIDA, 2003).

A autoridade responsável pela segurança de barragens, a defesa civil, os construtores da barragem, os técnicos especialistas no assunto e os representantes da sociedade, ou seja, todos os atores envolvidos no processo, tenderão a ter opiniões diversas sobre o valor do risco aceitável em cada caso. O coordenador do gerenciamento de risco deverá emitir uma decisão com base em objetivos e referências aceitáveis. (ALMEIDA, 2003).

Seriam fisicamente inviáveis as medidas estruturais de proteção contra a inundação decorrente da ruptura de uma barragem num vale com uma ocupação sócio-econômica relevante. É possível a mitigação do risco avaliando-se a probabilidade de ocorrência de um acidente na barragem (prevenção) e/ou implementando medidas que possibilitam a diminuição dos danos, principalmente o de vidas humanas. (ALMEIDA, 2003).

O primeiro tipo de ações depende, basicamente, da aplicação de normas e critérios de segurança para o projeto, construção e exploração de barragens. Devem ser incluídos, neste tipo de ações, o dimensionamento estrutural e hidráulico adequados ao nível de segurança desejado, a implementação de sistemas de observação, de regras de exploração e de um plano de emergência interno, para operação da barragem, compatível com o nível de risco pretendido.

O segundo tipo de ações corresponderá a medidas não estruturais que tendam a diminuir vulnerabilidade da população em risco. As principais são:

- a) a implementação de um sistema de aviso eficaz às populações que permita informar a previsibilidade de um acidente;
- b) a preparação de um plano de evacuação das populações em risco, com base em um mapa de inundação;
- c) o estabelecimento de um zoneamento crítico nas áreas potencialmente inundáveis ao longo do vale; e
- d) a preparação de um plano de emergência que integre os recursos locais e regionais de defesa civil e de apoio às potenciais vítimas.

Almeida (2003) afirma ainda que a comunicação do risco compreende a transmissão de informações pertinentes à segurança das barragens e dos vales, à incerteza relativa aos eventos perigosos e aos potenciais acidentes e aos efeitos nas populações e no

ambiente. Tem também um papel importante na motivação e preparação da população e no enquadramento do seu comportamento na participação dos processos públicos de tomada de decisão, na informação das medidas mitigadoras e na sua atuação em ações de avaliação e de exercícios.

2.4 Plano de segurança da água (PSA)

Nos últimos anos, tem-se assistido a uma preocupação crescente, a nível mundial, no sentido de se considerar que os sistemas de abastecimento de água, além de satisfazerem a padrões de qualidade estabelecidos legalmente, apresentem níveis de desempenho que mereçam a confiança dos consumidores na qualidade da água que lhes é fornecida. (VIEIRA; MORAIS, 2005).

Vieira e Morais (2005, p. 1) destacam ainda que “a garantia da qualidade da água para consumo humano fornecida por um sistema de abastecimento público constitui elemento essencial das políticas de saúde pública.”

A Organização Mundial da Saúde (WHO, 2011) estabeleceu diretrizes com a finalidade de apoiar o desenvolvimento e a implementação de estratégias de gestão de riscos para garantir a segurança do abastecimento de água por meio do controle de constituintes perigosos presentes na água. Estas estratégias podem incluir normas nacionais ou regionais desenvolvidas com base em informação científica fornecida pelas diretrizes. Estas descrevem os requisitos mínimos razoáveis para práticas seguras para proteger a saúde dos consumidores, e determinam valores de referência numéricos dos componentes da água ou os indicadores de qualidade da mesma. Para definir os limites obrigatórios recomendam que é preferível considerar os valores de referência no contexto das condições, locais ou nacionais, do tipo ambiental, social, econômica e cultural.

Vieira e Morais (2005) enfatizam ainda que as diretrizes da Organização Mundial da Saúde (WHO, 2004) recomendam que as entidades gestoras de sistemas de abastecimento público de água desenvolvam planos de segurança para garantir a qualidade da água, incluindo metodologias de avaliação e gestão de riscos, bem como práticas de boa operação dos sistemas. Privilegiando assim uma abordagem de segurança preventiva, em detrimento da metodologia clássica de monitoramento de conformidade ao final do processo, por meio de uma efetiva gestão e operação nas origens da água, nas estações de tratamento e nos sistemas

de distribuição. Destacam, entretanto, que a avaliação de riscos não é um objetivo em si próprio, mas antes uma forma de estruturar o processo de decisão, constituindo o ponto de partida para o estabelecimento de procedimentos que enfatizam o papel fundamental que o consumo de água em segurança assume na proteção da saúde pública.

Com base nas recomendações da Organização Mundial da Saúde (WHO, 2011), um PSA pode ser definido como um documento que identifica e prioriza riscos aceitáveis que podem ser verificados em um sistema de abastecimento, desde a origem da água bruta até o consumidor final.

Conforme Vieira e Morais (2005), o objetivo de um PSA é estruturar um sistema operacional de gestão da qualidade da água, onde podem ser identificadas três etapas fundamentais:

- a) a avaliação do sistema, que é o processo de análise e avaliação de riscos;
- b) o monitoramento operacional, onde são identificados e monitorados os pontos de controle críticos; e
- c) os planos de gestão, responsáveis pelo desenvolvimento de esquemas efetivos para a gestão de controle do sistema.

O PSA deve ainda abranger todos os aspectos relacionados com o controle na fonte, no tratamento e na distribuição da água, sendo que a entidade gestora do sistema é a responsável pela sua aplicação.

Na avaliação de um sistema de abastecimento, a definição de medidas de controle deve ser baseada na priorização de riscos associados a um perigo ou a um evento perigoso. Os eventos com maior severidade de consequências e maior possibilidade de ocorrência devem merecer maior consideração e primazia em relação àqueles cujos impactos são insignificantes ou cuja ocorrência é muito improvável. (VIEIRA; MORAIS, 2005).

Para avaliar o risco associado a cada perigo, a partir das orientações constantes nas diretrizes da Organização Mundial da Saúde (WHO, 2004), Vieira e Morais (2005) estabeleceram a possibilidade do mesmo acontecer, por meio de uma escala de Possibilidade de Ocorrência (TABELA 2.1), e os efeitos para a saúde da população abastecida, de acordo com uma escala de Severidade das Consequências (TABELA 2.2).

Tabela 2.1 – Escala de Possibilidade de Ocorrência

Possibilidade de Ocorrência	Descrição
Quase Certa	Espera-se que ocorra uma vez por dia
Muito Provável	Vai ocorrer provavelmente uma vez por semana
Provável	Vai ocorrer provavelmente uma vez por mês
Pouco Provável	Pode ocorrer uma vez por ano
Raro	Pode ocorrer em situações excepcionais (uma vez em dez anos)

Fonte: Adaptada de Vieira e Morais (2005).

Tabela 2.2 – Escala de Severidade de Consequências

Severidade das Consequências	Descrição
Catastrófica	Letal para uma parte significativa da população ($\geq 10\%$)
Grande	Letal para uma pequena parte da população ($< 10\%$)
Moderada	Nocivo para uma parte significativa da população ($\geq 10\%$)
Pequena	Nocivo para uma pequena parte da população ($< 10\%$)
Insignificante	Sem qualquer impacto detectável

Fonte: Adaptada de Vieira e Morais (2005).

A priorização dos riscos é então determinada após a classificação de cada critério que foi selecionado com base nas escalas, construindo-se a Matriz de Priorização Qualitativa de Riscos (TABELA 2.3). Os elementos desta Matriz são obtidos através do cruzamento da escala de Possibilidade de Ocorrência (linhas) com a escala de Severidade das Consequências (colunas). (VIEIRA; MORAIS, 2005).

Tabela 2.3 – Matriz de Priorização Qualitativa de Riscos

Possibilidade de Ocorrência	Severidade das Consequências (Impacto)				
	Insignificante	Pequena	Moderada	Grande	Catastrófica
Quase Certa	Baixo	Moderado	Elevado	Extremo	Extremo
Muito Provável	Baixo	Moderado	Elevado	Extremo	Extremo
Provável	Baixo	Moderado	Moderado	Elevado	Elevado
Pouco Provável	Baixo	Baixo	Moderado	Moderado	Moderado
Raro	Baixo	Baixo	Baixo	Baixo	Baixo

Fonte: Adaptada de Vieira e Morais (2005).

Gradwohl (2012) propôs uma metodologia aplicando análise multicritério e lógica fuzzy como ferramenta de avaliação de riscos, em conformidade com os conceitos inerentes ao PSA. Realizou seu estudo dividindo o sistema de abastecimento duas etapas: do manancial até a saída da estação de tratamento de água e desta até a rede de distribuição. Montou um sistema de inferência fuzzy com quinze regras e funções de pertinência triangulares, tanto para os dois antecedentes (Probabilidade e Impacto), quanto para o consequente (Risco). Considerou três funções de pertinência para a Probabilidade, cinco para o Impacto e quatro para o Risco. Destaca-se, no seu trabalho, a aplicação da metodologia em sistemas de abastecimento de água de parte dos municípios da Região Metropolitana de Fortaleza (RMF).

2.5 Análise preliminar de perigo (APP)

“A Análise Preliminar de Perigo (APP) é uma metodologia indutiva estruturada para identificar os potenciais perigos decorrentes da instalação de novas unidades e sistemas ou da própria operação da planta que opera com materiais perigosos.” (AGUIAR, 2009, p. 2).

O escopo da APP abrange os eventos perigosos cujas causas tenham origem na instalação analisada, englobando tanto as falhas de componentes ou sistemas, como eventuais erros operacionais ou de manutenção, ou seja, falhas humanas. O grau de risco é determinado por uma matriz de risco gerada por profissionais com maior experiência na unidade e orientada pelos técnicos que aplicam a análise. (AGUIAR, 2009).

De acordo ainda com Aguiar (2009), a metodologia da APP pode ser empregada tanto para sistemas em início de desenvolvimento ou na fase inicial do projeto, quando apenas os elementos básicos e os materiais estão definidos, como também na revisão geral de segurança de sistemas e/ou instalações já em operação.

Na APP são levantadas as causas que podem promover a ocorrência de cada um dos eventos e as suas respectivas consequências. Posteriormente é então realizada uma avaliação qualitativa da frequência de ocorrência (possibilidade de ocorrência) do cenário de acidentes, da gravidade (impacto ou severidade das consequências) e do risco associado. Portanto, os resultados obtidos são qualitativos, não fornecendo estimativas numéricas. (AGUIAR, 2009).

Aguiar (2009) destaca ainda que, normalmente, uma APP fornece também uma ordenação qualitativa dos cenários de acidentes identificados, a qual pode ser utilizada como

um primeiro elemento na priorização das medidas propostas para redução dos riscos da instalação e/ou sistema analisado. No contexto da APP, um cenário de acidente é definido como sendo o conjunto formado pelo perigo identificado, suas causas e cada um de seus efeitos. Um exemplo de cenário de acidente possível seria: grande liberação de substância tóxica devido à ruptura de uma tubulação, levando à formação de uma nuvem tóxica.

Aguiar (2009) salienta ainda que, é importante observar que as classes de severidade e de frequência devem ser adequadas ao tipo de sistema e do empreendimento analisado, para tornar a avaliação do risco mais precisa e menos subjetiva.

É importante ressaltar, portanto, no texto que se segue, que as Tabelas 2.4 a 2.7 foram elaboradas por Capelo Neto, Brito e Viana (2014), fundamentadas no trabalho desenvolvido por Aguiar (2009), e visam a sua aplicação em sistemas hídricos.

De acordo com a metodologia da APP, os cenários de acidente devem ser classificados em categorias de frequência, as quais fornecem uma indicação qualitativa da possibilidade de ocorrência esperada para cada um dos cenários identificados. A Tabela 2.4 mostra as categorias de frequências em uso atualmente para a realização de uma APP e já adaptada para um sistema hídrico.

Tabela 2.4 – Categorias de frequências de ocorrência dos cenários

Tabela de Frequência		
Categoria	Denominação	Descrição
1	Extremamente Remota	Conceitualmente possível, mas extremamente improvável de ocorrer durante a vida útil do processo e/ou instalação.
2	Remota	Esperado ocorrer de uma a duas vezes durante a vida útil do processo e/ou instalação
3	Improvável	Esperado ocorrer de uma a duas vezes em cinco anos.
4	Provável	Esperado ocorrer até uma vez por ano.
5	Frequente	Esperado ocorrer várias vezes por ano.

Fonte: Elaborada por Capelo Neto, Brito e Viana (2014), com fundamentação em Aguiar (2009).

Os cenários de acidente também devem ser classificados em categorias de gravidade, as quais fornecem uma indicação qualitativa da severidade das consequências esperada para cada um dos cenários identificados. A Tabela 2.5 mostra as categorias de gravidade que são utilizadas atualmente para a efetivação de uma APP, visando a sua aplicação em um sistema hídrico.

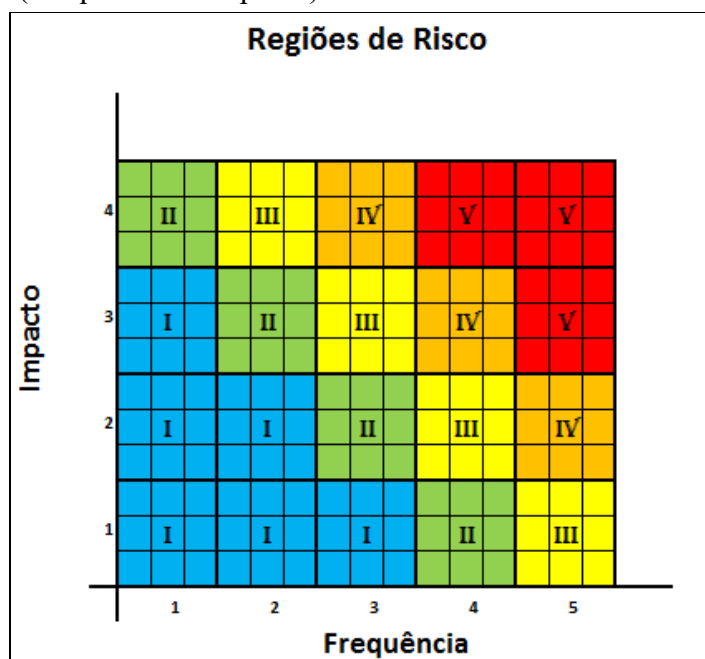
Tabela 2.5 – Categorias de severidade dos perigos identificados

Tabela de Gravidade		
Categoria	Denominação	Descrição
1	Desprezível	Sem danos, ou danos insignificantes ao abastecimento.
		Sem danos, ou danos insignificantes aos equipamentos, propriedades e meio ambiente.
2	Marginal	Danos leves ao abastecimento, com potencial de afetar o abastecimento, mas é facilmente reversível.
		Danos leves aos equipamentos, propriedades (danos materiais são controláveis e/ou de baixo custo de reparo) e ao meio ambiente.
3	Crítica	Danos severos ao abastecimento, levando à sua interrupção, local ou generalizada, por um período inferior a 6 horas.
		Danos severos aos equipamentos, propriedades e/ou meio ambiente.
		Exige intervenção imediata para evitar desdobramento em catástrofe.
4	Catastrófica	Danos gravíssimos ao abastecimento, levando à sua interrupção, local ou generalizada, por período superior a 6 horas.
		Danos irreparáveis aos equipamentos, às propriedades e/ou ao meio ambiente (reparação lenta ou impossível).

Fonte: Elaborada por Capelo Neto, Brito e Viana (2014), com fundamentação em Aguiar (2009).

Para estabelecer os níveis de risco, utiliza-se atualmente uma matriz, ilustrada na Tabela 2.6, que relaciona a frequência e a gravidade dos eventos indesejáveis.

Tabela 2.6 – Matriz de Classificação de Riscos (Frequência × Impacto)



Fonte: Elaborada por Capelo Neto, Brito e Viana (2014), com fundamentação em Aguiar (2009).

As categorias de risco, considerando se tratar de um sistema hídrico, estão listadas na Tabela 2.7.

Tabela 2.7 – Legenda da Matriz de Classificação de Riscos (Frequência × Impacto)

Definição de Nível de Risco		
Categoria	Denominação	Descrição
I	Desprezível	Poderá ser desconsiderado como emergencial, levando à possibilidade de maior tempo para reversão do problema.
II	Menor	Não afeta significativamente o abastecimento ou leva apenas a uma diminuição da vazão.
III	Moderado	Pode afetar o abastecimento, mas é facilmente reversível.
IV	Sério	Interrupção do abastecimento por um período inferior a 6 horas; contaminação física, química ou biológica reversível com o tratamento.
V	Crítico	Interrupção do abastecimento durante período de seis ou mais horas; contaminação física, química ou biológica após o tratamento da água do tratamento sem possibilidade de remoção.

Fonte: Elaborada por Capelo Neto, Brito e Viana (2014), com fundamentação em Aguiar (2009).

Por fim, é então realizada a análise dos resultados obtidos, onde são listadas as recomendações referentes às medidas preventivas e/ou mitigadoras, pela equipe responsável pela elaboração da APP.

2.6 Sistemas fuzzy

O termo *fuzzy* significa difuso, nebuloso ou impreciso, e se refere ao fato de, em muitos casos, não serem completamente conhecidos os sistemas que estão sendo analisados. De acordo com Kaufmann e Gupta (1991), referido termo foi introduzido por Zadeh (1965) em seu famoso artigo intitulado Fuzzy Sets. Era assim concebida a teoria dos conjuntos fuzzy, como denominam alguns autores como Gomide e Gudwin (1994), Tanscheit (2003), Simões e Shaw (2007) e Sales (2014), ou teoria dos conjuntos difusos, como preferem outros autores como Vieira (2005) e Posselt (2011).

2.6.1 Lógica fuzzy

A lógica fuzzy é a lógica baseada na teoria dos conjuntos fuzzy. Ela difere dos sistemas lógicos tradicionais nas suas características e nos seus detalhes. Nesta lógica, o raciocínio exato corresponde a um caso limite do raciocínio aproximado, sendo interpretado como um processo de composição de relações nebulosas. (GOMIDE; GUDWIN, 1994).

De acordo com Gomide, Gudwin e Tanscheit (1995, p. 1):

A Lógica Fuzzy (Nebulosa) é a lógica que suporta os modos de raciocínio que são aproximados ao invés de exatos. Modelagem e controle fuzzy de sistemas são técnicas para o tratamento de informações qualitativas de uma forma rigorosa. Derivada do conceito de conjuntos fuzzy, a lógica fuzzy constitui a base para o desenvolvimento de métodos e algoritmos de modelagem e controle de processos, permitindo a redução da complexidade de projeto e implementação, tornando-se a solução para problemas de controle até então intratáveis por técnicas clássicas.

Os seres humanos são capazes de lidar com processos bastante complexos fundamentados em informações imprecisas ou aproximadas, geralmente suscetíveis de serem expressas em termos linguísticos. A teoria dos conjuntos fuzzy e os conceitos da lógica fuzzy podem ser utilizados para traduzir, em termos matemáticos, as informações imprecisas expressas por um conjunto de regras linguísticas, permitindo que um algoritmo passível de ser implementado em computador possa ser construído. O resultado é um sistema de inferência baseado em regras, no qual a teoria dos conjuntos fuzzy e a lógica fuzzy fornecem o ferramental matemático para se lidar com as mesmas. (TANSCHHEIT, 2003).

A lógica fuzzy é também referida como lógica nebulosa e, em alguns casos, por teoria de possibilidades. Sua característica especial é a de representar uma forma inovadora de manuseio de informações imprecisas, de forma muito distinta da teoria de probabilidades. A lógica fuzzy provê um método de traduzir expressões verbais, vagas, imprecisas e qualitativas, comuns na comunicação humana, em valores numéricos. Isso abre as portas para se converter a experiência humana em uma forma compreensível pelos computadores. (SIMÕES; SHAW, 2007).

A lógica fuzzy combina a imprecisão associada a eventos naturais com o poder computacional para produzir sistemas de raciocínio muito inteligentes, robustos e flexíveis. A teoria dos conjuntos fuzzy descreve a mecânica de como conjuntos fuzzy são organizados e quais operações lhe são permitidas. Próprio da lógica fuzzy, é o processo de fazer inferências lógicas a partir de uma coleção de conjuntos fuzzy. É de grande utilidade em muitas aplicações de controle de processos e de engenharia, onde haveria uma maior complexidade no emprego de outras tecnologias. (COX, 1995).

2.6.2 Teoria dos conjuntos fuzzy

São apresentados, no texto a seguir, alguns conceitos básicos relativos à teoria dos conjuntos fuzzy, com a finalidade de possibilitar um melhor entendimento do funcionamento de um sistema de inferência fuzzy.

2.6.2.1 Fundamentos

Na teoria clássica dos conjuntos, o conceito de pertinência de um elemento a um conjunto fica bem definido. Dado um conjunto A em um universo X , os elementos deste universo simplesmente pertencem ou não pertencem àquele conjunto. Na álgebra booleana este conceito é usualmente chamado de função característica e pode ser expresso como

$$f_A(x): X \rightarrow \{0,1\} \quad (2.1)$$

onde

$$f_A(x) = \begin{cases} 1 \Leftrightarrow x \in A \\ 0 \Leftrightarrow x \notin A \end{cases} \quad (2.2)$$

Zadeh (1965) propôs uma caracterização mais ampla, generalizando a função característica de modo que ela pudesse assumir um número infinito de valores no intervalo $[0,1]$. Um conjunto fuzzy A em um universo X é definido por uma função de pertinência

$$\mu_A(x): X \rightarrow [0,1] \quad (2.3)$$

e representado por um conjunto de pares ordenados

$$A = \{[x, \mu_A(x)] / x \in X; \mu_A(x) \in [0,1]\} \quad (2.4)$$

onde $\mu_A(x)$ indica o quanto x é compatível com o conjunto A . Um determinado elemento pode pertencer a mais de um conjunto fuzzy, com diferentes graus de pertinência.

Os conjuntos fuzzy podem ser definidos em universos contínuos ou discretos. Se o universo X for discreto e finito, o conjunto fuzzy A é normalmente representado por um vetor contendo os graus de pertinência dos elementos correspondentes a X no conjunto A , ou ainda por meio da notação seguinte, que não deve ser confundida com a soma algébrica:

$$\sum_{i=1}^n \mu_A(x_i) / x_i \quad (2.5)$$

Se o universo X for contínuo, emprega-se muitas vezes a notação que se segue, onde o símbolo de integral deve ser interpretado da mesma forma que o da soma no caso de um universo discreto:

$$\int_x \mu_A(x) / x \quad (2.6)$$

2.6.2.2 Funções de pertinência

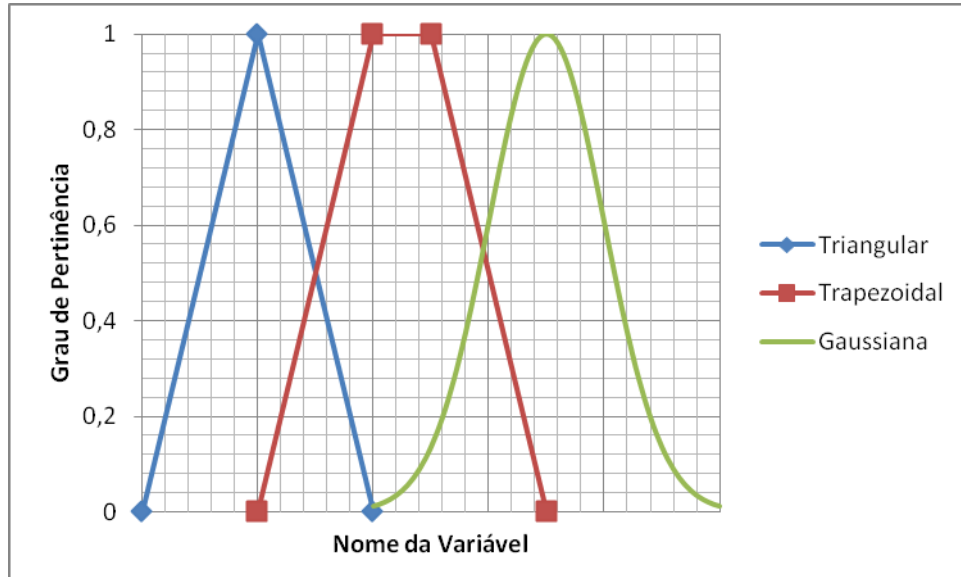
Funções de pertinência representam os aspectos fundamentais de todas as ações teóricas e práticas de sistemas fuzzy. Uma função de pertinência é uma função numérica ou tabulada que atribui valores de pertinência fuzzy para valores discretos de uma variável, em seu universo de discurso. Por sua vez, o universo de discurso de uma variável representa o intervalo numérico de todos os possíveis valores reais que uma variável específica pode assumir. (SIMÕES; SHAW, 2007).

Os conjuntos fuzzy são representados por possibilidades de distribuição e podem sobrepor-se uns aos outros. Uma abordagem eficiente para a ordenação dos mesmos é por meio da utilização de funções de pertinência. Esta forma de classificação é um procedimento importante para a tomada de decisões em um ambiente difuso. (Kaur, 2013).

Tanscheit (2003, p. 5) afirma que “as funções de pertinência podem ter diferentes formas, dependendo do conceito que se deseja representar e do contexto em que serão utilizadas.” Esclarece ainda que, apesar das funções de pertinência poderem ser definidas a partir da experiência e da perspectiva do usuário, é mais comum serem utilizadas funções de pertinência padrão, como as de forma triangular, trapezoidal e gaussiana (FIGURA 2.3). Em

aplicações práticas, as formas escolhidas inicialmente podem sofrer ajustes em função dos resultados observados.

Figura 2.3 – Exemplos de funções de pertinência de forma triangular, trapezoidal e gaussiana



Fonte: Elaborada pelo autor.

2.6.2.3 Variáveis linguísticas

Uma variável linguística é uma variável cujos valores são nomes de conjuntos fuzzy, ou seja, são descritos por meio de conjuntos fuzzy, representados por funções de pertinência. As variáveis linguísticas têm a função principal de fornecer uma maneira sistêmica para uma caracterização aproximada de fenômenos complexos ou mal definidos. (TANSCHKEIT, 2003).

Os valores de uma variável linguística podem ser sentenças, em uma linguagem especificada, construídas a partir de termos primários (*pequeno, médio, grande*), de conectivos lógicos (*e, ou*), de modificadores (*pouco, muito, levemente, extremamente*) e de delimitadores (como parênteses).

De acordo ainda com Tanscheit (2003), uma variável linguística é formalmente caracterizada por uma quintupla $[N, T(N), X, G, M]$, onde:

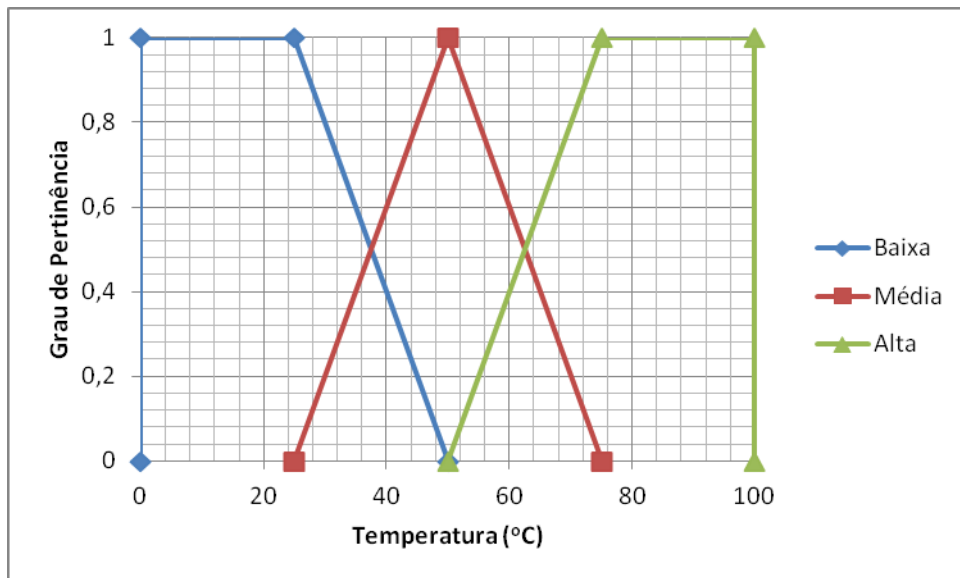
- N : nome da variável;
- $T(N)$: conjunto de termos de N , ou seja, o conjunto de nomes dos valores linguísticos de N ;

- c) X : universo de discurso;
- d) G : regra sintática para gerar os valores de N como uma composição de termos de $T(N)$, conectivos lógicos, modificadores e delimitadores; e
- e) M : regra semântica, para associar a cada valor gerado por G um conjunto fuzzy em X .

Para uma melhor compreensão das definições do parágrafo anterior, Tanscheit (2003) tomou como exemplo a temperatura de um determinado processo, mostrada na Figura 2.4, em que:

- a) N : *Temperatura*;
- b) $T(N)$: $\{baixa, média, alta\}$;
- c) X : $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ a $100\text{ }^{\circ}\text{C}$;
- d) G : temperatura *não baixa e não muito alta*, por exemplo; e
- e) M : associa o valor acima a um conjunto fuzzy cuja função de pertinência exprime o seu significado.

Figura 2.4 – Funções de pertinência para a variável temperatura



Fonte: Adaptada de Tanscheit (2003).

2.6.2.4 Operações envolvendo conjuntos fuzzy

Como a teoria dos conjuntos fuzzy é uma extensão da teoria clássica dos conjuntos, as principais operações entre os conjuntos fuzzy são também definidas com base

nas operações com os conjuntos tradicionais. As mais relevantes são apresentadas no texto que se segue.

Um conjunto fuzzy A em um universo X é vazio se e somente se a sua função de pertinência é igual a zero sobre todo o X :

$$A = \phi \Leftrightarrow \mu_A(x) = 0 \quad \forall x \in X \quad (2.7)$$

O complemento A' de um conjunto fuzzy A é geralmente dado pela expressão:

$$\mu_{A'}(x) = 1 - \mu_A(x) \quad \forall x \in X \quad (2.8)$$

Dois conjuntos fuzzy A e B são iguais se as suas funções de pertinência forem iguais sobre todo o universo X :

$$A = B \Leftrightarrow \mu_A(x) = \mu_B(x) \quad \forall x \in X \quad (2.9)$$

Um conjunto fuzzy A é um subconjunto de um conjunto fuzzy B se a sua função de pertinência for menor ou igual à de B sobre todo o X :

$$A \subset B \Leftrightarrow \mu_A(x) \leq \mu_B(x) \quad \forall x \in X \quad (2.10)$$

A interseção de dois conjuntos ordinários A e B , em um universo X , denotada por $A \cap B$, contém todos os elementos pertencentes a A e a B . A união dos mesmos conjuntos, cuja notação é $A \cup B$, contém todos os elementos que pertencem a A ou a B . Usando-se os operadores mínimo (*min* ou \wedge) e máximo (*max* ou \vee), as funções características dos conjuntos resultantes podem ser representadas, respectivamente, por:

$$f_{A \cap B}(x) = f_A(x) \wedge f_B(x) \quad \forall x \in X \quad (2.11)$$

$$f_{A \cup B}(x) = f_A(x) \vee f_B(x) \quad \forall x \in X \quad (2.12)$$

Para expressar a interseção e a união dos conjuntos fuzzy, Zadeh (1965) estendeu a descrição acima, utilizando os operadores mínimo e máximo, de forma que, respectivamente:

$$\mu_{A \cap B}(x) = \mu_A(x) \wedge \mu_B(x) \quad \forall x \in X \quad (2.13)$$

$$\mu_{A \cup B}(x) = \mu_A(x) \vee \mu_B(x) \quad \forall x \in X \quad (2.14)$$

Zadeh (1965) também sugeriu o produto algébrico para a interseção fuzzy e a soma algébrica para a união fuzzy, que podem, respectivamente, ser expressos por:

$$\mu_{A \cap B}(x) = \mu_A(x) \cdot \mu_B(x) \quad \forall x \in X \quad (2.15)$$

$$\mu_{A \cup B}(x) = \mu_A(x) + \mu_B(x) - \mu_A(x) \cdot \mu_B(x) \quad \forall x \in X \quad (2.16)$$

De acordo com Tanscheit (2003), posteriormente, com o objetivo de generalização, foram definidos operadores de base axiomática, baseados nos conceitos de norma triangular (norma-t) e co-norma triangular (co-norma-t ou norma-s).

Uma norma-t (*) é uma operação binária $*$: $[0,1] \times [0,1] \rightarrow [0,1]$ tal que, $\forall x, y, z, w \in [0,1]$, satisfaz às seguintes propriedades:

- a) comutatividade: $x * y = y * x$;
- b) associatividade: $(x * y) * z = x * (y * z)$;
- c) monotonicidade: $x * w \leq y * z \Leftarrow x \leq y, w \leq z$; e
- d) condições de contorno: $x * 0 = 0$; $x * 1 = x$.

Uma norma-s (\oplus) é uma operação binária \oplus : $[0,1] \times [0,1] \rightarrow [0,1]$ tal que, $\forall x, y, z, w \in [0,1]$, tem as seguintes propriedades são satisfeitas:

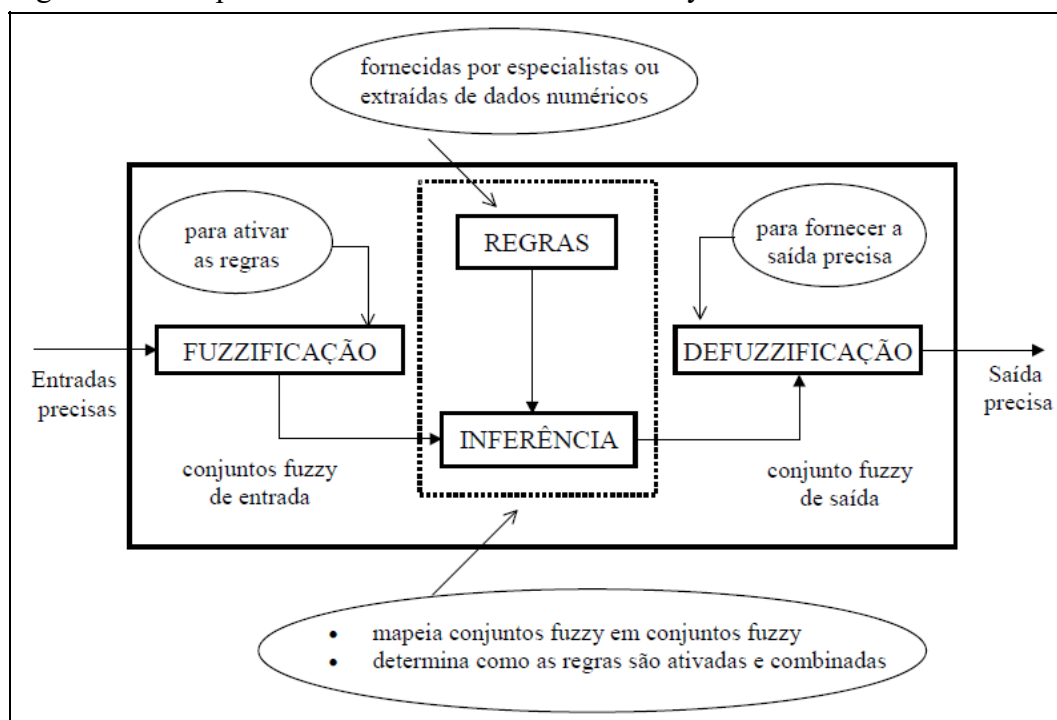
- a) comutatividade: $x \oplus y = y \oplus x$;
- b) associatividade: $(x \oplus y) \oplus z = x \oplus (y \oplus z)$;
- c) monotonicidade: $x \oplus w \leq y \oplus z \Leftarrow x \leq y, w \leq z$; e
- d) condições de contorno: $x \oplus 0 = x$; $x \oplus 1 = 1$.

A bibliografia registra inúmeras normas-t e normas-s, mas em aplicações práticas, principalmente em engenharia, têm sido utilizados preponderantemente os operadores mínimo e produto algébrico para a interseção e o operador máximo para a união. (TANSCHHEIT, 2003).

2.6.3 Sistemas de inferência fuzzy

Em um sistema de inferência fuzzy (FIGURA 2.5), os valores discretos das variáveis de entrada, como conjunto de dados, são resultantes de medições ou de observações, que é o caso da grande maioria das aplicações práticas.

Figura 2.5 – Etapas de um sistema de inferência fuzzy



Fonte: Tanscheit (2003).

A primeira etapa do processo é a fuzzificação, onde é realizado um mapeamento do domínio de números reais, em geral valores discretos, para o domínio fuzzy. A fuzzificação também representa que há atribuição de valores linguísticos, descrições vagas ou qualitativas, definidas por funções de pertinência às variáveis de entrada. (SIMÕES; SHAW, 2007).

Segundo Sales (2014), a fuzzificação é a operação que transforma um conjunto clássico em um conjunto fuzzy para expressar medidas de incerteza. É similar ao que se faz em processos de tomada de decisão, onde conceitos linguísticos são traduzidos em operação matemáticas.

As regras, que definem a estratégia de um sistema de inferência fuzzy, geralmente são fornecidas por especialistas, em forma de sentenças linguísticas, e se constituem em um

aspecto fundamental no seu desempenho. É também possível a utilização de métodos para a extração de regras de dados numéricos. (TANSCHHEIT, 2003).

Em um sistema de inferência fuzzy, cada regra fuzzy é representada por uma relação fuzzy. O comportamento do sistema é caracterizado pelo conjunto das relações fuzzy associadas às regras. (GOMIDE; GUDWIN, 1995).

A etapa seguinte é o processo de inferência, onde ocorrem as operações propriamente ditas com os conjuntos fuzzy (mapeamento de conjuntos fuzzy em conjuntos fuzzy) e a determinação de como as regras são ativadas e combinadas. Os conjuntos fuzzy de entrada, relativos aos antecedentes das regras, e o de saída, referente ao consequente, podem ser definidos previamente ou gerados automaticamente a partir dos dados. (TANSCHHEIT, 2003).

Uma vez obtido o conjunto fuzzy de saída por meio do processo de inferência, a etapa que se segue é a defuzzificação, onde é efetuada uma interpretação dessa informação. A defuzzificação é necessária porque, em aplicações práticas, geralmente são requeridas saídas precisas. (TANSCHHEIT, 2003).

De acordo com Simões e Shaw (2007, p. 52), “na defuzzificação, o valor da variável linguística de saída inferida pelas regras fuzzy será traduzido num valor discreto.” Complementam ainda que o objetivo é a obtenção de um único valor real que melhor represente a distribuição de possibilidades. A defuzzificação é uma transformação inversa à fuzzificação, que traduz a saída do domínio fuzzy para o domínio discreto.

Segundo Posselt (2011, p. 32), “a defuzzificação é o processo de conversão de conjuntos difusos em uma saída discreta. Essa tarefa é necessária pelo fato de muitos equipamentos exigirem um valor discreto.”

Em um sistema de inferência fuzzy, dependendo dos algoritmos escolhidos, a defuzzificação é a etapa que demanda o maior tempo de processamento. (WEBER; KLEIN, 2003).

Existem vários métodos de defuzzificação na literatura. Segundo Simões e Shaw (2007), são muito utilizados os métodos do centroide, do centro dos máximos e da média dos máximos, que são descritos no que se segue.

O método do centroide, também frequentemente chamado de método do centro de gravidade, calcula o centro geométrico da área composta que representa o termo de saída fuzzy e é representado pela união de todas as contribuições de regras.

No método do centro dos máximos, os picos das funções de pertinência representados no universo de discurso da variável de saída são utilizados, enquanto são ignoradas as áreas destas funções. As contribuições múltiplas de regras, entretanto, são consideradas neste método. A saída discreta é calculada como uma média ponderada dos máximos, cujos pesos são os resultados da inferência.

No método da média dos máximos, a saída discreta é obtida tomando-se a média entre todos os elementos no universo de discurso que correspondem aos valores máximos da função de pertinência do consequente.

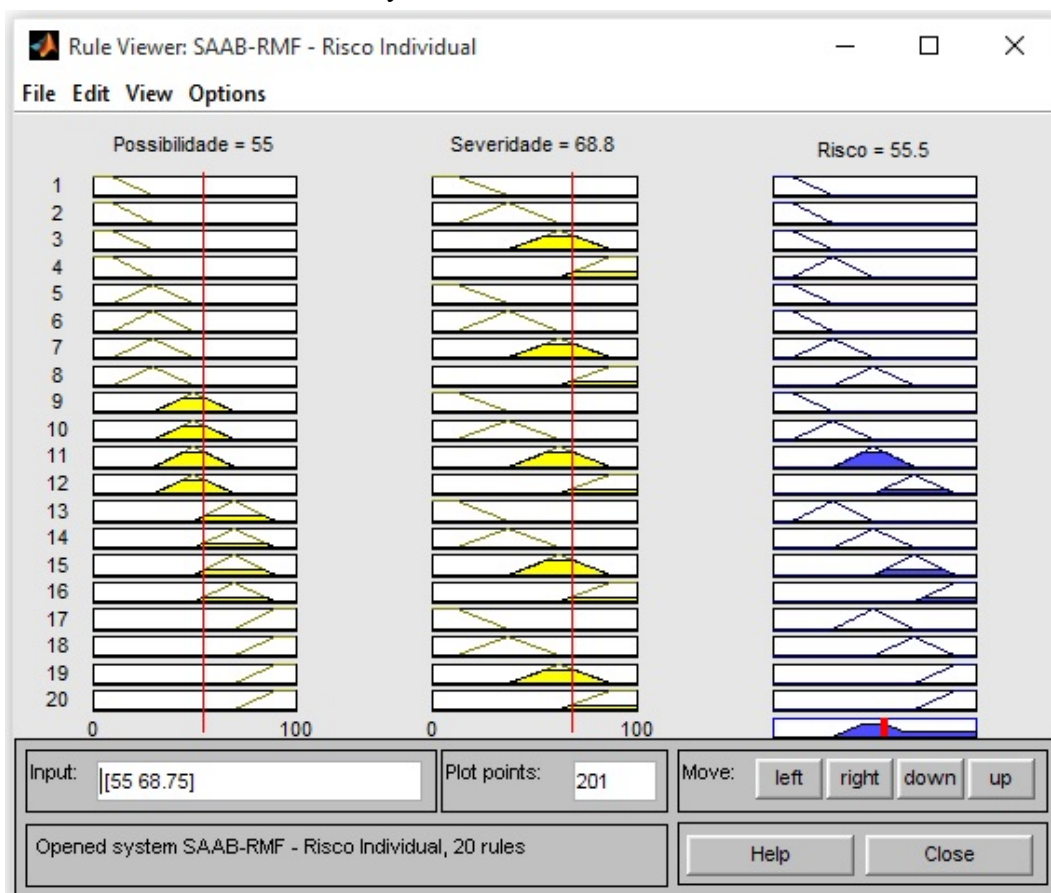
Simões e Shaw (2007) salientam ainda que, entre os três métodos supracitados, os dois primeiros são contínuos, enquanto o terceiro é descontínuo. Comentam também que funções de pertinência complexas não apresentam melhores resultados para os valores de saída. Sugerem ainda que, na prática, sempre que possível sejam utilizadas funções triangulares, afinal, os métodos de defuzzificação do centro dos máximos e da média dos máximos usam apenas os máximos das funções de pertinência.

Também é bastante empregado, no processo da defuzzificação, o método do bissetor, que divide a área sob a curva da função de pertinência, composta pela união de todas as contribuições de regras, em duas partes iguais.

Para que se possa melhor visualizar o funcionamento de um sistema de inferência fuzzy, apresenta-se, na Figura 2.6, a tela gráfica obtida na biblioteca Fuzzy Logic Toolbox, do programa Matlab[®], correspondente a um dos exemplos processados no Capítulo 5 (Resultados e Discussão).

No caso em questão, os antecedentes são as variáveis linguísticas *Possibilidade de Ocorrência* e *Severidade das Consequências*, cujos valores numéricos discretos de entrada são, respectivamente, $PO = 55,00$ e $SC = 68,75$. O valor real de saída da variável linguística *Risco*, após a defuzzificação, é $R = 55,45$.

Figura 2.6 – Saída gráfica do programa Matlab[®]: resultado do processamento de um sistema de inferência fuzzy



Fonte: Elaborada pelo autor.

Zadeh (1975) também introduziu o conceito de conjuntos fuzzy tipo-2. De acordo com Rizol, Mesquita e Saotome (2011), a lógica fuzzy tipo-1, ou lógica nebulosa, considerada no presente trabalho, é capaz de trabalhar com a incerteza relacionada ao significado das palavras utilizando funções de pertinência precisas. Uma vez que as funções de pertinência tipo-1 são definidas, toda a incerteza relacionada com o significado das palavras desaparece, porque referidas funções são totalmente precisas.

Rizol, Mesquita e Saotome (2011) esclarecem ainda que a lógica fuzzy tipo-2, por outro lado, modela a incerteza oriunda do significado das palavras. Embora a função de pertinência tipo-2 também seja totalmente precisa, esta é composta por uma “mancha” de incerteza, que permite que esta incerteza seja trabalhada pelo sistema de inferência fuzzy tipo-2. Se toda a incerteza do sistema desaparecer, o sistema de inferência fuzzy tipo-2 é reduzido para o sistema de inferência fuzzy tipo-1.

Modelos lineares e não-lineares são comumente utilizados para predição sazonal de precipitação, sendo que alguns deles são baseados em Redes Neurais Artificiais, demonstrando grande potencial, como mostrado na literatura. Castro *et al.* (2013) apresentaram um modelo de previsão sazonal de chuvas baseado em uma técnica neurofuzzy denominada Modelo Neo-Fuzzy Neuron. Aplicaram referido modelo em um estudo de oito regiões homogêneas do Estado do Ceará (Cariri, Ibiapaba, Jaguaribana, Maciço de Baturité, Litoral de Fortaleza, Litoral Norte, Litoral do Pecém e Sertão Central dos Inhamuns). Os resultados experimentais demonstraram a eficácia do método proposto nas previsões referentes ao período de 2002 a 2011.

3 ÁREA DE APLICAÇÃO DO ESTUDO

A área de aplicação da metodologia proposta de avaliação integrada de riscos nas obras de armazenamento de água (reservatórios), nas obras de transferência hídrica (canais e túneis) e nas estações elevatórias, corresponde à região do Estado do Ceará que contém o sistema interligado que abastece ou que eventualmente pode abastecer a Região Metropolitana de Fortaleza (RMF). A região a ser estudada corresponde às bacias hidrográficas do Médio Jaguaribe, Baixo Jaguaribe, Banabuiú e Metropolitana, cujas localizações podem ser visualizadas no mapa das bacias hidrográficas do Estado do Ceará (FIGURA 3.1) elaborado pelo Instituto de Pesquisa e Estratégia Econômica do Ceará (IPECE, 2012).

3.1 Sistema hídrico analisado

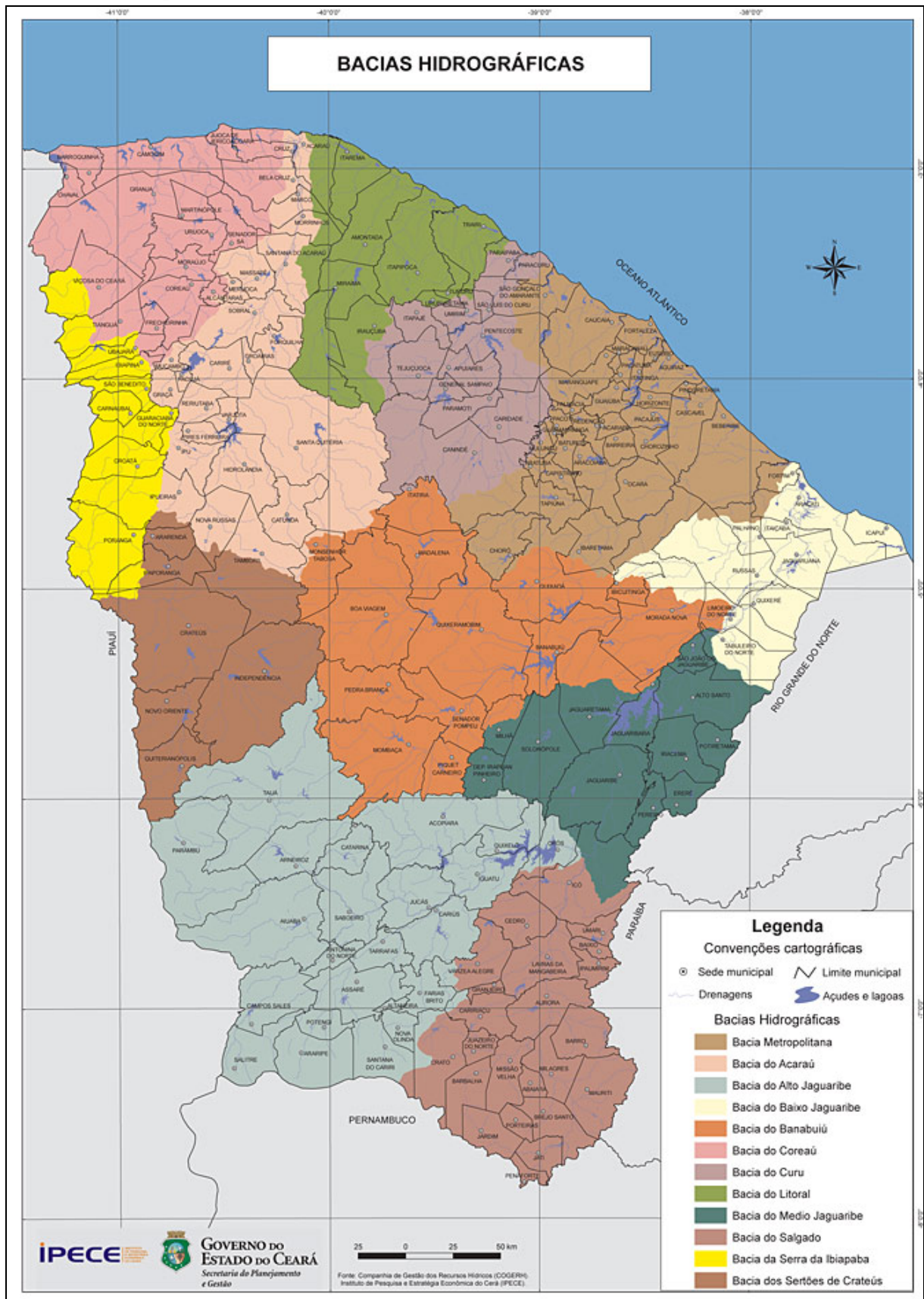
O sistema hídrico analisado é o Sistema de Aporte de Água Bruta para a Região Metropolitana de Fortaleza (SAAB/RMF), que foi subdividido nos onze subsistemas abaixo relacionados:

- a) Subsistema 1 – Açude Castanhão;
- b) Subsistema 2 – Estação Elevatória do Açude Castanhão;
- c) Subsistema 3 – Canal da Integração;
- d) Subsistema 4 – Açude Curral Velho;
- e) Subsistema 5 – Canal do Trabalhador;
- f) Subsistema 6 – Açude Pacajus;
- g) Subsistema 7 – Estações Elevatórias EB1 e EB2;
- h) Subsistema 8 – Canal do Ererê;
- i) Subsistema 9 – Açudes Pacoti e Riachão;
- j) Subsistema 10 – Sistema de Túneis; e
- k) Subsistema 11 – Açude Gavião.

Na Figura 3.2 é apresentado um mapa da área de aplicação do estudo, onde se destacam os reservatórios e os canais citados no parágrafo anterior.

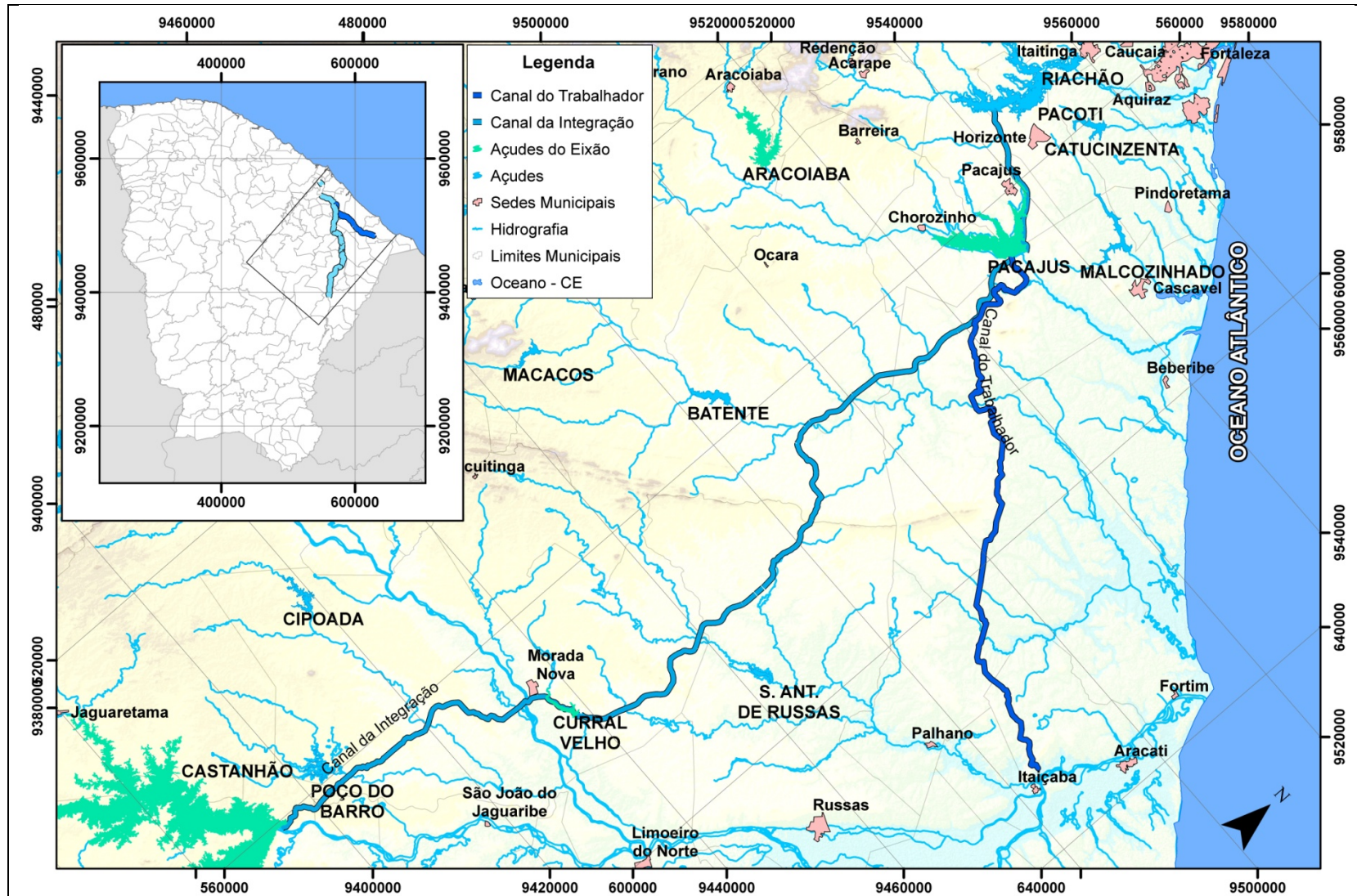
O sistema hídrico responsável pelo abastecimento de água bruta para a RMF é interligado, principalmente, pelo Canal da Integração, que é também popularmente conhecido como Eixão das Águas. Para uma melhor visualização do seu funcionamento, o mesmo encontra-se representado no diagrama unifilar da Figura 3.3.

Figura 3.1 – Mapa das bacias hidrográficas do Estado do Ceará



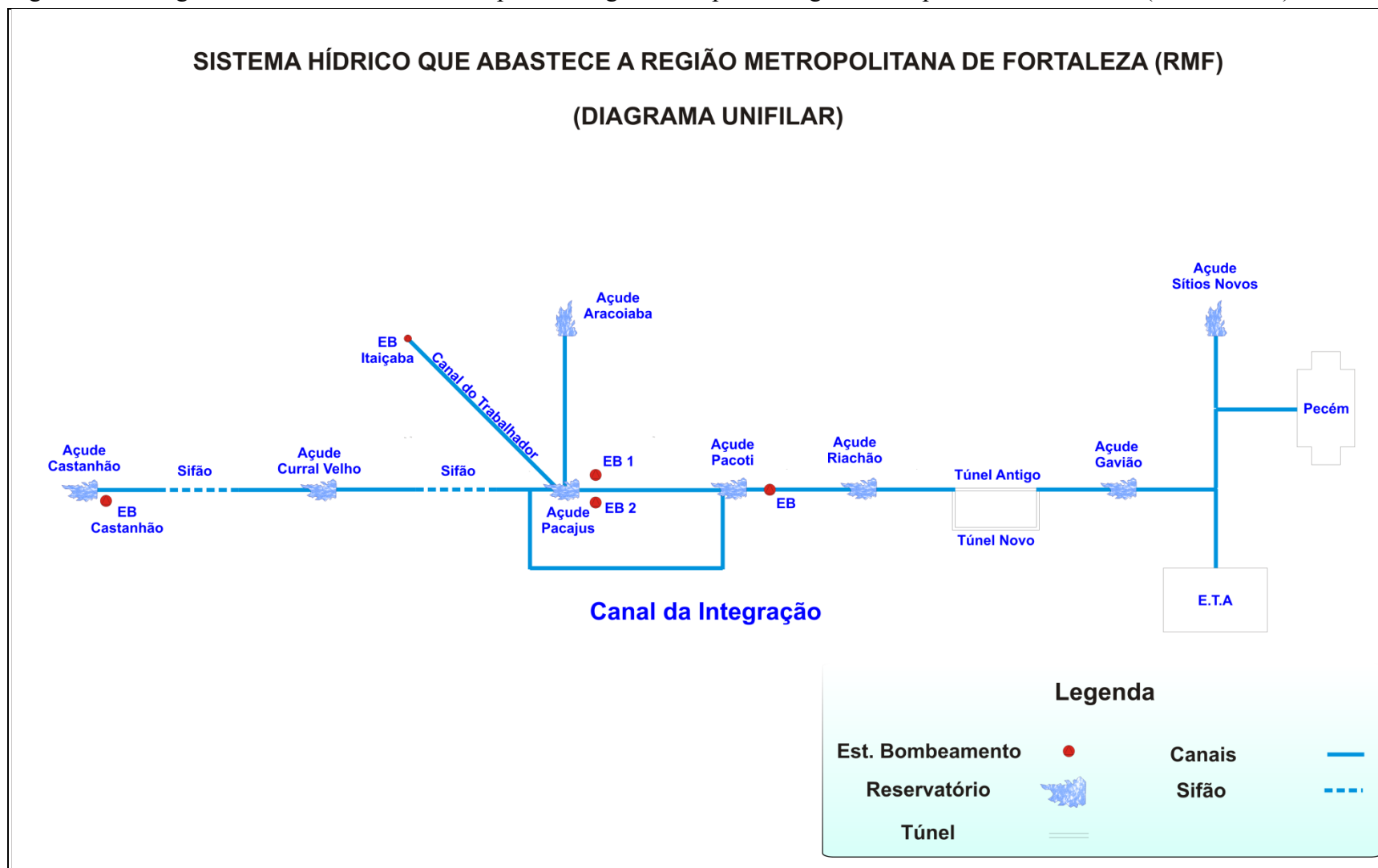
Fonte: IPECE (2012).

Figura 3.2 – Mapa da área de aplicação do estudo onde se destacam os reservatórios e os canais



Fonte: Elaborada no Projeto UFC/COGERH (2012).

Figura 3.3 – Diagrama unifilar do Sistema de Aporte de Água Bruta para a Região Metropolitana de Fortaleza (SAAB/RMF)



Fonte: Elaborada no Projeto UFC/COGERH (2012).

3.2 Dados utilizados na avaliação dos riscos

Para cada um dos subsistemas em que foi dividido o SAAB/RMF, foram definidos tipos de riscos específicos, de acordo com o levantamento de dados realizado por Capelo Neto, Brito e Viana (2014) junto à Companhia de Gestão dos Recursos Hídricos (COGERH), e que estão discriminados no texto que se segue. Ao todo, foram avaliados 58 tipos de riscos, não distintos entre si.

Os tipos de risco considerados no Subsistema 1, Açude Castanhão, são:

- a) Falha estrutural;
- b) Contaminação da água (física, química ou biologicamente);
- c) Floração de cianobactérias; e
- d) Sabotagem/Vandalismo.

Na Estação Elevatória do Açude Castanhão e nas Estações Elevatórias EB1 e EB2, respectivamente, Subsistema 2 e Subsistema 7, são os seguintes os tipos de risco:

- a) Falta de energia;
- b) Queima de uma bomba;
- c) Queima/Falha em transformador;
- d) Queima de cabos;
- e) Pontos quentes; e
- f) Sabotagem/Vandalismo.

No Canal da Integração (Subsistema 3) os tipos de risco levados em conta são:

- a) Falha na ativação das comportas;
- b) Falha em sifão invertido;
- c) Explosões nas pedreiras;
- d) Obstrução por acidentes automobilísticos;
- e) Retirada ilegal de água;
- f) Derramamento de carga contaminante;
- g) Contaminação da água pelo lixão;
- h) Crescimento de macrófitas; e
- i) Sabotagem/Vandalismo.

Os tipos de risco considerados no Açude Curral Velho, no Açude Pacajus, nos Açudes Pacoti e Riachão e no Açude Gavião, de maneira recíproca, subsistemas 4, 6, 9 e 11 são:

- a) Baixo nível de reservação;
- b) Contaminação da água (física, química ou biologicamente);
- c) Contaminação por *Cryptosporidium* (gado);
- d) Floração de cianobactérias; e
- e) Sabotagem/Vandalismo.

Por sua vez, no Canal do Trabalhador, correspondente ao Subsistema 5, os tipos de risco são:

- a) Falha na ativação das comportas;
- b) Obstrução por acidentes automobilísticos;
- c) Retirada ilegal de água;
- d) Derramamento de carga contaminante;
- e) Crescimento de macrófitas; e
- f) Sabotagem/Vandalismo.

Já no Canal do Ererê, Subsistema 8, são os seguintes os tipos de risco:

- a) Retirada ilegal de água;
- b) Lançamentos de efluentes;
- c) Derramamento de carga contaminante; e
- d) Sabotagem/Vandalismo.

Finalmente no Subsistema 10, Sistema de Túneis, os tipos de risco são:

- a) Acidentes geotécnicos;
- b) Explosões nas pedreiras; e
- c) Sabotagem/Vandalismo.

Capelo Neto, Brito e Viana (2014) ressaltam ainda que os níveis de riscos foram apenas preliminarmente obtidos pelas definições de Aguiar (2009). Em reuniões realizadas com os colaboradores da COGERH, alguns eventos apresentavam níveis de risco diferentes dos obtidos, sendo então realizadas calibrações nos valores dos mesmos.

3.3 Características do trabalho que possibilitou os dados utilizados

É importante destacar que o trabalho desenvolvido por Capelo Neto, Brito e Viana (2014) foi motivado por uma demanda do Ministério do Esporte, através do Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), por ocasião do evento Copa do Mundo de Futebol, patrocinado pela Federação Internacional de Futebol (FIFA), que foi realizado nos meses de junho e julho de 2014 no Brasil.

Com a grande quantidade de turistas, servidores e atletas que visitariam determinadas cidades durante o evento, o Ministério do Esporte preocupou-se em assegurar o bom funcionamento de todos os setores envolvidos e solicitados durante este momento de maior movimentação turística. Para isso foi necessária a criação de um projeto que desenvolvesse estudos e análises das áreas demandadas, bem como a criação de medidas para prover mais segurança dos sistemas urbanos, como por exemplo, a Saúde Pública.

Para assegurar o pleno funcionamento do sistema de distribuição de água para a RMF, Capelo Neto, Brito e Viana (2014) elaboraram um Plano de Contingência e Emergência com a finalidade de prever impactos potenciais em casos emergenciais e, a partir daí, antever as ações a serem aplicadas, evitando paralisações prolongadas que pudessem gerar maiores prejuízos, como perdas de receita, impacto na saúde da população e na economia local. O Plano foi desenvolvido agrupando todas as áreas sujeitas a sinistros, sejam eles por causas antrópicas, ambientais ou de equipamentos.

O estudo supracitado teve por finalidade identificar, analisar e avaliar os eventuais riscos impostos à comunidade atendida pelo abastecimento de água na RMF, decorrentes das atividades de operação do SAAB, das estações de tratamento de água (ETA Gavião e ETA Oeste) e do macro sistema de distribuição de água tratada.

Os dados relativos ao SAAB/RMF são os utilizados no presente trabalho.

3.4 Descrição do sistema de aporte de água bruta para a Região Metropolitana de Fortaleza (SAAB/RMF)

Nos parágrafos que se seguem, dentro desta Seção 3.3, o SAAB/RMF é descrito de forma sucinta, de acordo com informações obtidas, principalmente, no trabalho de Capelo Neto, Brito e Viana (2014).

O sistema de abastecimento de água para a RMF é baseado na retirada e no tratamento de água bruta do Açude Gavião, localizado no município de Itaitinga. Este reservatório conta com um sistema de aporte proveniente do Açude Riachão que, por sua vez, recebe água do Açude Pacoti. Este sistema de três açudes (Pacoti/Riachão/Gavião) foi a principal reserva hídrica para a RMF até o ano de 1993. Desde o início da década de 1990, entretanto, este sistema já demonstrava sinais de saturação em virtude, sobretudo, do aumento da demanda da RMF e dos recorrentes períodos de seca.

Após três anos de períodos de estiagem consecutivos, o colapso de abastecimento de água para a RMF era iminente no ano de 1993. Segundo os técnicos responsáveis pelo sistema, só havia água por um período de noventa dias. Estudos emergenciais foram solicitados pelas autoridades competentes, sendo então decidida a construção imediata de um canal que transpusesse água da Bacia do Baixo Jaguaribe, sendo também construído o Açude Pacajus para o represamento das águas vindas do Rio Jaguaribe e do Rio Choró. Em um prazo de cinco meses, aproximadamente, foi concluído o Canal do Trabalhador, com 113 *km* de extensão, que evitou o colapso de abastecimento naquele ano.

Para assegurar a reserva hídrica do sistema de abastecimento, foi também construído o Açude Aracoiaba, cujas obras foram finalizadas em meados de 2002, que auxilia o Açude Pacajus. Ambos estão localizados na Sub-Bacia do Rio Choró e ajudam a manter o nível do Açude Gavião.

Mesmo com a conclusão do Açude Aracoiaba, o abastecimento público da RMF era ainda vulnerável em virtude dos longos períodos de estiagem na região do semiárido, assim como devido ao crescimento populacional e industrial que aumentavam consideravelmente a demanda por água. O Governo do Estado do Ceará iniciou então, em 2010, a construção do Canal da Integração, também conhecido como Eixão das Águas, com o propósito de garantir as reservas hídricas e, conseqüentemente, a adução de água para a RMF.

O Canal da Integração foi construído com a propósito de transpor as águas das bacias do Alto Jaguaribe e do Médio Jaguaribe até o Açude Gavião, por uma extensão de 201,1 *km*. Possui, entretanto, uma extensão total de 256,2 *km*, até o Complexo Industrial e Portuário do Pecém. É composto por uma estação de bombeamento, 166,0 *km* de canais, adutoras e 1,0 *km* de túneis. É dividido nos cinco seguintes trechos:

- a) Trecho I – do Açude Castanhão ao Açude Curral Velho (54,7 km);
- b) Trecho II – do Açude Curral Velho à Serra do Félix (46,2 km);
- c) Trecho III – da Serra do Félix ao Açude Pacajus (66,3 km);
- d) Trecho IV – do Açude Pacajus ao Açude Gavião (33,9 km); e
- e) Trecho V – do Açude Gavião ao Porto do Pecém (55,1 km).

O Trecho V, que não objetiva o abastecimento da RMF, está fora do escopo deste estudo.

O SAAB/RMF conta atualmente, por conseguinte, com os três subsistemas, que podem ser visualizados nas Figuras 3.2 e 3.3, abaixo discriminados:

- a) Canal da Integração (Eixão das Águas);
- b) Canal do Trabalhador; e
- c) Subsistema Aracoiaba/Pacajus.

4 METODOLOGIA

Apresenta-se, no texto que se segue, a proposta metodológica do trabalho em questão com um roteiro das etapas a serem realizadas para a sua utilização (fluxo da estratégia metodológica), como também a construção do sistema de inferência fuzzy sugerido e o desenvolvimento do programa Risco-Fuzzy.

4.1 Proposta metodológica

Os sistemas hídricos e hidráulicos são domínios de aplicação potencial dos conceitos de análise e gestão de riscos, tendo em conta que os objetivos fixados podem sofrer desvios, no ambiente ou na sustentabilidade econômica, resultantes de incertezas, eventos extremos, erros ou outros acontecimentos. (ALMEIDA, 2004).

A pesquisa bibliográfica realizada permitiu, portanto, o conhecimento dos conceitos e das etapas relativos à análise e gestão de riscos inerentes a alguns tipos de sistemas hídricos.

A proposta metodológica ora apresentada é a formulação de um processo de avaliação integrada de riscos no qual o sistema hídrico estudado pode ser dividido em vários níveis hierárquicos como, por exemplo: sistema global, subsistemas, unidades de risco e tipos de risco. O propósito é a determinação dos diversos riscos envolvidos em referido sistema.

Na avaliação dos riscos de determinado sistema hídrico, entretanto, nem sempre os dados a serem utilizados são qualitativos. Muitas vezes as informações disponíveis são quantitativas, ou seja, possuem diferentes níveis de precisão. Nestes casos, referidas informações podem ser expressas por meio de variáveis linguísticas e por um conjunto de regras linguísticas.

Por ser bastante adequada à efetivação de referido tipo de análise, é também proposta a construção de um sistema de inferência fuzzy. Para tanto, são sugeridas funções de pertinência de entrada para as variáveis linguísticas de entrada *Possibilidade de Ocorrência* e *Severidade das Consequências* e para a variável linguística de saída *Risco*. Também são definidas escalas de valores para as mesmas.

Para que o sistema estudado pudesse ser subdividido em diversos níveis, houve a necessidade do desenvolvimento de um programa para computador, que foi intitulado de

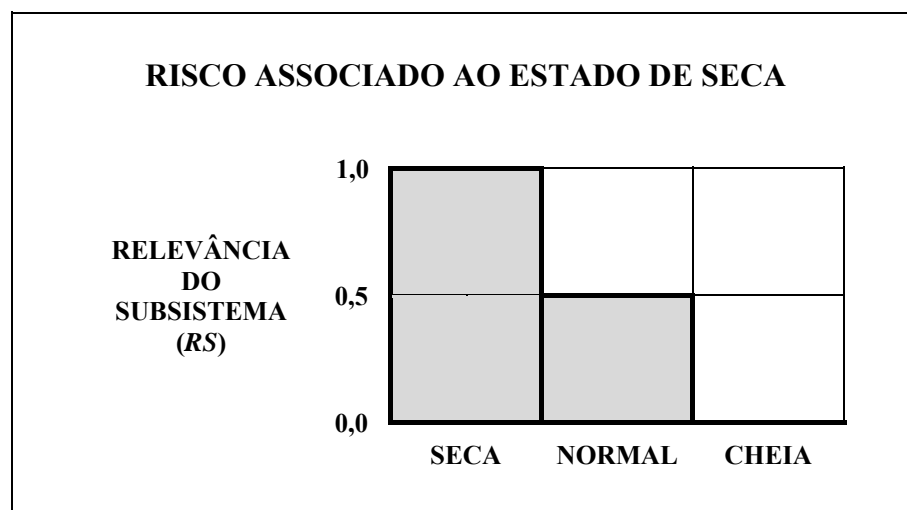
Risco-Fuzzy. Como este trabalho tem como meta a sua aplicação, como Estudo de Caso, ao Sistema de Aporte de Água Bruta para a Região Metropolitana de Fortaleza (SAAB/RMF), que foi explanado no Capítulo 3 (Área de Aplicação do Estudo), o software foi elaborado para avaliar sistemas hídricos que podem ser divididos em três níveis. No caso em questão, os mesmos são:

- a) o sistema global SAAB/RMF;
- b) os 11 (onze) subsistemas descritos no Capítulo 3; e
- c) os diversos tipos de riscos também apresentados no Capítulo 3 e relacionados nas Tabelas 5.1 a 5.11 do Capítulo 5 (Resultados e Discussão).

Com adaptações relativamente simples, o programa Risco-Fuzzy pode considerar um maior número de níveis.

Propõe-se também à definição de um nível de risco levando em conta a relevância de subsistemas, ou melhor, à consideração de um peso menor na estimativa do risco de alguns subsistemas. Seria o caso em que os mesmos tivessem uma relevância menor no computo do risco global, dependendo de algumas circunstâncias, como por exemplo, condições sazonais. Na Tabela 4.1 são exibidos os valores para a relevância do subsistema considerado, que são sugeridos para a determinação do risco associado ao estado de seca. Estes dados também são facilmente inseridos no programa Risco-Fuzzy.

Tabela 4.1 – Risco associado ao estado de seca



Fonte: Elaborada pelo autor.

4.2 Fluxo da estratégia metodológica

Para um melhor entendimento do roteiro a ser realizado na avaliação dos riscos do sistema hídrico em questão, subdividido em três níveis, por meio de um sistema de inferência fuzzy e da utilização do programa Risco-Fuzzy, de acordo com a metodologia proposta, é apresentado o seguinte fluxo da estratégia metodológica:

- a) definição do sistema global (escolha do sistema hídrico a ser analisado);
- b) definição dos subsistemas (subdivisão do sistema hídrico);
- c) definição dos tipos de risco (relação dos tipos de risco de cada subsistema);
- d) definição da Matriz de Classificação de Riscos, que determina a quantidade de funções de pertinência das variáveis correspondentes aos antecedentes e ao consequente;
- e) definição da distribuição e da forma (triangular e/ou trapezoidal) das variáveis:
 - *Possibilidade de Ocorrência* (condição);
 - *Severidade das Consequências* (condição);
 - *Risco* (consequência);
- f) definição de escalas de valores reais para as variáveis linguísticas dos antecedentes e do consequente;
- g) definição de cada valor numérico discreto ou de cada intervalo de confiança (triangular e/ou trapezoidal) de entrada de cada tipo de risco, de acordo com as escalas propostas, para as variáveis:
 - *Possibilidade de Ocorrência*;
 - *Severidade das Consequências*;
- h) impostação dos dados, referentes a todas as informações acima, no programa Risco-Fuzzy;
- i) processamento do programa Risco-Fuzzy por intermédio do software Matlab[®];
- j) obtenção dos valores numéricos discretos da variável *Risco*, que são os resultados do programa Risco-Fuzzy, e que são relacionados para os:
 - riscos individuais;
 - riscos dos subsistemas;
 - risco global do sistema; e
- k) análise dos resultados.

4.3 Construção do sistema de inferência fuzzy

O sistema de inferência fuzzy proposto possui como condições, ou seja, como antecedentes, as variáveis linguísticas *Possibilidade de Ocorrência* e *Severidade das Consequências*, abaixo relacionadas com os seus respectivos termos:

- a) *Possibilidade de Ocorrência* = {*extremamente remota, remota, improvável, provável, frequente*}; e
- b) *Severidade das Consequências* = {*desprezível, marginal, crítica, catastrófica*}.

A consequência, isto é, o consequente, é a variável linguística *Risco*, constituída dos seguintes termos: *Risco* = {*desprezível, menor, moderado, sério, crítico*}.

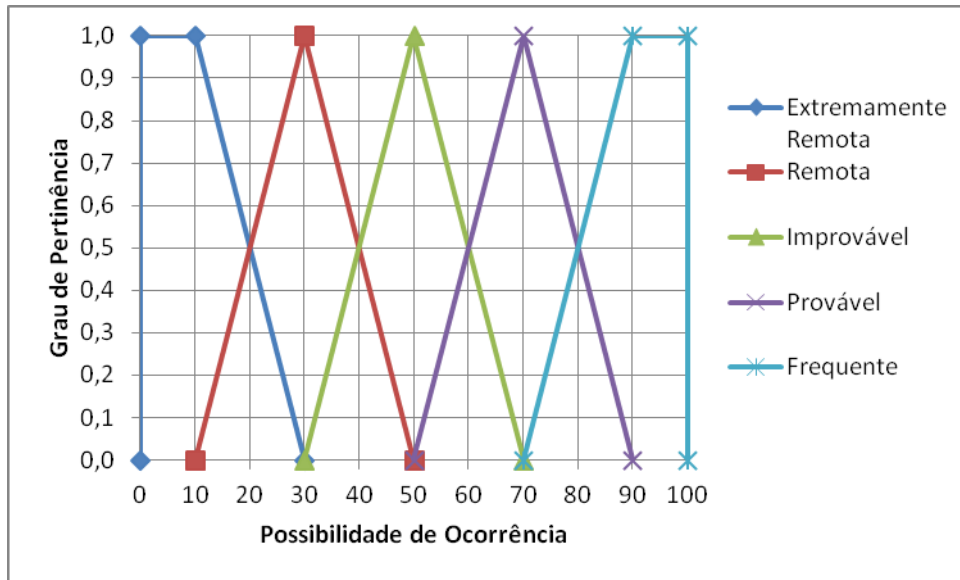
Tanto para os antecedentes como para o consequente foi escolhido o universo de discurso correspondente ao intervalo [0, 100], para não se trabalhar com valores numéricos muito fracionários.

As funções de pertinência de ambos os antecedentes, como também a do consequente, foram definidas de forma semelhante e foram distribuídas de maneira que os conjuntos fuzzy, correspondentes às mesmas, possuíssem a mesma área. Por uma questão de consistência nos resultados, foi necessário um ajuste nas condições de contorno e foram escolhidas funções trapezoidais nos extremos do intervalo correspondente do universo de discurso, enquanto que, para as demais funções, preferiram-se funções triangulares e equidistantes.

Para a variável *Possibilidade de Ocorrência*, as funções de pertinência (*FP*), definidas por seus vértices, e mostradas na Figura 4.1, foram assim distribuídas:

- a) *extremamente remota*: $FP = [0; 0; 10; 30]$;
- b) *remota*: $FP = [10; 30; 50]$;
- c) *improvável*: $FP = [30; 50; 70]$;
- d) *provável*: $FP = [50; 70; 90]$; e
- e) *frequente*: $FP = [70; 90; 100; 100]$.

Figura 4.1 – Funções de pertinência de entrada para a variável *Possibilidade de Ocorrência*



Fonte: Elaborada pelo autor.

A escala de valores reais da variável *Possibilidade de Ocorrência*, para um pertencimento de 100 % aos conjuntos fuzzy (funções de pertinência) correspondentes, é listada na Tabela 4.2.

Tabela 4.2 – Escala de valores da variável *Possibilidade de Ocorrência*

Escala de valores reais da variável <i>Possibilidade de Ocorrência</i> (PO)	
Funções de Pertinência	Valor Numérico Discreto ¹
<i>Extremamente Remota</i>	$0 \leq PO \leq 10$
<i>Remota</i>	$PO = 30$
<i>Improvável</i>	$PO = 50$
<i>Provável</i>	$PO = 70$
<i>Frequente</i>	$90 \leq PO \leq 100$

¹ Para um grau de pertinência de 100 % ao conjunto fuzzy correspondente.

Fonte: Elaborada pelo autor.

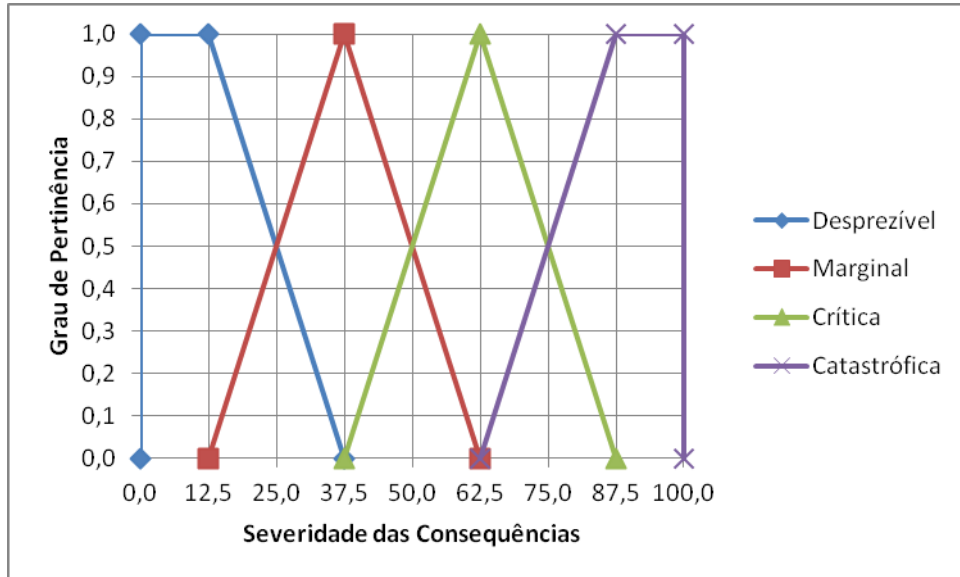
As funções de pertinência (FP) para a variável *Severidade das Consequências*, como apresentado na Figura 4.2, foram distribuídas, de acordo com os seus vértices, da maneira seguinte:

- desprezível*: $FP = [0,0; 0,0; 12,5; 37,5]$;
- marginal*: $FP = [12,5; 37,5; 62,5]$;

c) *crítica*: $FP = [37,5; 62,5; 87,5]$; e

d) *catastrófica*: $FP = [62,5; 87,5; 100,0; 100,0]$.

Figura 4.2 – Funções de pertinência de entrada para a variável *Severidade das Consequências*



Fonte: Elaborada pelo autor.

Para a variável *Severidade das Consequências*, a sua escala de valores reais, para um pertencimento de 100 % aos conjuntos fuzzy (funções de pertinência) correspondentes, está listada na Tabela 4.3.

Tabela 4.3 – Escala de valores da variável *Severidade das Consequências*

Escala de valores reais da variável <i>Severidade das Consequências</i> (SC)	
Funções de Pertinência	Valor Numérico Discreto ¹
<i>Desprezível</i>	$0 \leq SC \leq 12,5$
<i>Marginal</i>	$SC = 37,5$
<i>Crítica</i>	$SC = 62,5$
<i>Catastrófica</i>	$87,5 \leq SC \leq 100,0$

¹ Para um grau de pertinência de 100 % ao conjunto fuzzy correspondente.

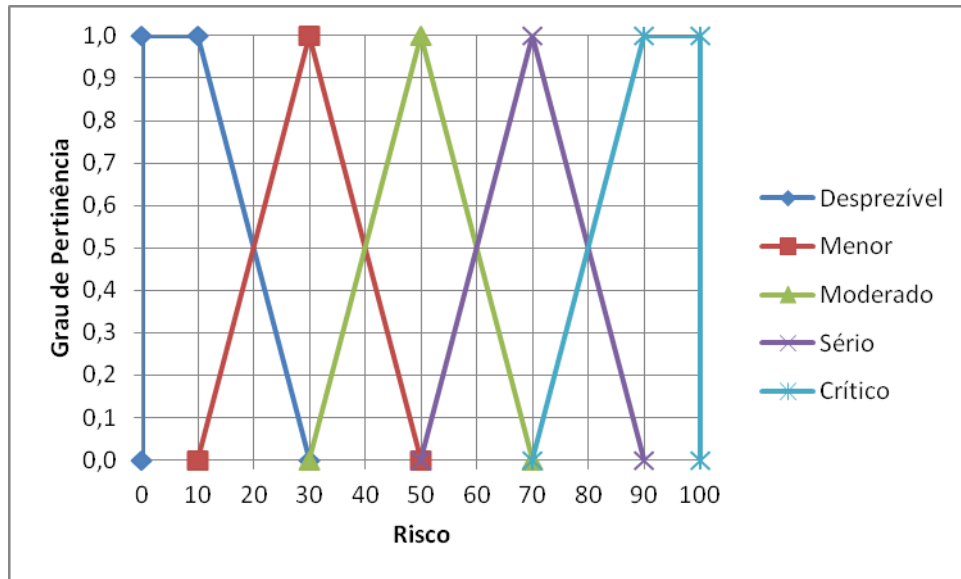
Fonte: Elaborada pelo autor.

Para o conseqüente, o *Risco*, as funções de pertinência (*FP*) são ilustradas na Figura 4.3, e a sua distribuição, a partir dos seus vértices, é a que se segue:

a) *desprezível*: $FP = [0; 0; 10; 30]$;

- b) *menor*: $FP = [10; 30; 50]$;
 c) *moderado*: $FP = [30; 50; 70]$;
 d) *sério*: $FP = [50; 70; 90]$; e
 e) *crítico*: $FP = [70; 90; 100; 100]$.

Figura 4.3 – Funções de pertinência de saída para a variável *Risco*



Fonte: Elaborada pelo autor.

Lista-se na Tabela 4.4 a escala de valores reais da variável *Risco*. Os valores que estão relacionados são os obtidos após a defuzzificação e correspondem aos casos em que existe um pertencimento de 100 % aos conjuntos fuzzy (funções de pertinência) correspondentes. A escala de riscos varia, portanto, de 10 a 90.

Tabela 4.4 – Escala de valores da variável *Risco*

Escala de valores reais da variável <i>Risco</i> (<i>R</i>)	
Funções de Pertinência	Valor Numérico Discreto ¹
<i>Desprezível</i>	$R = 10$
<i>Menor</i>	$R = 30$
<i>Moderado</i>	$R = 50$
<i>Sério</i>	$R = 70$
<i>Crítico</i>	$R = 90$

¹ Para um grau de pertinência de 100 % ao conjunto fuzzy correspondente.

Fonte: Elaborada pelo autor.

A Matriz de Classificação de Riscos proposta é mostrada na Tabela 4.5 e é, na verdade, uma adaptação da mesma que foi apresentada na Tabela 2.6, cujas legendas constam nas Tabelas 2.4, 2.5 e 2.7. Sua escolha é em virtude de que, os dados levantados por Capelo Neto, Brito e Viana (2014), e que serão utilizados neste trabalho, já levaram em consideração a utilização de referida Matriz.

Olhando a Tabela 4.5, observa-se que os elementos da Matriz de Classificação de Riscos se relacionam com os dos vetores coluna correspondentes à Possibilidade de Ocorrência e os dos vetores linha correspondentes à Severidade das Consequências. Em um sistema de inferência fuzzy, estas são, na realidade, as relações entre as funções de pertinência dos antecedentes e as do consequente, que podem ser expressas por meio de regras de inferência fuzzy, como por exemplo:

se (Possibilidade de Ocorrência é improvável) e (Severidade das Consequências é crítica) então (Risco é moderado).

Tabela 4.5 – Matriz de Classificação de Riscos

Severidade das Consequências	Possibilidade de Ocorrência				
	Extremamente Remota	Remota	Improvável	Provável	Frequente
Catastrófica	Menor	Moderado	Sério	Crítico	Crítico
Crítica	Desprezível	Menor	Moderado	Sério	Crítico
Marginal	Desprezível	Desprezível	Menor	Moderado	Sério
Desprezível	Desprezível	Desprezível	Desprezível	Menor	Moderado

Fonte: Adaptada de Capelo Neto, Brito e Viana (2014), por sua vez fundamentada em Aguiar (2009).

Para a efetivação da defuzzificação foi escolhido o método do bissetor, por uma questão de consistência nos resultados correspondentes às funções de pertinência trapezoidais dos extremos do intervalo.

O *Risco*, obtido na defuzzificação, será num valor numérico discreto, pertencente ao intervalo [10, 90], dentro do universo de discurso [0, 100], e poderá também ser expresso em percentagem.

A implementação e a manipulação dos dados foram realizadas por meio do programa Risco-Fuzzy cujo desenvolvimento é apresentado a seguir.

4.4 Desenvolvimento do programa Risco-Fuzzy

O programa Risco-Fuzzy é, na verdade, um conjunto de quatro scripts que são processados por meio do software Matlab[®], uma poderosa ferramenta utilizada em diversas áreas científicas e que tem se tornado um ambiente efetivamente utilizado em engenharia.

Desenvolvido pela MathWorks, o Matlab[®] é um programa de computação numérica que utiliza como linguagem de programação uma linguagem interpretada e de alto nível. Inicialmente foi escrito em linguagem compilada Fortran[®], sendo reescrito posteriormente em linguagem C.

As linguagens de programação são classificadas como interpretadas quando o seu código fonte não é convertido em um arquivo executável. Ele é executado por outro programa de computador chamado interpretador, que em seguida é executado pelo sistema operacional ou processador durante a sua execução. Uma linguagem é classificada como de alto nível quando sua escrita se assemelha a linguagem natural do programador, afastando-se da linguagem binária, ou de máquina. (CID, 2014, p. 22).

Os quatro scripts do programa Risco-Fuzzy, que são mostrados no Apêndice A, foram assim denominados:

- a) 1^o script ou script principal: *Risco Fuzzy* (QUADRO A.1);
- b) 2^o script: *Dados Entrada* (QUADRO A.2);
- c) 3^o script: *Conjuntos Fuzzy* (QUADRO A.3); e
- d) 4^o script: *Inferência* (QUADRO A.4).

A Figura 4.4 apresenta um fluxograma do programa Risco-Fuzzy, que é descrito de maneira sucinta no que se segue.

O script principal *Risco Fuzzy* é o responsável por gerenciar todas as atividades do programa Risco-Fuzzy. Sua primeira tarefa é o carregamento dos dados, que são inseridos por meio dos scripts *Dados Entrada* e *Conjuntos Fuzzy*.

As informações referentes às formas e às distribuições das funções de pertinência das variáveis linguísticas de entrada (*Possibilidade de Ocorrência* e *Severidade das*

Consequências) e de saída (*Risco*), como também às regras de inferência, são fornecidas por meio do script *Dados Entrada*.

O script *Conjuntos Fuzzy*, por sua vez, lê os valores numéricos discretos ou os intervalos de confiança (conjuntos fuzzy triangulares ou trapezoidais), correspondentes às variáveis linguísticas de entrada, de todos os tipos de risco, que são fornecidos em uma planilha do Excel, como mostrado na Tabela B.1 do Apêndice B. Este exemplo corresponde à primeira aplicação avaliada no Capítulo 5, Resultados e Discussão (Seção 5.1). É interessante observar que estes valores de entrada são, na realidade, sempre conjuntos fuzzy trapezoidais. Os conjuntos triangulares e os valores reais são casos particulares deste.

A etapa seguinte é o processo de inferência, que foi explicado na Seção 2.7.3 (Sistemas de inferência fuzzy). O script correspondente à mesma foi denominado simplesmente de *Inferência*. Este efetiva as quatro tarefas seguintes, constantes no fluxograma da Figura 4.4:

- a) *trapmf*: função interna do Matlab[®] que manipula as funções de pertinência trapezoidais de entrada, comentadas no parágrafo anterior;
- b) *interseções*: o script *Inferência* realiza todas as interseções dos conjuntos fuzzy, de acordo com os procedimentos de um sistema de inferência fuzzy;
- c) *união*: da mesma forma que no item anterior, o script *Inferência* efetiva a união dos conjuntos fuzzy, envolvidos na análise, da variável linguística *Risco*; e
- d) *defuzzificação*: após a efetivação do item acima, o Matlab[®] calcula o valor numérico discreto de saída de cada um dos tipos de risco de acordo com o método especificado, no caso, o do bissetor.

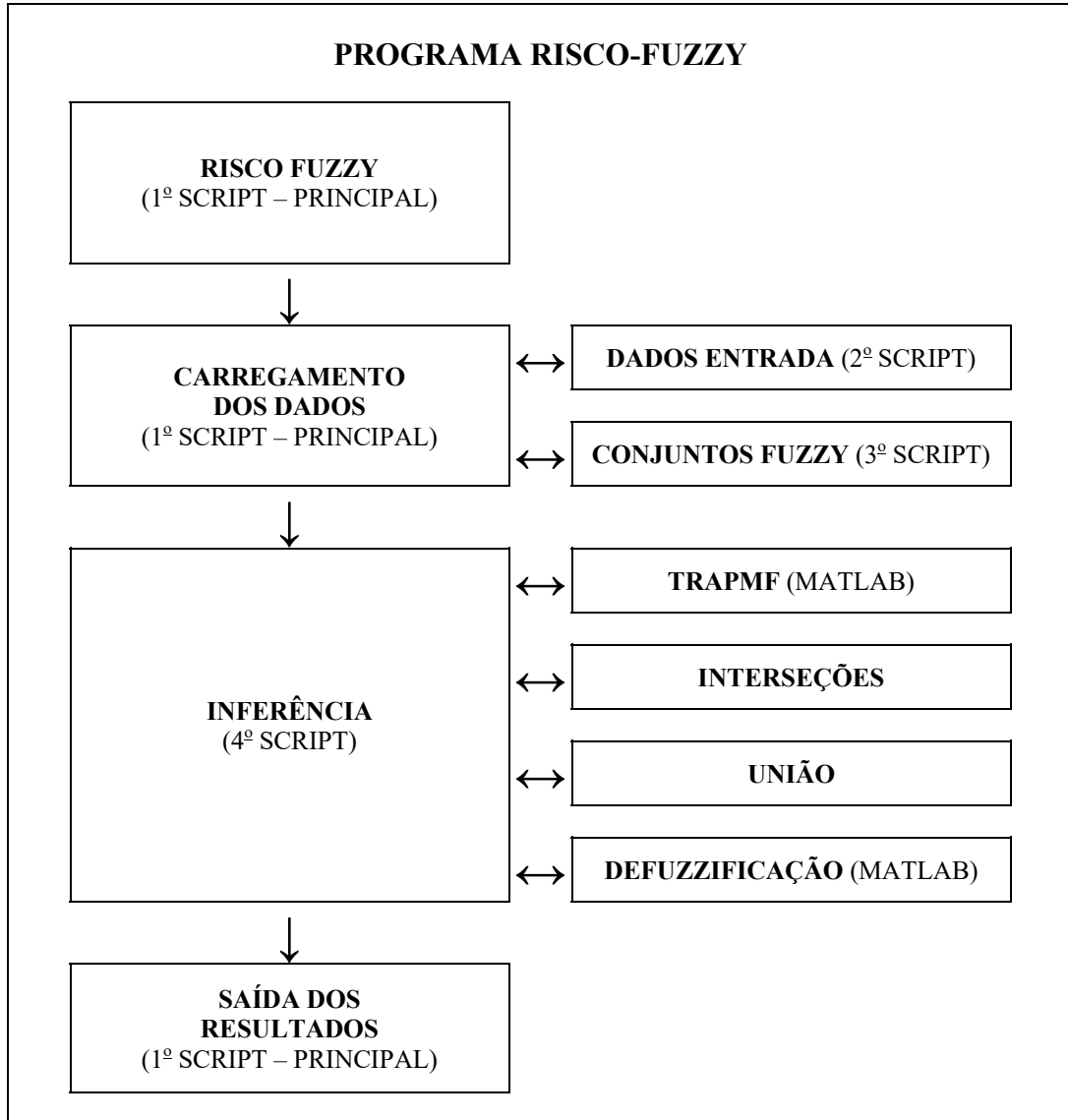
O script principal *Risco Fuzzy* fornece, por fim, os resultados da análise, também em uma planilha do Excel, que são os valores reais:

- a) de todos os riscos individuais;
- b) dos riscos de todos os subsistemas; e
- c) do risco global do sistema.

É importante salientar que os dados de entrada e os resultados ficam gravados em arquivos do Excel, o que facilita bastante a utilização do programa Risco-Fuzzy. Em uma

determinada avaliação de riscos, valores podem ser alterados sem que seja necessária a impositação, novamente, de todas as informações.

Figura 4.4 – Fluxograma do programa Risco-Fuzzy



Fonte: Elaborada pelo autor.

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

A metodologia proposta de avaliação integrada de riscos na infraestrutura de sistemas hídricos, por meio do programa Risco-Fuzzy, foi posta em prática na análise do Sistema de Aporte de Água Bruta para a Região Metropolitana de Fortaleza (SAAB/RMF). Foram utilizados dados já existentes, levantados junto à Companhia de Gestão dos Recursos Hídricos (COGERH), por Capelo Neto, Brito e Viana (2014).

Os dados supracitados, considerados neste estudo, subdividem naturalmente o SAAB/RMF em três níveis, que já foram descritos no Capítulo 3, correspondente à Área de Aplicação do Estudo.

Para que seja verificado o funcionamento do processo sugerido, são apresentados alguns exemplos de aplicação, divididos nos seguintes tópicos:

- a) Antecedentes com grau de pertinência a apenas um conjunto fuzzy;
- b) Antecedentes com grau de pertinência a dois conjuntos fuzzy;
- c) Antecedentes impostados por meio de intervalos de confiança triangulares;
- d) Antecedentes impostados por meio de intervalos de confiança trapezoidais;
- e) Risco global do sistema considerando a relevância de subsistemas; e
- f) Análise de sensibilidade da metodologia proposta por meio da comparação dos resultados obtidos anteriormente.

5.1 Antecedentes com grau de pertinência a apenas um conjunto fuzzy

Avaliaram-se, inicialmente, os casos em que as variáveis *Possibilidade de Ocorrência* e *Severidade das Consequências* possuem valores numéricos discretos, de acordo com as escalas propostas, que correspondem a um pertencimento de 100% a um dos conjuntos fuzzy de entrada.

5.1.1 Riscos individuais

Para o caso do risco individual, em um sistema de inferência fuzzy, sempre que ambos os antecedentes possuam graus de pertinência de 100% a um dos conjuntos fuzzy de entrada, o consequente, ou seja, a variável linguística *Risco*, também terá um pertencimento de 100% a um dos conjuntos fuzzy de saída.

Os riscos individuais, calculados de acordo com a metodologia proposta, e por intermédio do programa Risco-Fuzzy, são mostrados, para cada um dos subsistemas, entre a Tabela 5.1 e a Tabela 5.11. Nestas, são relacionados os valores numéricos de entrada com o seu conjunto fuzzy correspondente, como também o valor real, obtido após a defuzzificação, da variável *Risco* e de sua respectiva função de pertinência.

Tabela 5.1 – Riscos individuais para o Açude Castanhão (Subsistema 1)

Subsistema 1 – Açude Castanhão						
Riscos Individuais						
Tipos de Risco	Possibilidade de Ocorrência		Severidade das Consequências		Risco	
	Valor Discreto ¹	Função de Pertinência	Valor Discreto ¹	Função de Pertinência	Valor Discreto ¹	Função de Pertinência
1. Falha estrutural	30	Remota	62,5	Crítica	30	Menor
2. Contaminação da água ²	50	Improvável	37,5	Marginal	30	Menor
3. Floração de cianobactérias	30	Remota	12,5	Desprezível	10	Desprezível
4. Sabotagem/Vandalismo	10	Extremamente Remota	62,5	Crítica	10	Desprezível

¹ Valor numérico discreto para um grau de pertinência de 100% ao conjunto fuzzy (função de pertinência) correspondente.
² Contaminação da água (física, química ou biologicamente).

Fonte: Elaborada pelo autor.

Tabela 5.2 – Riscos individuais para a Estação Elevatória do Açude Castanhão (Subsistema 2)

Subsistema 2 – Estação Elevatória do Açude Castanhão						
Riscos Individuais						
Tipos de Risco	Possibilidade de Ocorrência		Severidade das Consequências		Risco	
	Valor Discreto ¹	Função de Pertinência	Valor Discreto ¹	Função de Pertinência	Valor Discreto ¹	Função de Pertinência
1. Falta de energia	50	Improvável	62,5	Crítica	50	Moderado
2. Queima de uma bomba	30	Remota	62,5	Crítica	30	Menor
3. Queima/Falha em transformador	30	Remota	62,5	Crítica	30	Menor
4. Queima de cabos	30	Remota	37,5	Marginal	10	Desprezível
5. Pontos quentes	30	Remota	37,5	Marginal	10	Desprezível
6. Sabotagem/Vandalismo	10	Extremamente Remota	62,5	Crítica	10	Desprezível

¹ Valor numérico discreto para um grau de pertinência de 100% ao conjunto fuzzy (função de pertinência) correspondente.

Fonte: Elaborada pelo autor.

Tabela 5.3 – Riscos individuais para o Canal da Integração (Subsistema 3)

Subsistema 3 – Canal da Integração						
Riscos Individuais						
Tipos de Risco	Possibilidade de Ocorrência		Severidade das Consequências		Risco	
	Valor Discreto ¹	Função de Pertinência	Valor Discreto ¹	Função de Pertinência	Valor Discreto ¹	Função de Pertinência
1. Falha na ativação das comportas	30	Remota	37,5	Marginal	10	Desprezível
2. Falha em sifão invertido	30	Remota	62,5	Crítica	30	Menor
3. Explosões nas pedreiras	10	Extremamente Remota	62,5	Crítica	10	Desprezível
4. Obstrução por acidentes automobilísticos	30	Remota	37,5	Marginal	10	Desprezível
5. Retirada ilegal de água	70	Provável	12,5	Desprezível	30	Menor
6. Derramamento de carga contaminante	30	Remota	62,5	Crítica	30	Menor
7. Contaminação da água pelo lixo	50	Improvável	37,5	Marginal	30	Menor
8. Crescimento de macrófitas	70	Provável	37,5	Marginal	50	Moderado
9. Sabotagem/Vandalismo	10	Extremamente Remota	62,5	Crítica	10	Desprezível

¹ Valor numérico discreto para um grau de pertinência de 100% ao conjunto fuzzy (função de pertinência) correspondente.

Fonte: Elaborada pelo autor.

Tabela 5.4 – Riscos individuais para o Açude Curral Velho (Subsistema 4)

Subsistema 4 – Açude Curral Velho						
Riscos Individuais						
Tipos de Risco	Possibilidade de Ocorrência		Severidade das Consequências		Risco	
	Valor Discreto ¹	Função de Pertinência	Valor Discreto ¹	Função de Pertinência	Valor Discreto ¹	Função de Pertinência
1. Baixo nível de reservação	30	Remota	37,5	Marginal	10	Desprezível
2. Contaminação da água ²	50	Improvável	37,5	Marginal	30	Menor
3. Contaminação por <i>Cryptosporidium</i> (gado)	30	Remota	37,5	Marginal	10	Desprezível
4. Floração de cianobactérias	30	Remota	12,5	Desprezível	10	Desprezível
5. Sabotagem/Vandalismo	10	Extremamente Remota	37,5	Marginal	10	Desprezível

¹ Valor numérico discreto para um grau de pertinência de 100% ao conjunto fuzzy (função de pertinência) correspondente.
² Contaminação da água (física, química ou biologicamente).

Fonte: Elaborada pelo autor.

Observando os valores obtidos para os diversos riscos individuais, verifica-se que os mesmos são, na maioria deles, classificados como *desprezível* ou *menor*. Apenas em cinco subsistemas, o mesmo assume a condição de *moderado*. Isso ocorre com os tipos de risco seguintes:

- a) falta de energia elétrica nas estações elevatórias do Açude Castanhão (Tabela 5.2) e EB1 e EB2 (Tabela 5.7);
- b) crescimento de macrófitas no Canal da Integração (Tabela 5.3); e
- c) contaminação da água (física, química ou biologicamente) nos Açudes Pacoti e Riachão (Tabela 5.9) e no Açude Gavião (Tabela 5.11).

Tabela 5.5 – Riscos individuais para o Canal do Trabalhador (Subsistema 5)

Subsistema 5 – Canal do Trabalhador						
Riscos Individuais						
Tipos de Risco	Possibilidade de Ocorrência		Severidade das Consequências		Risco	
	Valor Discreto ¹	Função de Pertinência	Valor Discreto ¹	Função de Pertinência	Valor Discreto ¹	Função de Pertinência
1. Falha na ativação das comportas	30	Remota	37,5	Marginal	10	Desprezível
2. Obstrução por acidentes automobilísticos	30	Remota	37,5	Marginal	10	Desprezível
3. Retirada ilegal de água	50	Improvável	12,5	Desprezível	10	Desprezível
4. Derramamento de carga contaminante	10	Extremamente Remota	62,5	Crítica	10	Desprezível
5. Crescimento de macrófitas	50	Improvável	37,5	Marginal	30	Menor
6. Sabotagem/Vandalismo	10	Extremamente Remota	62,5	Crítica	10	Desprezível

¹ Valor numérico discreto para um grau de pertinência de 100% ao conjunto fuzzy (função de pertinência) correspondente.

Fonte: Elaborada pelo autor.

Tabela 5.6 – Riscos individuais para o Açude Pacajus (Subsistema 6)

Subsistema 6 – Açude Pacajus						
Riscos Individuais						
Tipos de Risco	Possibilidade de Ocorrência		Severidade das Consequências		Risco	
	Valor Discreto ¹	Função de Pertinência	Valor Discreto ¹	Função de Pertinência	Valor Discreto ¹	Função de Pertinência
1. Baixo nível de reservação	30	Remota	37,5	Marginal	10	Desprezível
2. Contaminação da água ²	50	Improvável	37,5	Marginal	30	Menor
3. Contaminação por Cryptosporidium (gado)	30	Remota	37,5	Marginal	10	Desprezível
4. Floração de cianobactérias	30	Remota	37,5	Marginal	10	Desprezível
5. Sabotagem/Vandalismo	10	Extremamente Remota	37,5	Marginal	10	Desprezível

¹ Valor numérico discreto para um grau de pertinência de 100% ao conjunto fuzzy (função de pertinência) correspondente.

² Contaminação da água (física, química ou biologicamente).

Fonte: Elaborada pelo autor.

No caso em que os valores reais das variáveis *Possibilidade de Ocorrência* e *Severidade das Consequências* possuem um pertencimento a apenas um conjunto fuzzy, conforme os dados utilizados, pode-se dizer que são obtidos resultados bastante satisfatórios para os valores da variável *Risco*.

Tabela 5.7 – Riscos individuais para o Estações Elevatórias EB1 e EB2 (Subsistema 7)

Subsistema 7 – Estações Elevatórias EB1 e EB2						
Riscos Individuais						
Tipos de Risco	Possibilidade de Ocorrência		Severidade das Consequências		Risco	
	Valor Discreto ¹	Função de Pertinência	Valor Discreto ¹	Função de Pertinência	Valor Discreto ¹	Função de Pertinência
1. Falta de energia	50	Improvável	62,5	Crítica	50	Moderado
2. Queima de uma bomba	30	Remota	62,5	Crítica	30	Menor
3. Queima/Falha em transformador	30	Remota	62,5	Crítica	30	Menor
4. Queima de cabos	30	Remota	37,5	Marginal	10	Desprezível
5. Pontos quentes	30	Remota	37,5	Marginal	10	Desprezível
6. Sabotagem/Vandalismo	10	Extremamente Remota	62,5	Crítica	10	Desprezível

¹ Valor numérico discreto para um grau de pertinência de 100% ao conjunto fuzzy (função de pertinência) correspondente.

Fonte: Elaborada pelo autor.

Tabela 5.8 – Riscos individuais para o Canal do Ererê (Subsistema 8)

Subsistema 8 – Canal do Ererê						
Riscos Individuais						
Tipos de Risco	Possibilidade de Ocorrência		Severidade das Consequências		Risco	
	Valor Discreto ¹	Função de Pertinência	Valor Discreto ¹	Função de Pertinência	Valor Discreto ¹	Função de Pertinência
1. Retirada ilegal de água	30	Remota	12,5	Desprezível	10	Desprezível
2. Lançamentos de efluentes	50	Improvável	37,5	Marginal	30	Menor
3. Derramamento de carga contaminante	30	Remota	37,5	Marginal	10	Desprezível
4. Sabotagem/Vandalismo	10	Extremamente Remota	62,5	Crítica	10	Desprezível

¹ Valor numérico discreto para um grau de pertinência de 100% ao conjunto fuzzy (função de pertinência) correspondente.

Fonte: Elaborada pelo autor.

Tabela 5.9 – Riscos individuais para o Açudes Pacoti e Riachão (Subsistema 9)

Subsistema 9 – Açudes Pacoti e Riachão						
Riscos Individuais						
Tipos de Risco	Possibilidade de Ocorrência		Severidade das Consequências		Risco	
	Valor Discreto ¹	Função de Pertinência	Valor Discreto ¹	Função de Pertinência	Valor Discreto ¹	Função de Pertinência
1. Baixo nível de reservação	30	Remota	62,5	Crítica	30	Menor
2. Contaminação da água ²	50	Improvável	62,5	Crítica	50	Moderado
3. Contaminação por Cryptosporidium (gado)	30	Remota	62,5	Crítica	30	Menor
4. Floração de cianobactérias	30	Remota	37,5	Marginal	10	Desprezível
5. Sabotagem/Vandalismo	10	Extremamente Remota	62,5	Crítica	10	Desprezível

¹ Valor numérico discreto para um grau de pertinência de 100% ao conjunto fuzzy (função de pertinência) correspondente.
² Contaminação da água (física, química ou biologicamente).

Fonte: Elaborada pelo autor.

Tabela 5.10 – Riscos individuais para o Sistema de Túneis (Subsistema 10)

Subsistema 10 – Sistema de Túneis						
Riscos Individuais						
Tipos de Risco	Possibilidade de Ocorrência		Severidade das Consequências		Risco	
	Valor Discreto ¹	Função de Pertinência	Valor Discreto ¹	Função de Pertinência	Valor Discreto ¹	Função de Pertinência
1. Acidentes geotécnicos	10	Extremamente Remota	62,5	Crítica	10	Desprezível
2. Explosões nas pedreiras	30	Remota	62,5	Crítica	30	Menor
3. Sabotagem/Vandalismo	30	Remota	62,5	Crítica	30	Menor

¹ Valor numérico discreto para um grau de pertinência de 100% ao conjunto fuzzy (função de pertinência) correspondente.

Fonte: Elaborada pelo autor.

Tabela 5.11 – Riscos individuais para o Açude Gavião (Subsistema 11)

Subsistema 11 – Açude Gavião						
Riscos Individuais						
Tipos de Risco	Possibilidade de Ocorrência		Severidade das Consequências		Risco	
	Valor Discreto ¹	Função de Pertinência	Valor Discreto ¹	Função de Pertinência	Valor Discreto ¹	Função de Pertinência
1. Baixo nível de reservação	30	Remota	62,5	Crítica	30	Menor
2. Contaminação da água ²	50	Improvável	62,5	Crítica	50	Moderado
3. Contaminação por Cryptosporidium (gado)	30	Remota	62,5	Crítica	30	Menor
4. Floração de cianobactérias	30	Remota	37,5	Marginal	10	Desprezível
5. Sabotagem/Vandalismo	10	Extremamente Remota	62,5	Crítica	10	Desprezível

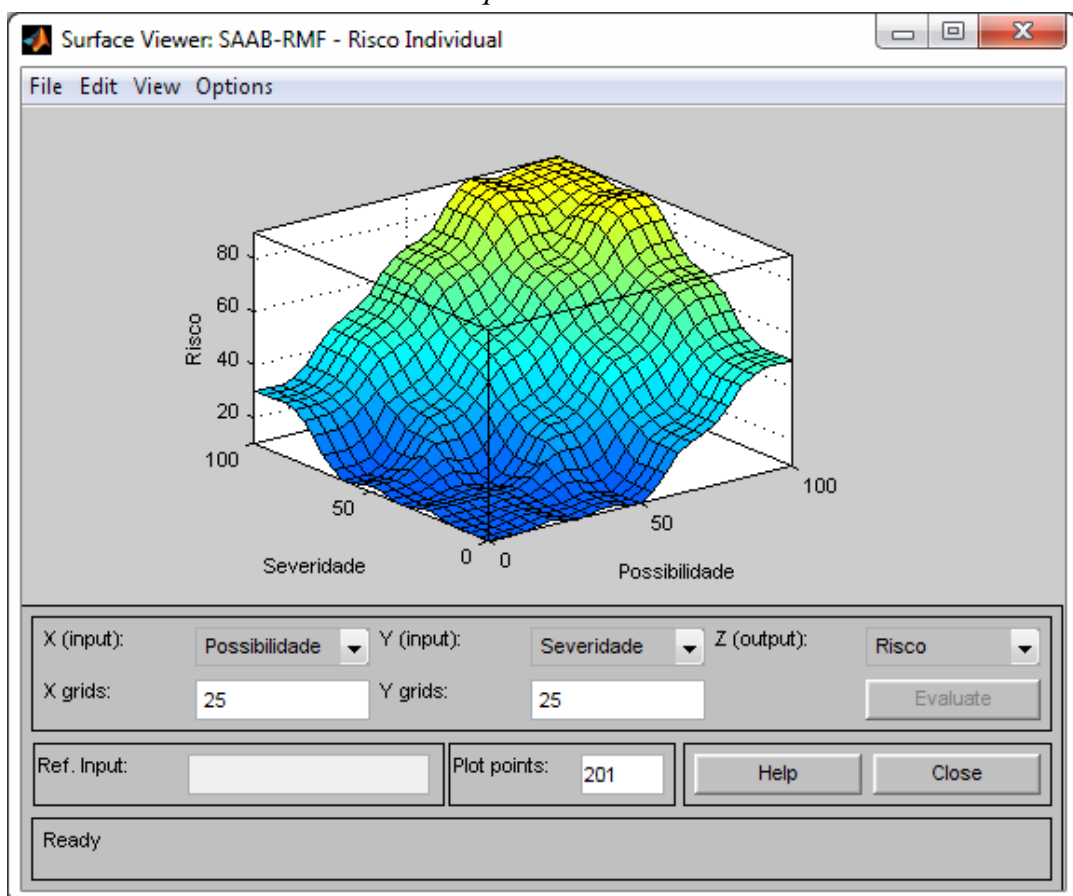
¹ Valor numérico discreto para um grau de pertinência de 100% ao conjunto fuzzy (função de pertinência) correspondente.
² Contaminação da água (física, química ou biologicamente).

Fonte: Elaborada pelo autor.

É importante destacar que os valores para os riscos individuais, no que diz respeito ao conjunto fuzzy obtido como resposta, são os mesmos constantes no trabalho de Capelo Neto, Brito e Viana (2014), como era de se esperar. A diferença dos resultados da metodologia proposta, para o caso dos antecedentes com pertencimento a apenas um conjunto fuzzy, é que também se obtém como resposta valores numéricos discretos em uma escala contínua.

Na determinação do risco individual, a biblioteca Fuzzy Logic Toolbox, do programa Matlab[®], que contém uma interface gráfica que permite a construção de sistemas de inferência fuzzy, possibilita que seja mostrada uma superfície onde se pode visualizar o comportamento do *Risco* em função da *Possibilidade de Ocorrência* e da *Severidade das Consequências*, como exibida na Figura 5.1.

Figura 5.1 – Saída gráfica do Matlab[®]: superfície que relaciona *Possibilidade de Ocorrência* × *Severidade das Consequências* × *Risco*



Fonte: Elaborada pelo autor.

5.1.2 Riscos dos subsistemas

Para cada um dos subsistemas, a Tabela 5.12 ilustra os valores reais obtidos para a variável *Risco*, após a defuzzificação, com os seus respectivos conjuntos fuzzy e o grau de pertinência aos mesmos. Diferentemente com o que ocorre quando se calculam riscos individuais, os valores discretos de saída para os subsistemas não necessariamente possuem pertencimento a apenas um conjunto fuzzy.

Tabela 5.12 – Riscos dos subsistemas para o caso dos antecedentes com grau de pertinência a apenas um conjunto fuzzy

Sistema de Aporte de Água Bruta para a Região Metropolitana de Fortaleza (SAAB/RMF)			
Riscos dos Subsistemas			
Subsistema	Risco		
	Valor Numérico Discreto	Função de Pertinência	
		Conjunto Fuzzy	Grau ¹ (%)
1. Açude Castanhão	20	Desprezível	50
		Menor	50
2. Estação Elevatória do Açude Castanhão	30	Menor	100
3. Canal da Integração	30	Menor	100
4. Açude Curral Velho	20	Desprezível	50
		Menor	50
5. Canal do Trabalhador	20	Desprezível	50
		Menor	50
6. Açude Pacajus	20	Desprezível	50
		Menor	50
7. Estações Elevatórias EB1 e EB2	30	Menor	100
8. Canal do Ererê	20	Desprezível	50
		Menor	50
9. Açudes Pacoti e Riachão	30	Menor	100
10. Sistema de Túneis	20	Desprezível	50
		Menor	50
11. Açude Gavião	30	Menor	100

¹ Grau de pertinência ao conjunto fuzzy correspondente.

Fonte: Elaborada pelo autor.

É importante observar, entretanto, que todos os subsistemas possuem valores para os riscos que estão sempre classificados entre *desprezível* e *menor*, o que situa referidas

unidades hídricas como confiáveis, do ponto de vista da segurança, da forma em que os dados de entrada foram informados ao software Risco-Fuzzy.

5.1.3 *Risco global do sistema*

Para o caso em questão, o valor numérico discreto para o risco global do sistema, fornecido pelo programa Risco-Fuzzy, será $R = 30$, que, conforme a escala sugerida, corresponde a um pertencimento de 100% ao conjunto fuzzy *menor*, da variável linguística *Risco*.

Os dados de entrada do programa Risco-Fuzzy, para o caso analisado acima, isto é, para os antecedentes com grau de pertinência a apenas um conjunto fuzzy, são apresentados na Tabela B.1 (Apêndice B).

No cenário avaliado, no período da Copa do Mundo de Futebol de 2014, poder-se-ia dizer que a situação do SAAB/RMF, no que diz respeito à frequência e à gravidade dos possíveis riscos, era confortável. No que se segue, outras situações são avaliadas.

5.2 Antecedentes com grau de pertinência a dois conjuntos fuzzy

A grande potencialidade da utilização de um sistema de inferência fuzzy começa a ser verificada, com relação à avaliação dos resultados, quando pelo menos uma das condições possui um valor real de entrada com pertença a mais de um conjunto fuzzy. No caso deste trabalho, da forma em que os antecedentes foram definidos, este pertencimento será sempre a dois conjuntos fuzzy.

Para se averiguar esta condição, como também se realizar uma análise de sensibilidade da metodologia proposta e do programa Risco-Fuzzy, escolheu-se realizar uma adaptação nos dados de entrada de determinado tipo de risco. Como aparece em cinco subsistemas, tendo o seu risco classificado como *moderado* em dois deles, exatamente os açudes mais próximos à RMF, foi escolhido o tipo de risco relativo à contaminação da água (física, química ou biologicamente). São os seguintes os subsistemas considerados:

- a) 1 – Açude Castanhão;
- b) 4 – Açude Curral Velho;
- c) 6 – Açude Pacajus;
- d) 9 – Açudes Pacoti e Riachão; e

e) 11 – Açude Gavião.

Em todos os cinco subsistemas, a *Possibilidade de Ocorrência* obtida no levantamento de dados para a contaminação da água foi considerada *improvável*, que na escala proposta equivale ao valor $PO = 50$, e que representa um evento cuja frequência esperada é de uma a duas vezes em cinco anos, de acordo com a Tabela 2.4. Admitindo-se que esta frequência seja um pouco maior, mas que não chegue a ocorrer até uma vez por ano, que corresponderia a *provável* (TABELA 2.4), estabeleceu-se o valor de entrada $PO = 55$. Este valor representa um pertencimento de 75% e de 25%, respectivamente, aos conjuntos fuzzy *improvável* e *provável*.

A *Severidade das Consequências* foi considerada, no levantamento de dados, como *marginal* para os subsistemas 1, 4 e 6, que na escala sugerida equivale ao valor $SC = 37,5$, correspondendo a um impacto que pode ser descrito como causador de danos leves, com potencial de afetar o abastecimento, mas que é facilmente reversível, conforme a Tabela 2.5. Supondo, também, um acréscimo neste valor de entrada, utilizou-se $SC = 43,75$, que representa um pertencimento de 75% e de 25%, respectivamente, às funções de pertinência *marginal* e *crítica*. Uma gravidade *crítica*, por sua vez, significaria a obtenção de danos severos ao abastecimento, levando à sua interrupção, local ou generalizada, por um período inferior a seis horas (TABELA 2.5).

Nos subsistemas 9 e 11, a *Severidade das Consequências* foi avaliada como *crítica*, que corresponde a $SC = 62,5$. Da mesma forma que no caso explanado no parágrafo anterior, admitiu-se um incremento neste valor e se considerou $SC = 68,75$, que representa um pertencimento de 75% e de 25%, respectivamente, às funções de pertinência *crítica* e *catastrófica*. De acordo com a Tabela 2.5, uma severidade *catastrófica* implicaria em danos gravíssimos ao abastecimento, levando à sua interrupção, local ou generalizada, por um período superior a seis horas.

5.2.1 Riscos individuais

Fornecidos os dados e processado o software Risco-Fuzzy, foram obtidos os valores da variável *Risco* (R), para os subsistemas considerados acima, que são apresentados entre a Tabela 5.13 e a Tabela 5.16, como também o grau de pertinência aos conjuntos fuzzy correspondentes, de referida variável.

Tabela 5.13 – Riscos individuais para o Açude Castanhão (Subsistema 1)

Subsistema 1 – Açude Castanhão – Riscos Individuais									
Tipos de Risco	Possibilidade de Ocorrência			Severidade das Consequências			Risco		
	Valor Numérico Discreto	Função de Pertinência		Valor Numérico Discreto	Função de Pertinência		Valor Numérico Discreto	Função de Pertinência	
		Conjunto Fuzzy	Grau ¹ (%)		Conjunto Fuzzy	Grau ¹ (%)		Conjunto Fuzzy	Grau ¹ (%)
1. Falha estrutural	30	Remota	100	62,50	Crítica	100	30,00	Menor	100,00
2. Contaminação da água ²	55	Improvável	75	43,75	Marginal	75	36,75	Menor	66,25
		Provável	25		Crítica	25		Moderado	33,75
3. Floração de cianobactérias	30	Remota	100	12,50	Desprezível	100	10,00	Desprezível	100,00
4. Sabotagem/Vandalismo	10	Extremamente Remota	100	62,50	Crítica	100	10,00	Desprezível	100,00

¹ Grau de pertinência ao conjunto fuzzy correspondente. / ² Contaminação da água (física, química ou biologicamente).

Fonte: Elaborada pelo autor.

Tabela 5.14 – Riscos individuais para o Açude Curral Velho (Subsistema 4)

Subsistema 4 – Açude Curral Velho – Riscos Individuais									
Tipos de Risco	Possibilidade de Ocorrência			Severidade das Consequências			Risco		
	Valor Numérico Discreto	Função de Pertinência		Valor Numérico Discreto	Função de Pertinência		Valor Numérico Discreto	Função de Pertinência	
		Conjunto Fuzzy	Grau ¹ (%)		Conjunto Fuzzy	Grau ¹ (%)		Conjunto Fuzzy	Grau ¹ (%)
1. Baixo nível de reservação	30	Remota	100	37,50	Marginal	100	10,00	Desprezível	100,00
2. Contaminação da água ²	55	Improvável	75	43,75	Marginal	75	36,75	Menor	66,25
		Provável	25		Crítica	25		Moderado	33,75
3. Contaminação por Cryptosporidium (gado)	30	Remota	100	37,50	Marginal	100	10,00	Desprezível	100,00
4. Floração de cianobactérias	30	Remota	100	12,50	Desprezível	100	10,00	Desprezível	100,00
5. Sabotagem/Vandalismo	10	Extremamente Remota	100	37,50	Marginal	100	10,00	Desprezível	100,00

¹ Grau de pertinência ao conjunto fuzzy correspondente. / ² Contaminação da água (física, química ou biologicamente).

Fonte: Elaborada pelo autor.

Tabela 5.15 – Riscos individuais para o Açude Pacajus (Subsistema 6)

Subsistema 6 – Açude Pacajus – Riscos Individuais									
Tipos de Risco	Possibilidade de Ocorrência			Severidade das Consequências			Risco		
	Valor Numérico Discreto	Função de Pertinência		Valor Numérico Discreto	Função de Pertinência		Valor Numérico Discreto	Função de Pertinência	
		Conjunto Fuzzy	Grau ¹ (%)		Conjunto Fuzzy	Grau ¹ (%)		Conjunto Fuzzy	Grau ¹ (%)
1. Baixo nível de reservação	30	Remota	100	37,50	Marginal	100	10,00	Desprezível	100,00
2. Contaminação da água ²	55	Improável	75	43,75	Marginal	75	36,75	Menor	66,25
		Provável	25		Crítica	25		Moderado	33,75
3. Contaminação por Cryptosporidium (gado)	30	Remota	100	37,50	Marginal	100	10,00	Desprezível	100,00
4. Floração de cianobactérias	30	Remota	100	37,50	Marginal	100	10,00	Desprezível	100,00
5. Sabotagem/Vandalismo	10	Extremamente Remota	100	37,50	Marginal	100	10,00	Desprezível	100,00

¹ Grau de pertinência ao conjunto fuzzy correspondente. / ² Contaminação da água (física, química ou biologicamente).

Fonte: Elaborada pelo autor.

Tabela 5.16 – Riscos individuais para os Açudes Pacoti e Riachão (Subsistema 9) e para o Açude Gavião (Subsistema 11)

Subsistema 9 – Açudes Pacoti e Riachão – Riscos Individuais / Subsistema 11 – Açude Riachão – Riscos Individuais									
Tipos de Risco	Possibilidade de Ocorrência			Severidade das Consequências			Risco		
	Valor Numérico Discreto	Função de Pertinência		Valor Numérico Discreto	Função de Pertinência		Valor Numérico Discreto	Função de Pertinência	
		Conjunto Fuzzy	Grau ¹ (%)		Conjunto Fuzzy	Grau ¹ (%)		Conjunto Fuzzy	Grau ¹ (%)
1. Baixo nível de reservação	30	Remota	100	62,50	Crítica	100	30,00	Menor	100,00
2. Contaminação da água ²	55	Improável	75	68,75	Crítica	75	55,45	Moderado	72,75
		Provável	25		Catastrófica	25		Sério	27,25
3. Contaminação por Cryptosporidium (gado)	30	Remota	100	62,50	Crítica	100	30,00	Menor	100,00
4. Floração de cianobactérias	30	Remota	100	37,50	Marginal	100	10,00	Desprezível	100,00
5. Sabotagem/Vandalismo	10	Extremamente Remota	100	62,50	Crítica	100	10,00	Desprezível	100,00

¹ Grau de pertinência ao conjunto fuzzy correspondente. / ² Contaminação da água (física, química ou biologicamente).

Fonte: Elaborada pelo autor.

Os valores de entrada e de saída para os tipos de risco dos demais subsistemas (2, 3, 5, 7, 8 e 10) não sofreram alterações, no que diz respeito à determinação dos riscos individuais. Seus valores são os mesmos já relacionados nas Tabelas 5.2, 5.3, 5.5, 5.7, 5.8 e 5.10.

Com os implementos, mesmo que de valores relativamente pequenos, para as variáveis de entrada *Possibilidade de Ocorrência* (5,00%) e *Severidade das Consequências* (6,25%), são obtidos valores de saída para o *Risco* com pertença também a dois conjuntos fuzzy.

Analisando os resultados, verifica-se que, para o Açude Castanhão, o Açude Curral Velho e o Açude Pacajus (subsistemas 1, 4 e 6), o valor do risco, dentro da escala proposta, é $R = 36,75$, que corresponde uma pertinência de 66,25% ao conjunto fuzzy *menor* e 33,75% ao *moderado*. Já para os Açudes Pacoti e Riachão e para o Açude Gavião (subsistemas 9 e 11) o nível de risco é $R = 55,45$, correspondendo a um pertencimento de 72,75% ao conjunto *moderado* e 27,25% ao *sério*.

O que se pretende destacar é que, dentre tantas imprecisões e incertezas nas informações ou nas estimativas dos dados a serem avaliados, para a definição de apenas cinco termos para a frequência e quatro para o impacto, valores intermediários também podem ser estabelecidos na metodologia fuzzy. Da mesma forma, o resultado obtido, isto é, o nível de risco, não fica limitado a apenas cinco definições.

São dados de entrada que seriam possíveis de ser indicados pelos colaboradores da COGERH, se dispusessem de uma escala contínua de valores. Por ser uma escolha subjetiva, mesmo que fundamentada na Análise Preliminar de Perigos (APP), que é passível de sofrer calibrações, valores distintos poderiam ser sugeridos partindo-se de uma maior gama de opções.

5.2.2 Riscos dos subsistemas

Os resultados para os níveis de risco nos subsistemas 1, 4, 6, 9 e 11 são apresentados na Tabela 5.17. Os valores dos riscos para os demais subsistemas, como era de se esperar, não sofrem alterações.

Analisando especificamente os subsistemas que possuem os maiores níveis de risco, ou seja, os Açudes Pacoti e Riachão e o Açude Gavião, respectivamente, o Subsistema

9 e o Subsistema 11, observa-se que é obtido o mesmo valor numérico discreto para o risco e que o mesmo é $R = 33,80$. Este resultado corresponde a uma pertença de 81,00% e 19,00%, de maneira recíproca, às funções de pertinência de saída *menor* e *moderado*. Pode-se dizer que, mesmo com as adaptações nos dados de entrada, estes subsistemas são confiáveis.

Tabela 5.17 – Riscos dos subsistemas 1, 4, 6, 9 e 11 para o caso dos antecedentes com grau de pertinência a dois conjuntos fuzzy

Sistema de Aporte de Água Bruta para a Região Metropolitana de Fortaleza (SAAB/RMF)			
Riscos dos Subsistemas			
Subsistemas	Valor Numérico Discreto	Risco	
		Função de Pertinência	
		Conjunto Fuzzy	Grau¹ (%)
1. Açude Castanhão	27,30	Desprezível	13,50
		Menor	86,50
4. Açude Curral Velho	26,65	Desprezível	16,75
		Menor	83,25
6. Açude Pacajus	26,65	Desprezível	16,75
		Menor	83,25
9. Açudes Pacoti e Riachão	33,80	Menor	81,00
		Moderado	19,00
11. Açude Gavião	33,80	Menor	81,00
		Moderado	19,00

¹ Grau de pertinência ao conjunto fuzzy correspondente.

Fonte: Elaborada pelo autor.

5.2.3 *Risco global do sistema*

O risco global do sistema, nesta avaliação, é $R = 34,6$, de acordo com a escala proposta, que representa um pertencimento de 77% e de 23%, na devida ordem, às funções de pertinência *menor* e *moderado* da variável *Risco*. No caso anterior (Seção 5.1) este nível de risco foi $R = 30$, que correspondeu a uma pertença de 100% ao conjunto fuzzy *menor* de referida variável.

Neste novo cenário, mesmo com o acréscimo do valor obtido para a variável *Risco*, o SAAB/RMF pode ainda ser considerado um sistema confiável, no que diz respeito à frequência de ocorrência de acidentes, aos respectivos impactos e aos riscos associados.

5.3 Antecedentes impostados por meio de intervalos de confiança triangulares

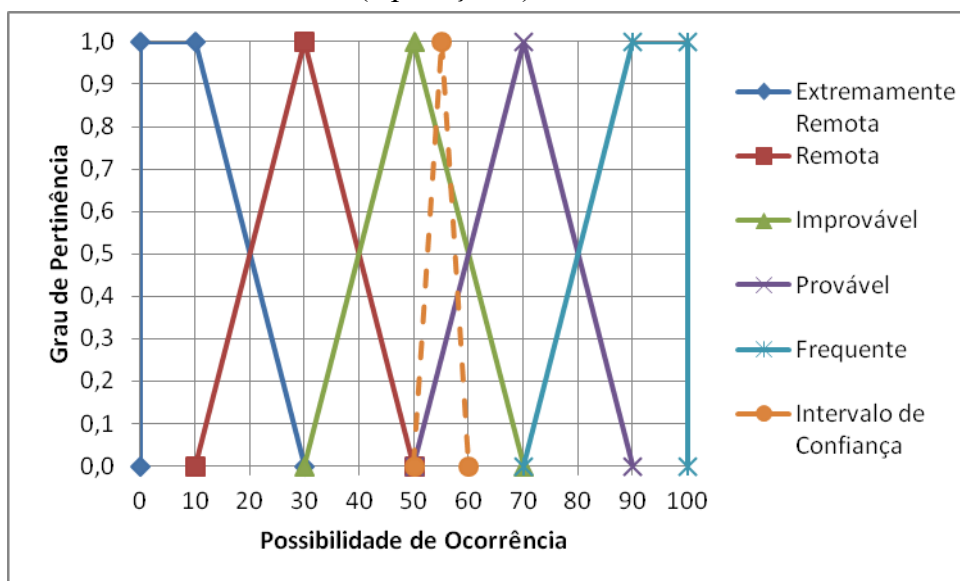
Visando dar continuidade à análise de sensibilidade da metodologia proposta, como também de demonstrar a flexibilidade de análise do programa Risco-Fuzzy, são apresentadas duas aplicações em que os antecedentes são impostados por meio de intervalos de confiança triangulares. A margem de confiança permitida para os dados de entrada foi levada em conta em virtude das incertezas e imprecisões na obtenção dos mesmos, como já foi explanado anteriormente.

Nestas avaliações são considerados os mesmos valores de referência, para os antecedentes, que foram utilizados na Seção 5.2 para os subsistemas 1, 4, 6, 9 e 11. Para a *Possibilidade de Ocorrência*, o vértice superior do triângulo do intervalo de confiança é o valor $PO = 55$, sendo o mesmo equilátero, nos cinco subsistemas. Na *Severidade das Consequências*, o triângulo equilátero tem como vértice superior os valores $SC = 43,75$ e $SC = 68,75$, de maneira recíproca, para os subsistemas 1, 4 e 6 e para os subsistemas 6, 9 e 11.

5.3.1 Aplicação 1

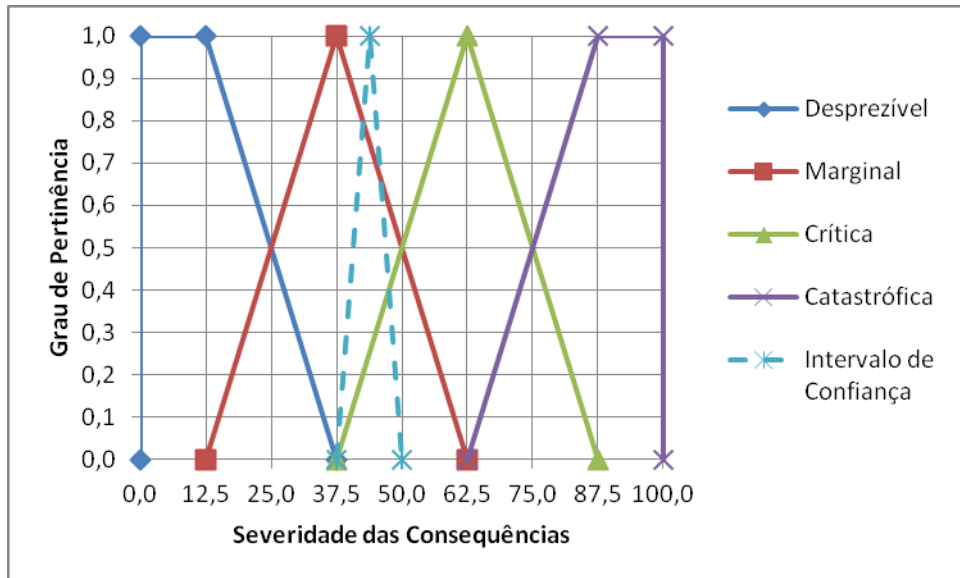
A primeira aplicação utiliza como antecedentes os intervalos de confiança triangulares que são mostrados nas Figuras 5.2 a 5.4.

Figura 5.2 – Entrada da variável *Possibilidade de Ocorrência* por meio de um intervalo de confiança triangular para a contaminação da água nos subsistemas 1, 4, 6, 9 e 11 (Aplicação 1)



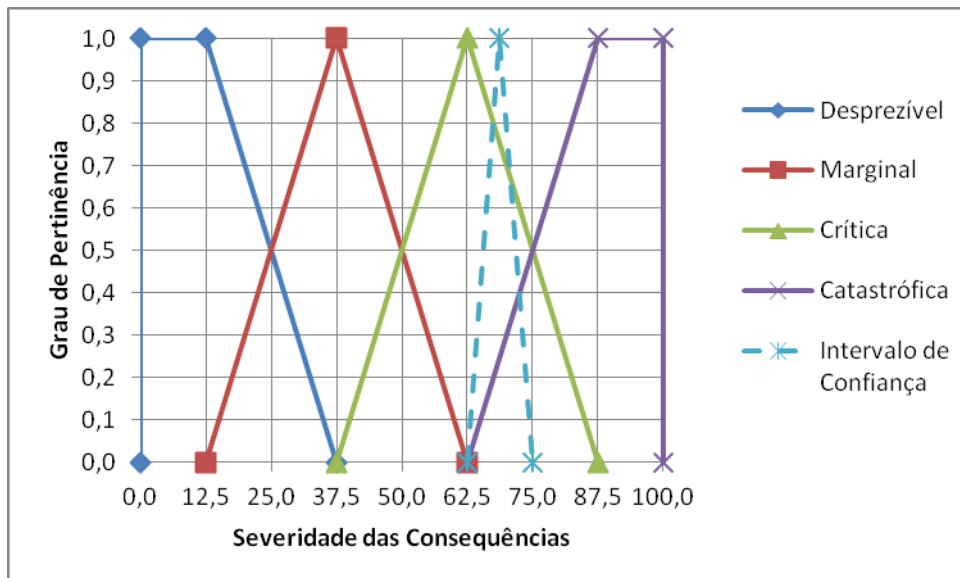
Fonte: Elaborada pelo autor.

Figura 5.3 – Entrada da variável *Severidade das Consequências* por meio de um intervalo de confiança triangular para a contaminação da água nos subsistemas 1, 4 e 6 (Aplicação 1)



Fonte: Elaborada pelo autor.

Figura 5.4 – Entrada da variável *Severidade das Consequências* por meio de um intervalo de confiança triangular para a contaminação da água nos subsistemas 9 e 11 (Aplicação 1)



Fonte: Elaborada pelo autor.

Para os subsistemas considerados acima, os valores da variável *Risco* e o grau de pertinência ao conjunto fuzzy correspondente são apresentados na Tabela 5.18. Nesta são exibidos também os dados dos antecedentes onde é possível visualizar vértices dos triângulos dos conjuntos fuzzy relativos aos intervalos de confiança.

Tabela 5.18 – Riscos individuais para os antecedentes impostados por meio de intervalos de confiança triangulares nos subsistemas 1, 4, 6, 9 e 11 (Aplicação 1)

Antecedentes Impostados por meio de Intervalos de Confiança Triangulares							
Tipo de risco: Contaminação da água (física, química ou biologicamente)							
Subsistema	Possibilidade de Ocorrência		Severidade das Consequências		Risco		
	Intervalo de Confiança Triangular	Funções de Pertinência Correspondentes	Intervalo de Confiança Triangular	Funções de Pertinência Correspondentes	Valor Numérico Discreto	Função de Pertinência	Grau ¹ (%)
1. Açude Castanhão	[50; 55; 60]	Improvável	[37,50; 43,75; 50,00]	Marginal	42,00	Menor	40,00
		Provável		Crítica		Moderado	60,00
4. Açude Curral Velho	[50; 55; 60]	Improvável	[37,50; 43,75; 50,00]	Marginal	42,00	Menor	40,00
		Provável		Crítica		Moderado	60,00
6. Açude Pacajus	[50; 55; 60]	Improvável	[37,50; 43,75; 50,00]	Marginal	42,00	Menor	40,00
		Provável		Crítica		Moderado	60,00
9. Açude Pacoti e Riachão	[50; 55; 60]	Improvável	[62,50; 68,75; 75,00]	Crítica	59,45	Moderado	52,75
		Provável		Catastrófica		Sério	47,25
11. Açude Gavião	[50; 55; 60]	Improvável	[62,50; 68,75; 75,00]	Crítica	59,45	Moderado	52,75
		Provável		Catastrófica		Sério	47,25

¹ Grau de pertinência ao conjunto fuzzy correspondente.

Fonte: Elaborada pelo autor.

Tabela 5.19 – Riscos dos subsistemas 1, 4, 6, 9 e 11 para o caso dos antecedentes impostados por meio de intervalos de confiança triangulares (Aplicação 1)

Sistema de Aporte de Água Bruta para a Região Metropolitana de Fortaleza (SAAB/RMF)			
Riscos dos Subsistemas			
Subsistema	Valor Numérico Discreto	Risco	
		Função de Pertinência	
		Conjunto Fuzzy	Grau ¹ (%)
1. Açude Castanhão	30,5	Menor	97,5
		Moderado	2,5
4. Açude Curral Velho	30,6	Menor	97,0
		Moderado	3,0
6. Açude Pacajus	30,6	Menor	97,0
		Moderado	3,0
9. Açudes Pacoti e Riachão	38,0	Menor	60,0
		Moderado	40,0
11. Açude Gavião	38,0	Menor	60,0
		Moderado	40,0

¹ Grau de pertinência ao conjunto fuzzy correspondente.

Fonte: Elaborada pelo autor.

A Tabela 5.19, por sua vez, apresenta os valores dos riscos nos subsistemas estudados. Além do valor real obtido para o nível de risco, de acordo com a escala proposta, são também mostrados os graus de pertinência aos conjuntos fuzzy correspondentes.

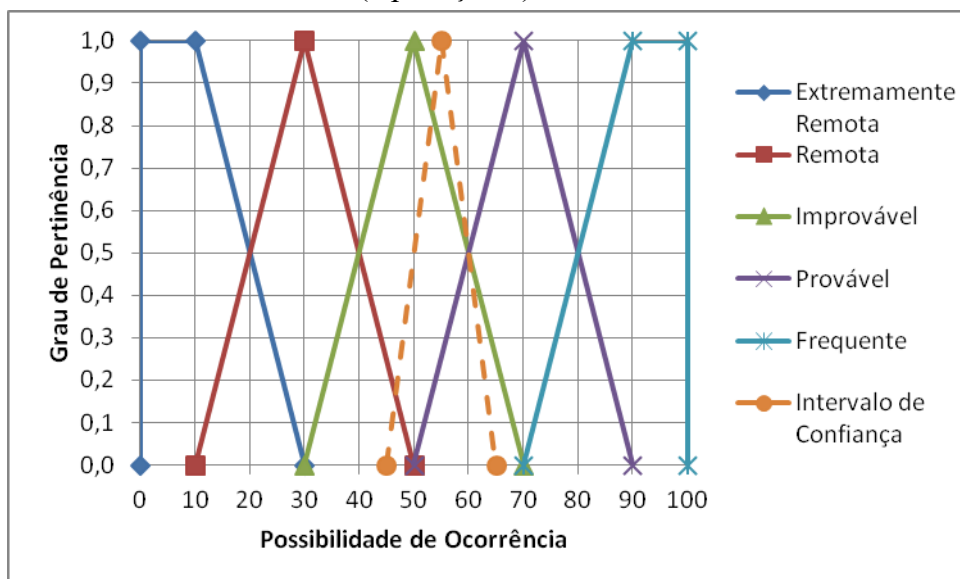
Neste caso, o risco global do sistema é $R = 38,65$, que corresponde a uma pertença de 56,75% ao conjunto fuzzy *menor* e 43,25% ao *moderado*. O valor do risco global do SAAB/RMF na Seção 5.2, que se utilizou como referência, foi $R = 34,6$. Como era de se esperar, quanto maior a incerteza nas informações de entrada, um maior valor numérico será obtido para a variável *Risco*, após a defuzzificação.

5.3.2 Aplicação 2

Esta segunda aplicação é semelhante à anterior, considerando-se apenas uma maior área para os conjuntos fuzzy dos antecedentes, *Possibilidade de Ocorrência* e *Severidade das Consequências*, nos subsistemas 1, 4, 6, 9 e 11 no que diz respeito ao tipo de risco relativo à contaminação da água (física, química ou biologicamente). A finalidade é a obtenção do valor que será acrescido ao risco global do sistema à medida em que se aumentam as imprecisões dos dados de entrada.

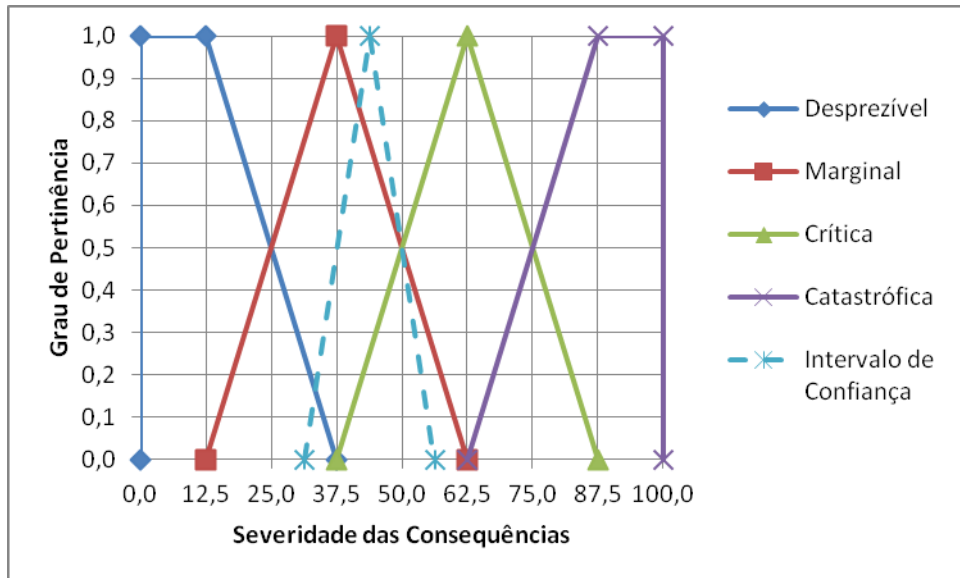
Os intervalos de confiança triangulares, para esta segunda aplicação, são exibidos nos gráficos das Figuras 5.5 a 5.7.

Figura 5.5 – Entrada da variável *Possibilidade de Ocorrência* por meio de um intervalo de confiança triangular para a contaminação da água nos subsistemas 1, 4, 6, 9 e 11 (Aplicação 2)



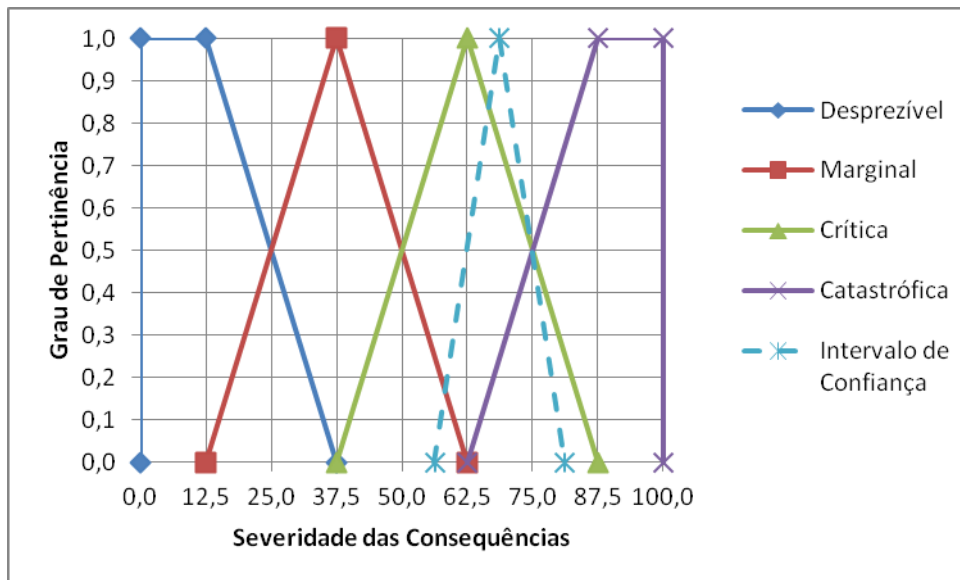
Fonte: Elaborada pelo autor.

Figura 5.6 – Entrada da variável *Severidade das Consequências* por meio de um intervalo de confiança triangular para a contaminação da água nos subsistemas 1, 4 e 6 (Aplicação 2)



Fonte: Elaborada pelo autor.

Figura 5.7 – Entrada da variável *Severidade das Consequências* por meio de um intervalo de confiança triangular para a contaminação da água nos subsistemas 9 e 11 (Aplicação 2)



Fonte: Elaborada pelo autor.

A Tabela 5.20 mostra os valores dos riscos individuais para os subsistemas considerados e o percentual de pertencimento aos conjuntos fuzzy correspondentes. Também podem ser observados na mesma os vértices dos triângulos das funções de pertinência de entrada.

Tabela 5.20 – Riscos individuais para os antecedentes impostados por meio de intervalos de confiança triangulares nos subsistemas 1, 4, 6, 9 e 11 (Aplicação 2)

Antecedentes Impostados por meio de Intervalos de Confiança Triangulares							
Tipo de risco: Contaminação da água (física, química ou biologicamente)							
Subsistema	Possibilidade de Ocorrência		Severidade das Consequências		Valor Numérico Discreto	Risco	
	Intervalo de Confiança Triangular	Funções de Pertinência Correspondentes	Intervalo de Confiança Triangular	Funções de Pertinência Correspondentes		Conjunto Fuzzy	Grau ¹ (%)
1. Açude Castanhão	[45; 55; 65]	Remota Improvável Provável	[31,25; 43,75; 56,25]	Desprezível Marginal Crítica	43,60	Menor	32,00
						Moderado	68,00
4. Açude Curral Velho	[45; 55; 65]	Remota Improvável Provável	[31,25; 43,75; 56,25]	Desprezível Marginal Crítica	43,60	Menor	32,00
						Moderado	68,00
6. Açude Pacajus	[45; 55; 65]	Remota Improvável Provável	[31,25; 43,75; 56,25]	Desprezível Marginal Crítica	43,60	Menor	32,00
						Moderado	68,00
9. Açude Pacoti e Riachão	[45; 55; 65]	Remota Improvável Provável	[56,25; 68,75; 81,25]	Marginal Crítica Catastrófica	58,05	Moderado	59,75
						Sério	40,25
11. Açude Gavião	[45; 55; 65]	Remota Improvável Provável	[56,25; 68,75; 81,25]	Marginal Crítica Catastrófica	58,05	Moderado	59,75
						Sério	40,25

¹ Grau de pertinência ao conjunto fuzzy correspondente.

Fonte: Elaborada pelo autor.

Tabela 5.21 – Riscos dos subsistemas 1, 4, 6, 9 e 11 para o caso dos antecedentes impostados por meio de intervalos de confiança triangulares (Aplicação 2)

Sistema de Aporte de Água Bruta para a Região Metropolitana de Fortaleza (SAAB/RMF)			
Riscos dos Subsistemas			
Subsistema	Valor Numérico Discreto	Risco	
		Função de Pertinência	
		Conjunto Fuzzy	Grau ¹ (%)
1. Açude Castanhão	32,65	Menor	86,75
		Moderado	13,25
4. Açude Curral Velho	33,00	Menor	85,00
		Moderado	15,00
6. Açude Pacajus	33,00	Menor	85,00
		Moderado	15,00
9. Açudes Pacoti e Riachão	41,75	Menor	41,25
		Moderado	58,75
11. Açude Gavião	41,75	Menor	41,25
		Moderado	58,75

¹ Grau de pertinência ao conjunto fuzzy correspondente.

Fonte: Elaborada pelo autor.

Os valores dos riscos dos subsistemas avaliados são detalhados na Tabela 5.21, onde também são indicados os graus de pertencimento dos mesmos aos conjuntos fuzzy correspondentes.

O risco global do sistema, para esta segunda aplicação em que se levou em conta a impostação dos dados por intermédio de intervalos de confiança triangulares, é $R = 42,25$, equivalendo a graus de pertinência de 38,75% e 61,25%, respectivamente, aos termos *menor* e *moderado* da variável linguística *Risco*. Na primeira aplicação este valor foi $R = 38,65$ que, como esperado, foi razoavelmente menor que o do caso atual.

Nesta segunda aplicação é interessante observar também que, diferentemente do que ocorreu no caso anterior, o valor real da variável *Risco* possui uma maior pertença ao conjunto fuzzy *moderado* que ao *menor*.

5.4 Antecedentes impostados por meio de intervalos de confiança trapezoidais

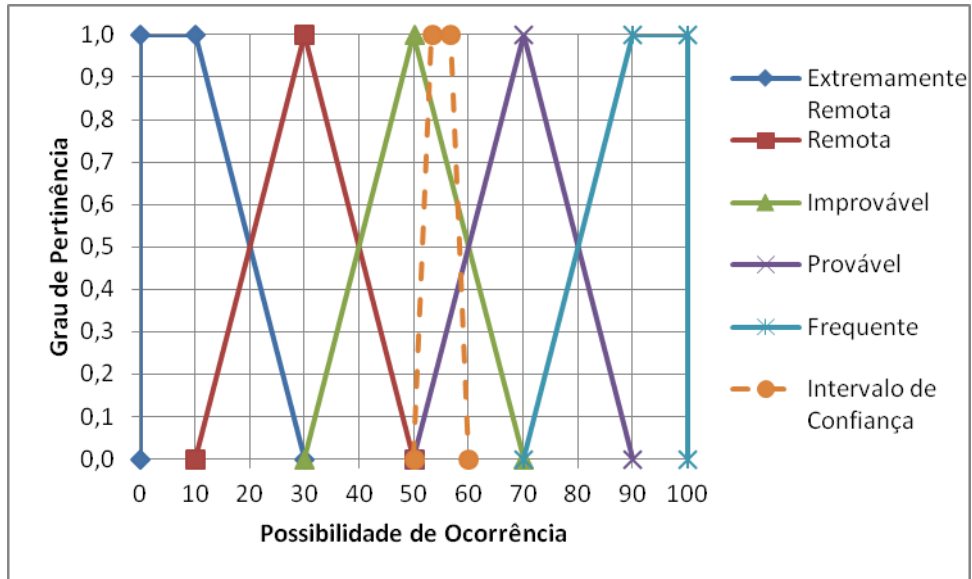
Objetivando ainda a continuação da análise de sensibilidade da metodologia fuzzy proposta, como também com o intento de apresentar todas as possibilidades de entrada de dados e de processamento do software Risco-Fuzzy, são mostradas, no texto que se segue, duas aplicações onde as condições são informadas por meio de intervalos de confiança trapezoidais. Como já comentado em outras oportunidades ao longo deste trabalho, esta margem de confiança é considerada por causa das imprecisões e incertezas que sempre surgem na definição dos dados de entrada.

Como no caso dos dados fornecidos por intermédio de intervalos de confiança triangulares, foram usados como referência para os antecedentes, para os subsistemas 1, 4, 6, 9 e 11, os dados usados na Seção 5.2. Em cada uma das aplicações, o conjunto fuzzy trapezoidal é simétrico em torno do valor $PO = 55$ para a *Possibilidade de Ocorrência* nos cinco subsistemas. Para a *Severidade das Consequências*, os trapézios também possuem simetria em ambos os exemplos, sendo que a mesma ocorre em torno do valor $SC = 43,75$, nos subsistemas 1, 4 e 6, e em torno de $SC = 68,75$, nos subsistemas 6, 9 e 11. Na segunda aplicação as funções de pertinência trapezoidais possuem uma maior área.

5.4.1 Aplicação 1

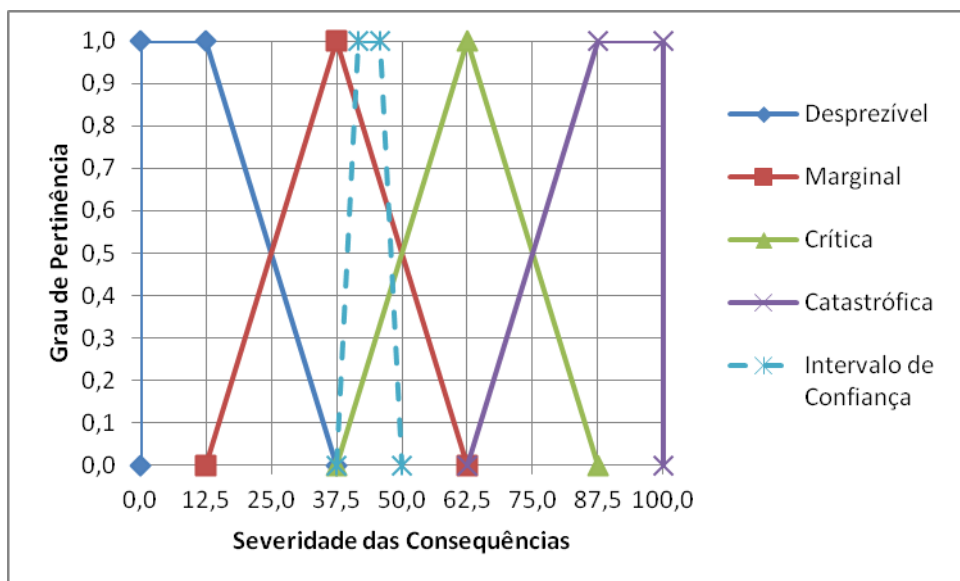
Os antecedentes que são utilizados nesta primeira aplicação são os apresentados nas Figuras 5.8 a 5.10.

Figura 5.8 – Entrada da variável *Possibilidade de Ocorrência* por meio de um intervalo de confiança trapezoidal para a contaminação da água nos subsistemas 1, 4, 6, 9 e 11 (Aplicação 1)



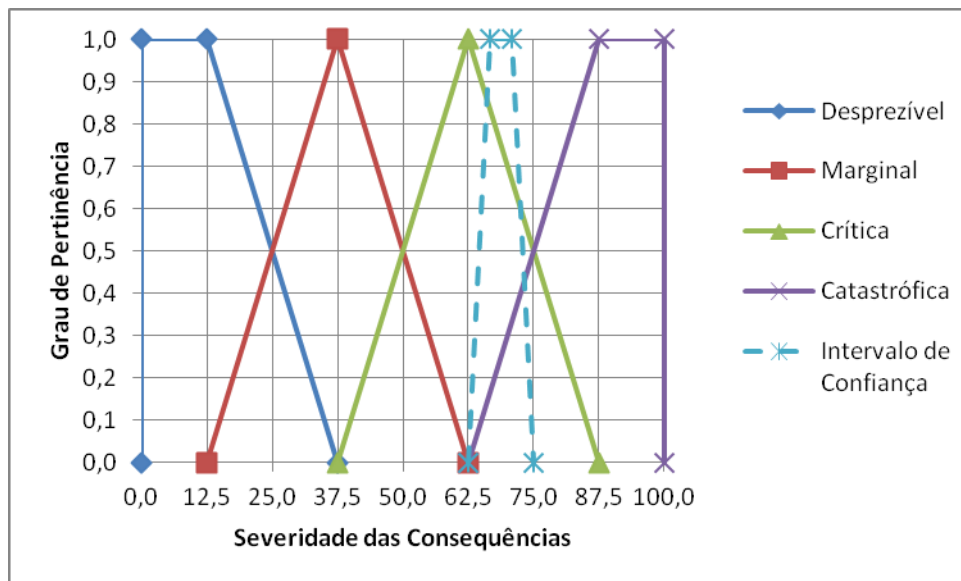
Fonte: Elaborada pelo autor.

Figura 5.9 – Entrada da variável *Severidade das Conseqüências* por meio de um intervalo de confiança trapezoidal para a contaminação da água nos subsistemas 1, 4 e 6 (Aplicação 1)



Fonte: Elaborada pelo autor.

Figura 5.10 – Entrada da variável *Severidade das Consequências* por meio de um intervalo de confiança trapezoidal para a contaminação da água nos subsistemas 9 e 11 (Aplicação 1)



Fonte: Elaborada pelo autor.

A Tabela 5.22 mostra os valores dos riscos individuais e o grau de pertencimento aos conjuntos fuzzy correspondentes, nesta primeira aplicação em que os dados são fornecidos por meio de funções de pertinência trapezoidais.

Tabela 5.22 – Riscos individuais para os antecedentes impostados por meio de intervalos de confiança trapezoidais nos subsistemas 1, 4, 6, 9 e 11 (Aplicação 1)

Antecedentes Impostados por meio de Intervalos de Confiança Trapezoidais							
Tipo de risco: Contaminação da água (física, química ou biologicamente)							
Subsistema	Possibilidade de Ocorrência		Severidade das Consequências		Risco		
	Intervalo de Confiança Trapezoidal	Funções de Pertinência Correspondentes	Intervalo de Confiança Trapezoidal	Funções de Pertinência Correspondentes	Valor Numérico Discreto	Conjunto Fuzzy	Grau ¹ (%)
1. Açude Castanhão	[50,00; 53,33; 56,67; 60,00]	Improvável	[37,50; 41,67; 45,83; 50,00]	Marginal	42,85	Menor	35,75
		Provável		Crítica		Moderado	64,25
4. Açude Curral Velho	[50,00; 53,33; 56,67; 60,00]	Improvável	[37,50; 41,67; 45,83; 50,00]	Marginal	42,85	Menor	35,75
		Provável		Crítica		Moderado	64,25
6. Açude Pacajus	[50,00; 53,33; 56,67; 60,00]	Improvável	[37,50; 41,67; 45,83; 50,00]	Marginal	42,85	Menor	35,75
		Provável		Crítica		Moderado	64,25
9. Açude Pacoti e Riachão	[50,00; 53,33; 56,67; 60,00]	Improvável	[62,50; 66,67; 70,83; 75,00]	Crítica	60,10	Moderado	49,50
		Provável		Catastrófica		Sério	50,50
11. Açude Gavião	[50,00; 53,33; 56,67; 60,00]	Improvável	[62,50; 66,67; 70,83; 75,00]	Crítica	60,10	Moderado	49,50
		Provável		Catastrófica		Sério	50,50

¹ Grau de pertinência ao conjunto fuzzy correspondente.

Fonte: Elaborada pelo autor.

Os vértices dos trapézios, relativos aos dados de entrada, também podem ser vistos na Tabela 5.22.

Na Tabela 5.23 são relacionados os valores numéricos discretos dos níveis de risco dos cinco subsistemas considerados com a sua pertença aos conjuntos fuzzy que lhe são equivalentes.

Tabela 5.23 – Riscos dos subsistemas 1, 4, 6, 9 e 11 para o caso dos antecedentes impostados por meio de intervalos de confiança trapezoidais (Aplicação 1)

Sistema de Aporte de Água Bruta para a Região Metropolitana de Fortaleza (SAAB/RMF)			
Riscos dos Subsistemas			
Subsistema	Valor Numérico Discreto	Risco	
		Função de Pertinência	
		Conjunto Fuzzy	Grau¹ (%)
1. Açude Castanhão	31,05	Menor	94,75
		Moderado	5,25
4. Açude Curral Velho	31,20	Menor	94,00
		Moderado	6,00
6. Açude Pacajus	31,20	Menor	94,00
		Moderado	6,00
9. Açudes Pacoti e Riachão	39,25	Menor	53,75
		Moderado	46,25
11. Açude Gavião	39,25	Menor	53,75
		Moderado	46,25

¹ Grau de pertinência ao conjunto fuzzy correspondente.

Fonte: Elaborada pelo autor.

Nesta primeira aplicação, o valor do risco global obtido para o sistema é $R = 39,65$, que corresponde a um grau de pertinência de 51,75% ao conjunto fuzzy *menor* e 48,25% ao *moderado*. O valor do risco global do SAAB/RMF, avaliado na Seção 5.2 e que se usou como referência, foi $R = 34,6$. Como esperado, quanto maior a margem de incerteza, ou seja, quanto maior a área das funções de pertinência que forem utilizadas como dados de entrada, ao invés de valores reais, maior o nível de risco obtido como resultado.

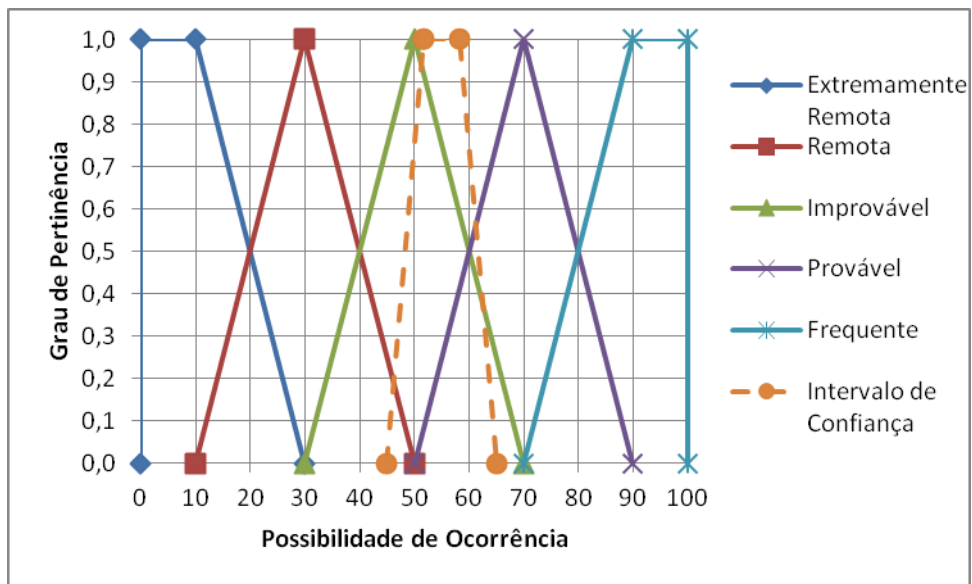
5.4.2 Aplicação 2

Semelhante à Aplicação 1, esta segunda leva em conta apenas uma maior área para as funções de pertinências trapezoidais das condições, *Possibilidade de Ocorrência* e

Severidade das Consequências, nos subsistemas 1, 4, 6, 9 e 11, com relação à contaminação da água. Pretende-se avaliar o acréscimo que será obtido para o risco global do SAAB/RMF.

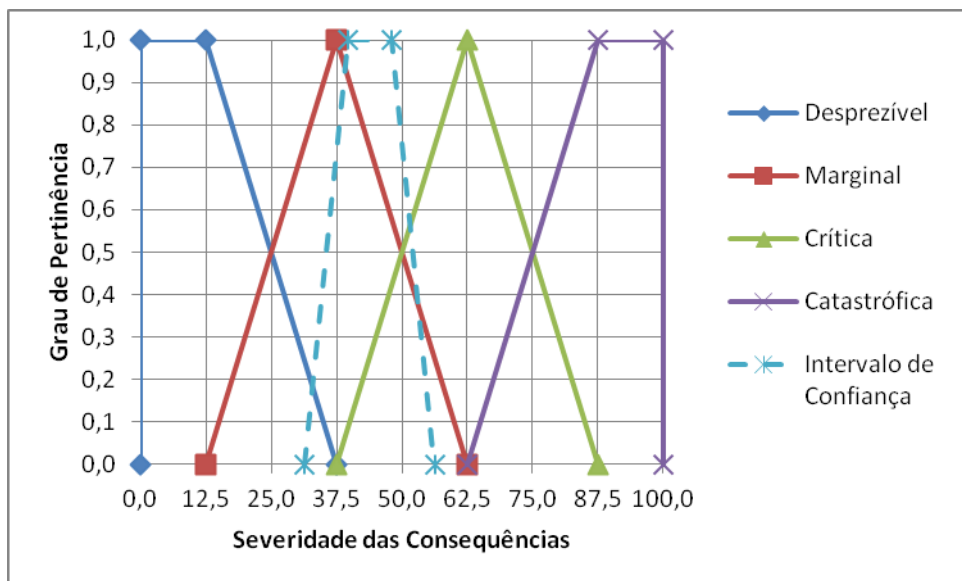
Os intervalos de confiança trapezoidais de entrada desta segunda aplicação são mostrados nos gráficos das Figuras 5.11 a 5.13.

Figura 5.11 – Entrada da variável *Possibilidade de Ocorrência* por meio de um intervalo de confiança trapezoidal para a contaminação da água nos subsistemas 1, 4, 6, 9 e 11 (Aplicação 2)



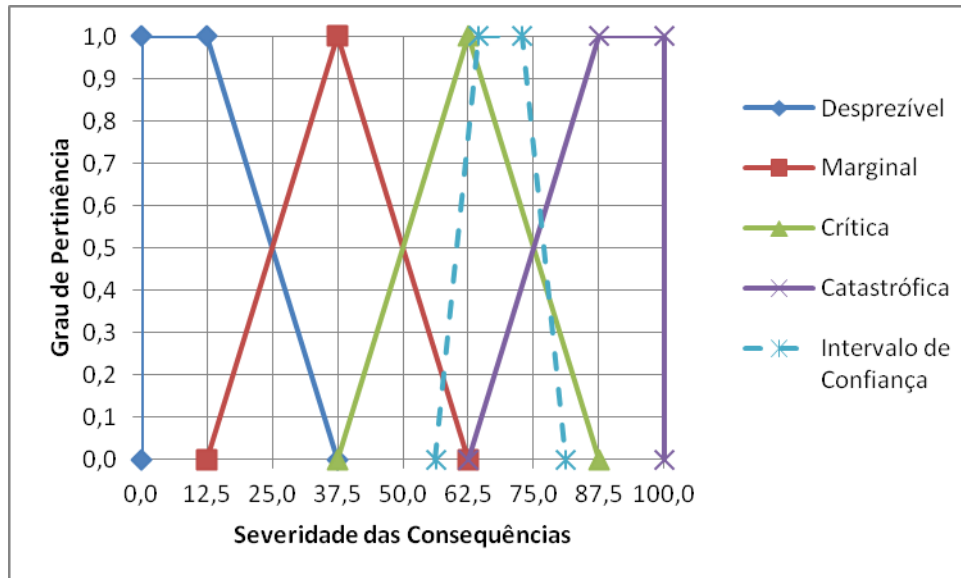
Fonte: Elaborada pelo autor.

Figura 5.12 – Entrada da variável *Severidade das Consequências* por meio de um intervalo de confiança trapezoidal para a contaminação da água nos subsistemas 1, 4 e 6 (Aplicação 2)



Fonte: Elaborada pelo autor.

Figura 5.13 – Entrada da variável *Severidade das Consequências* por meio de um intervalo de confiança trapezoidal para a contaminação da água nos subsistemas 9 e 11 (Aplicação 2)



Fonte: Elaborada pelo autor.

Tabela 5.24 – Riscos individuais para os antecedentes impostados por meio de intervalos de confiança trapezoidais nos subsistemas 1, 4, 6, 9 e 11 (Aplicação 2)

Antecedentes Impostados por meio de Intervalos de Confiança Trapezoidais							
Tipo de risco: Contaminação da água (física, química ou biologicamente)							
Subsistema	Possibilidade de Ocorrência		Severidade das Consequências		Risco		
	Intervalo de Confiança Trapezoidal	Funções de Pertinência Correspondentes	Intervalo de Confiança Trapezoidal	Funções de Pertinência Correspondentes	Valor Numérico Discreto	Função de Pertinência Conjunto Fuzzy	Grau ¹ (%)
1. Açude Castanhão	[45,00; 51,67; 58,33; 65,00]	Remota Improvável Provável	[31,25; 39,58; 47,92; 56,25]	Desprezível Marginal Crítica	44,70	Menor	26,50
						Moderado	73,50
4. Açude Curral Velho	[45,00; 51,67; 58,33; 65,00]	Remota Improvável Provável	[31,25; 39,58; 47,92; 56,25]	Desprezível Marginal Crítica	44,70	Menor	26,50
						Moderado	73,50
6. Açude Pacajus	[45,00; 51,67; 58,33; 65,00]	Remota Improvável Provável	[31,25; 39,58; 47,92; 56,25]	Desprezível Marginal Crítica	44,70	Menor	26,50
						Moderado	73,50
9. Açude Pacoti e Riachão	[45,00; 51,67; 58,33; 65,00]	Remota Improvável Provável	[56,25; 64,58; 72,92; 81,25]	Marginal Crítica Catastrófica	59,05	Moderado	54,75
						Sério	45,25
11. Açude Gavião	[45,00; 51,67; 58,33; 65,00]	Remota Improvável Provável	[56,25; 64,58; 72,92; 81,25]	Marginal Crítica Catastrófica	59,05	Moderado	54,75
						Sério	45,25

¹ Grau de pertinência ao conjunto fuzzy correspondente.

Fonte: Elaborada pelo autor.

A Tabela 5.24 relaciona os resultados que são obtidos para os riscos individuais para os subsistemas considerados e o percentual de pertencimento aos conjuntos fuzzy que lhe

são equivalentes. Também podem ser vistos na mesma os vértices dos trapézios das funções de pertinência de entrada.

Os valores dos riscos dos subsistemas considerados são discriminados na Tabela 5.25, onde também são informados os graus de pertencimento destes aos conjuntos fuzzy correspondentes.

Tabela 5.25 – Riscos dos subsistemas 1, 4, 6, 9 e 11 para o caso dos antecedentes impostados por meio de intervalos de confiança trapezoidais (Aplicação 2)

Sistema de Aporte de Água Bruta para a Região Metropolitana de Fortaleza (SAAB/RMF)			
Riscos dos Subsistemas			
Subsistema	Valor Numérico Discreto	Risco	
		Função de Pertinência	
		Conjunto Fuzzy	Grau¹ (%)
1. Açude Castanhão	34,05	Menor	79,75
		Moderado	20,25
4. Açude Curral Velho	34,10	Menor	79,50
		Moderado	20,50
6. Açude Pacajus	34,10	Menor	79,50
		Moderado	20,25
9. Açudes Pacoti e Riachão	44,00	Menor	30,00
		Moderado	70,00
11. Açude Gavião	44,00	Menor	30,00
		Moderado	70,00

¹ Grau de pertinência ao conjunto fuzzy correspondente.

Fonte: Elaborada pelo autor.

Nesta segunda aplicação, para os dados informados por meio de intervalos de confiança trapezoidais, o risco global do SAAB/RMF é $R = 44,05$, que corresponde a um pertencimento de 29,75% e de 70,25%, na devida ordem, aos conjuntos fuzzy *menor* e *moderado* do conseqüente *Risco*. Na primeira aplicação este valor foi $R = 39,65$ que, como se esperava, foi razoavelmente menor que o do caso atual.

É interessante observar ainda, diferentemente do que ocorreu no caso da Aplicação 1, que o valor numérico discreto da variável *Risco* possui uma pertinência maior ao conjunto fuzzy *moderado* que ao *menor*.

5.5 Risco global do sistema considerando a relevância de subsistemas

Na avaliação deste caso, foi considerado o cenário de uma época de cheia (TABELA 4.1), em que apenas os subsistemas 8, 9, 10 e 11, respectivamente, Canal do Ererê, Açudes Pacoti e Riachão, Sistema de Túneis e Açude Gavião, os mais próximos à RMF, fossem necessários para garantir o abastecimento de água. A estes subsistema foi admitida uma relevância $RS = 1,0$, enquanto que, a todos os demais, foi considerado o valor $RS = 0,0$.

Os dados levados em conta para esta análise foram os utilizados na Seção 5.2, que corresponde ao caso dos antecedentes com grau de pertinência a dois conjuntos fuzzy e com dados de entrada informados por intermédio de valores numéricos discretos.

Obteve-se como resultado o risco global do sistema $R = 33,8$ (81% e 19% de pertença às funções de pertinência *menor* e *moderado*, de maneira recíproca). Na Seção 5.2 o valor obtido foi $R = 34,6$.

A diferença obtida entre as duas análises não foi, portanto, significativa. Este fato ocorre em virtude do sistema estudado possuir a grande maioria dos tipos de risco classificados como *desprezível* e *menor*, dentre os 58 (cinquenta e oito) que foram levados em conta. Apenas 5 (cinco) riscos individuais são classificados como *moderado*. Na etapa de inferência, na metodologia fuzzy, as uniões de referidos conjuntos ocorre sempre em uma mesma região do universo de discurso.

Em outros subsistemas, subdivididos em três níveis como o SAAB/RMF, e que venham a ser avaliados com a metodologia proposta e com o programa desenvolvido (Risco-Fuzzy), resultados mais expressivos podem vir a ser obtidos com a consideração da relevância de subsistemas.

É importante também salientar que, se se dispusesse de um maior número de funções de pertinência para a variável linguística *Risco*, respostas mais apuradas poderiam vir a ser obtidas. Simões e Shaw (2007, p. 46) esclarecem que “experiências mostram que uma mudança de 5 conjuntos triangulares para 7 aumenta a precisão em torno de uns 15%.”

A ABNT (2012) avalia tipos de técnicas do processo de avaliação de riscos, exemplificando, inclusive, tabelas de critérios de possibilidade e de critérios de consequência e de uma matriz de classificação de riscos.

5.6 Análise de sensibilidade da metodologia proposta por meio da comparação dos resultados obtidos anteriormente

Com o intuito de se visualizar a variação dos valores reais obtidos para o risco global do sistema, que foram avaliados nas diversas aplicações realizadas ao longo deste Capítulo 5, com a finalidade de se realizar a análise de sensibilidade da metodologia proposta, como também de se verificar a flexibilidade do programa Risco-Fuzzy, referidos resultados são exibidos na Tabela 5.26.

É importante se observar que, à medida que as estimativas dos dados de entrada considerados sejam mais imprecisos e/ou incertos, obtém-se um maior valor numérico discreto para a variável linguística *Risco*. É também interessante se verificar que à medida que aumenta o valor desta variável, maior o grau de pertinência ao conjunto fuzzy *moderado* em relação ao conjunto fuzzy *menor*.

Tabela 5.26 – Análise de sensibilidade da metodologia proposta por meio da comparação dos resultados obtidos anteriormente

Sistema de Aporte de Água Bruta para a Região Metropolitana de Fortaleza (SAAB/RMF)				
Risco Global do Sistema				
Antecedentes	Avaliado na Seção	Risco		
		Valor Numérico Discreto	Grau de Pertinência ¹ (%)	
			Menor	Moderado
Considerando a relevância de subsistemas ^{2,3}	5.5	33,80	81,00	19,00
Grau de pertinência a dois conjuntos fuzzy ²	5.2	34,60	77,00	23,00
Intervalos de confiança triangulares (Aplicação 1)	5.3.1	38,65	56,75	43,25
Intervalos de confiança trapezoidais (Aplicação 1)	5.4.1	39,65	51,75	48,25
Intervalos de confiança triangulares (Aplicação 2)	5.3.2	42,25	38,75	61,25
Intervalos de confiança trapezoidais (Aplicação 2)	5.4.2	44,05	29,75	70,25

¹ Grau de pertinência ao conjunto fuzzy correspondente.
² Antecedentes impostados por meio de valores numéricos discretos.
³ Grau de pertinência a dois conjuntos fuzzy.

Fonte: Elaborada pelo autor.

6 CONCLUSÃO E PERSPECTIVAS

A análise e a gestão de riscos em sistemas hídricos têm assumido uma grande importância para a nossa sociedade em virtude de que os eventos inesperados, dependendo da frequência e da gravidade em que possam vir ocorrer, provocam grandes transtornos e, em casos extremos, danos que podem significar, inclusive, a perda de diversas vidas.

Vários estudos, com base em distintas metodologias, têm sido apresentados com aplicações a casos específicos, com a finalidade de garantir a segurança de sistemas hídricos. Mais recentemente, diversos trabalhos têm também considerado a utilização de Sistemas Fuzzy, na análise dos riscos de sistemas hídricos, por se tratarem de processos complexos que são baseados em informações que são aproximadas ou imprecisas.

O trabalho em questão propôs a formulação de uma avaliação integrada de riscos, em que foi permitida a subdivisão do sistema hídrico em estudo. Propôs também, para a determinação dos diversos tipos de risco, a utilização de um sistema de inferência fuzzy, sendo também desenvolvido o programa Risco-Fuzzy, que possibilita a obtenção de valores para os riscos, dentro da escala sugerida, nos diversos níveis do sistema.

Aplicou-se a metodologia proposta ao Sistema de Aporte de Água Bruta para a Região Metropolitana de Fortaleza (SAAB/RMF), que foi subdividida em onze subsistemas e, em cada um deles, foram especificados os distintos tipos de risco. Os dados utilizados na análise, por outro lado, foram levantados junto à Companhia de Gestão dos Recursos Hídricos (COGERH) por Capelo Neto, Brito e Viana (2014).

Até onde foi possível, os resultados do programa Risco-Fuzzy foram testados com os obtidos no processamento da biblioteca Fuzzy Logic Toolbox do software Matlab[®], para os casos em que os dados de entrada podem ser fornecidos por intermédio de valores numéricos discretos. Foram comparados todos os riscos individuais, como também os riscos de todos os subsistemas. É importante salientar, todavia, que para a avaliação do risco do Canal da Integração (Subsistema 3) que possui nove tipos de risco, por exemplo, por meio do Matlab[®], foi necessária a imposição dos dados correspondentes a nove variáveis *Possibilidade de Ocorrência*, nove variáveis *Severidade das Consequências* e cento e oitenta regras de inferência. Entre os dois programas, os resultados foram precisos.

A facilidade de utilização do programa Risco-Fuzzy se deve ao fato de o mesmo ter sido desenvolvido visando a aplicação específica em um sistema que pode ser desmembrado em outros subsistemas, que por sua vez também permitam ser ramificados em diversos tipos de risco. Outra vantagem é que todos os dados de entrada e os resultados ficam arquivados, facilitando alterações posteriores. Também é possível a inclusão ou a exclusão de subsistemas e de tipos de risco de maneira muito simples. Além do mais, é permitido que os dados de entrada sejam fornecidos por meio de intervalos de confiança, desde que sejam por intermédio de funções de pertinência triangulares e/ou trapezoidais.

Foram avaliados os dados de entrada existentes, da forma em que foram obtidos junto à COGERH, em que os valores reais possuíam graus de pertinência a apenas um conjunto fuzzy em ambos os antecedentes (*Possibilidade de Ocorrência e Severidade das Consequências*).

Também foram simuladas situações em que as condições possuíam pertença a mais de uma função de pertinência. Nestes casos, admitiu-se que as entradas pudessem ser por meio de valores numéricos discretos e de intervalos de confiança tanto triangulares como trapezoidais. Duas situações para cada uma destas duas últimas formas de entrada de dados foram consideradas.

Foi ainda estudada a possibilidade da obtenção do risco global do sistema associado ao estado de seca, ou seja, à consideração da relevância de alguns subsistemas em relação a outros. Nesta aplicação, foram estabelecidos pesos menores a alguns subsistemas específicos na determinação dos seus riscos.

Efetivadas as análises, para os cenários supracitados, cujo levantamento de dados foi realizado para o período da Copa do Mundo de Futebol de 2014, poder-se-ia admitir que a situação do SAAB/RMF era confortável, no que diz respeito à frequência e à gravidade dos possíveis riscos, tanto em relação à quantidade como também à qualidade da água. Quanto à qualidade, deve-se ressaltar, contudo, que se trata de água bruta, e não de água para o consumo humano.

Recomenda-se que adaptações e melhoramentos possam vir a ser realizados, dentro da metodologia proposta, com o intuito de se obter resultados, senão mais precisos,

mais confiáveis. Algumas perspectivas de estudos e pesquisas, que possam vir a complementar ou aprofundar o trabalho em questão, são abordadas no que se segue.

Para uma maior abrangência na classificação das informações de entrada, sugere-se a utilização de uma maior quantidade de funções de pertinência para as variáveis de entrada *Possibilidade de Ocorrência* e/ou *Severidade das Consequências*, o que significaria uma maior quantidade de elementos, ou termos, na Matriz de Classificação de Riscos.

Uma maior gama de possibilidades para os resultados a serem obtidos para a variável *Risco* poderia também ser apreciada considerando-se uma maior quantidade de conjuntos fuzzy, o que implicaria em uma maior diversidade dos tipos de elementos, ou termos, na Matriz de Classificação de Riscos.

Como já explanado anteriormente, Simões e Shaw (2007, p. 46) esclarecem que “experiências mostram que uma mudança de 5 conjuntos triangulares para 7 aumenta a precisão em torno de uns 15%.” Isso é válido tanto para os antecedentes como para o consequente. Acredita-se que este fato seja mais relevante para este último.

Ainda como perspectivas de estudos relacionadas à presente metodologia, sugere-se que o assunto possa vir a ser estudado com diferentes distribuições das funções de pertinência triangulares e/ou trapezoidais. Também pode ser considerada a possibilidade da utilização de outras formas de funções como, por exemplo, a gaussiana.

Por se tratar de um sistema hídrico de grande extensão, uma outra possibilidade seria a subdivisão do SAAB/RMF em uma maior quantidade de subsistemas. Como exemplo, poder-se-ia citar a avaliação do Canal da Integração (Subsistema 3) nos quatro trechos distintos, entre o Açude Castanhão (Subsistema 1) e o Açude Gavião (Subsistema 11), em que já foi dividido desde a época da sua construção.

A potencialidade do processo proposto permite também, com as devidas adaptações no programa Risco-Fuzzy, que seja estudada a situação em que a avaliação do risco seja realizada em uma maior quantidade de níveis. Uma sugestão seria a situação seguinte:

- a) sistema global: Sistema Geral de Abastecimento de Água da RMF;

- b) subsistemas (três): SAAB/RMF e as duas estações de tratamento de água (ETA Gavião e ETA Oeste);
- c) unidades de risco: os atuais onze subsistemas do SAAB/RMF e outras unidades a serem definidas para a ETA Gavião e para a ETA Oeste; e
- d) tipos de risco: diversos tipos de risco podem ser estabelecidos.

Na perspectiva da utilização de índices e/ou de indicadores, como os apresentados por Vieira (2014), em uma pesquisa posterior, o programa Risco-Fuzzy deixou uma entrada específica para a impostação dos dados de entrada referentes aos mesmos, que foi denominada de qualidade da informação. Dependendo da forma em que forem definidos, alguns scripts do programa deverão ser adaptados. As alterações, porém, deverão ser realizadas sem grande complexidade.

REFERÊNCIAS

- ABNT. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR ISO 31000**: Gestão de riscos: princípios e diretrizes. Rio de Janeiro, 2009a. 24 p.
- ABNT. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR ISO/IEC 31010**: Gestão de riscos: técnicas para o processo de avaliação de riscos. Rio de Janeiro, 2012. 96 p.
- ABNT. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR ISO GUIA 73**: Gestão de riscos: vocabulário. Rio de Janeiro, 2009b. 12 p.
- AGUIAR, L. A. **Metodologias e análise de riscos APP & HAZOP**. Rio de Janeiro: Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ), 2009. 29 p. Disponível em: <<https://sites.google.com/a/eq.ufrj.br/eqe592/home/arquivos>>. Acesso em: 14 dez. 2014.
- ALMEIDA, A. B. A gestão do risco em sistemas hídricos: conceitos e metodologias aplicadas a vales com barragens. *In*: SIMPÓSIO DE HIDRÁULICA E RECURSOS HÍDRICOS DOS PAÍSES DE LÍNGUA OFICIAL PORTUGUESA (SILUSBA), 6., 2003, Cabo Verde. **Anais...** Lisboa: Associação Portuguesa dos Recursos Hídricos (APRH), 2003. v. 3. p. 647-661.
- ALMEIDA, A. B. O Conceito de risco socialmente aceitável como componente crítico de uma gestão do risco aplicada aos recursos hídricos. *In*: CONGRESSO DA ÁGUA, 7., 2004, Lisboa. **Anais...** Lisboa: Associação Portuguesa dos Recursos Hídricos (APRH), 2004. 14 p. Disponível em: <<http://www.aprh.pt/congressoagua2004/INDEX.HTML>>. Acesso em: 14 maio 2014.
- CAMPOS, J. N. B.; STUDART, T. M. C. **Hidrologia de reservatórios**: a construção de uma teoria. Fortaleza: ASTEF / Expressão Gráfica e Editora, 2006. 286 p.
- CAPELO NETO, J.; BRITO, C. R. F.; VIANA, A. G. **Plano de contingência e emergência**. Fortaleza: Universidade Federal do Ceará (UFC), 2014. 209 p. 1 CD-ROM.
- CASTRO, T. N.; SOUZA, F.; ALVES, J. M. B.; PONTES, R. S. T.; REIS, L. L. N.; DAHER, S. Neo-fuzzy neuron model for seasonal rainfall forecast: a case study of Ceara's eight homogenous regions. **Journal of Intelligent & Fuzzy Systems**, IOS Press, v. 25, p. 389-394, 2013.
- CID, D. A. C. **Sistema de suporte à tomada de decisão em operação de reservatórios**. 2014. 53 f. Monografia (Graduação em Engenharia Civil) – Centro de Tecnologia, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2014.
- CODES, R. A.; SOUZA FILHO, F. A. Gerenciamento de risco na infraestrutura hídrica, *In*: SOUZA FILHO, F. A.; CAMPOS, J. N. B.; AQUINO, S. H. S. (Org.). **Gerenciamento de recursos hídricos no semiárido**. Fortaleza: Expressão Gráfica e Editora, 2013. cap. 25, p. 499-510.
- COX, E. D. **Fuzzy logic for business and industry**. Rockland: Charles River Media, 1995. 601 p.

FONTENELLE, A. S. **Proposta metodológica de avaliação de riscos em barragens do nordeste brasileiro** – Estudo de caso: barragens do Estado do Ceará. 2007. 213 f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Centro de Tecnologia, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2007.

GANOULIS, J. G. *Engineering Risk Analysis of Water Pollution*. New York: VCH Publishers, 1994.

GOMIDE, F. A. C.; GUDWIN, R. R. Modelagem, controle, sistemas e lógica fuzzy. **SBA Controle e Automação**, Campinas, v. 4, n. 3, p. 97-115, set./out. 1994.

GOMIDE, F. A. C.; GUDWIN, R. R.; TANSCHKEIT, R. Conceitos fundamentais da teoria dos conjuntos fuzzy, lógica fuzzy e aplicações. *In: INTERNATIONAL FUZZY SYSTEMS ASSOCIATION WORLD CONGRESS (IFSA)*, 6th, 1995, São Paulo. **Proceedings...** São José dos Campos: Instituto de Pesquisas Espaciais, 1995. p. 1-38.

GRADVOHL, S. T. S. **Análise de riscos em sistemas de abastecimento de água sob a perspectiva do plano de segurança da água** – Estudo de caso: região metropolitana de Fortaleza no Estado do Ceará. 2012. 213 f. Tese (Doutorado em Saneamento Ambiental) – Centro de Tecnologia, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2012.

IPECE. INSTITUTO DE PESQUISA E ESTRATÉGIA ECONÔMICA DO CEARÁ. **Ceará em mapas**: caracterização territorial, meio ambiente, bacias hidrográficas. Fortaleza, 2007. 1 mapa. Escala especificada no mapa. Disponível em: <<http://www2.ipece.ce.gov.br/atlas/capitulo1/12/129x.htm>>. Acesso em: 15 ago. 2013.

KAUFMANN, A.; GUPTA, M. M. **Introduction to fuzzy arithmetic: theory and applications**. New York: Van Nostrand Reinhold, 1991. 361 p.

KAUR, D. **A study on fuzzy risk analysis based on fuzzy numbers**. 2013. 88 f. Thesis (Master of Science in Mathematics and Computing) – School of Mathematics and Computer Applications, Thapar University, Patiala, Punjab, India, 2013.

KERZNER, H. **Gerenciamento de projetos**: uma abordagem sistêmica para planejamento, programação e controle. Tradução da 10. ed. São Paulo: Editora Blucher, 2011. 657 p.

KREUZER, H. Assessing uncertainty in dam engineering. *In: Annual Meeting of ICOLD*, 73., 2005, Tehran, Iran. **Anais...** Tehran: [s.n.], May 1-6, 2005. n. 007-S1.

MENESCAL, R. A. **Gestão da segurança de barragens no Brasil**: proposta de um sistema integrado, descentralizado, transparente e participativo. 2009. 771 p. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Centro de Tecnologia, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2009.

MORGAN, M. G.; HENRION, M. **Uncertainty**: a guide to dealing with uncertainty in quantitative risk and policy analysis. Cambridge University Press, New York, 1993.

POSSELT, E. L. **InFuzzy – Ferramenta para desenvolvimento de aplicações de sistemas difusos**. 2011. 193 f. Dissertação (Mestrado em Sistemas e Processos Industriais) – Programa de Pós-Graduação em Sistemas e Processos Industriais, Universidade de Santa Cruz do Sul, Santa Cruz do Sul, 2011.

REJDA, G. E. **Principles of risk management and insurance**. 11th ed. Boston: Pearson Education, 2011. 730 p.

RIZOL, P. M. S. R.; MESQUITA, L.; SAOTOME, O. Lógica fuzzy tipo-2. **Revista Sodebras**, [S.l.], v. 6, n. 70, p. 27-46, out. 2011.

SALES, R. J. M. **Aplicação da lógica fuzzy no modelo de Streeter-Phelps para analisar o risco de contaminação das águas de rios, considerando múltiplos processos e múltiplos lançamentos**. 2014. 116 f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Centro de Tecnologia, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2014.

SILVA F. O. E. **Plano de águas municipal como instrumento de política pública para universalização do abastecimento de pequenas comunidades rurais do semiárido cearense**. 2011. 184 f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Centro de Tecnologia, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2011.

SIMÕES, M. G.; SHAW, I. S. **Controle e modelagem fuzzy**. 2. ed. rev. e ampl. São Paulo: Blucher: FAPESP, 2007. 186 p.

STUDART, T. M. C. **Análises de incertezas na determinação de vazões regularizadas em climas semi-áridos**. 2000. 151 f. Tese (Doutorado em Recursos Hídricos) – Centro de Tecnologia, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2000.

TANSCHKEIT, R. Sistemas fuzzy. *In*: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE AUTOMAÇÃO INTELIGENTE (SBAI), 6., 2003, Bauru. **Anais de Minicursos...** São Paulo: Sociedade Brasileira de Automática (SBA), 2003. 35 p. 1 CD-ROM.

VIEIRA, J. M. P.; MORAIS, C. **Planos de segurança da água para consumo humano em sistemas públicos de abastecimento**. Instituto Regulador de Águas e Resíduos / Universidade do Minho. Lisboa: SIG – Sociedade Industrial Gráfica, 2005. 161 p.

VIEIRA, P. M. S. **Desenvolvimento de um índice de sustentabilidade hidroambiental (Estudo de caso: APA de Baturité, Ceará)**. 2014. 252 f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Centro de Tecnologia, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2014.

VIEIRA, V. P. P. B. **Análise de risco em recursos hídricos: fundamentos e aplicações**. Porto Alegre: Associação Brasileira de Recursos Hídricos (ABRH), 2005. 361 p.

VINCENS, G. J.; RODRIGUES-ITURBE, I.; SHAAKE, J. C. **A bayesian framework for the use of regional information in hydrology**. *Res.*, 11 (3), p. 405-414, 1975.

WEBER, L.; KLEIN, P. A. T. **Aplicação da Lógica Fuzzy em Software e Hardware**. Canoas: Ulbra, 2003. 110 p.

WHO. WORLD HEALTH ORGANIZATION. **Guidelines for drinking-water quality**. Vol. 1: Recommendations. 3rd ed. Geneva: WHO, 2004. 515 p.

WHO. WORLD HEALTH ORGANIZATION. **Guidelines for drinking-water quality**. 4th ed. Geneva: WHO, 2011. 541 p.

ZADEH, L. A. Fuzzy sets. **Information and control**, New York, v. 8, n. 3, p. 338-353, June 1965.

ZADEH, L. A. The concept of a linguistic variable and its application to approximate reasoning – I. **Information science**, Elsevier, v. 8, n. 3, p. 199-249, 1975.

APÊNDICE A – SCRIPTS DO PROGRAMA RISCO-FUZZY

Quadro A.1 – Script principal *Risco Fuzzy*

```

global x qualinfo relevSub

DadosEntrada; %%Carrega dados das Ações Fuzzy
ConjuntosFuzzy; %% Carrega dados antecedentes, consequentes, regras.
Nfamilia=1;
NRISK=length(ACOESRISCOS);

eixo=[0:0.0005:1];
x = 0:0.05:100;
for i= 1:NRISK
    cprob= trapmf(x,ACOESRISCOS(i,:));
    impac= trapmf(x,ACOESIMPACTOS (i,:));
    qualinfo=ACOESQUALIINFO(i);
    relevSub=RELEVSUBSISTEMA(i);
    [RiscoF,Risco]= Inferencia(Nfamilia, cprob, impac);
    RISCOFUZZY(i)=RiscoF;
    RISCOPERTINENC(i,:)=Risco;
end
disp('Risco Local')
disp(RISCOFUZZY');

%% ANÁLISE DO RISCO DO SUBSISTEMA
for i=1:NSUBSIS
    Kini=(i-1)*NRISK+1;
    Kfim= i*NRISK;
    FATORRISCOsub=SUBSIS(Kini:Kfim);
    for j=1:length(x)
        FATORRISCOsub(:,j)=FATORRISCOsub(:,1);
    end
    AAVERsub=FATORRISCOsub.*RISCOPERTINENC;
    AAVERsub=max(AAVERsub);
    RISCOsub(i,:)=defuzz(x,AAVERsub,'bisector');
end
disp('Risco Subistema');
disp(RISCOsub);
%% ANÁLISE DO RISCO GLOBAL DO SISTEMA
%%% Agregação
AAVER=RISCOPERTINENC;
AAVER=max(AAVER);
%%% Defuzificação
RISCOGlobal=defuzz(x,AAVER,'bisector');
disp('Risco Global');
disp(RISCOGlobal);
disp('Salvando resultados...');
%%Salvar Arquivo Excel
arquivo='Resultados\Risco-Fuzzy.xls';
mkdir('Resultados');
delete(arquivo);
texto={'Risco SAAB-RMF'};
xlswrite(arquivo, [1:NRISK], 'plan1','B1');
xlswrite(arquivo, x, 'plan1','A2');
xlswrite(arquivo, RISCOPERTINENC, 'plan1','B2');
xlswrite(arquivo, texto, 'RESULTADO','A1');
xlswrite(arquivo,{'Risco Local'}, 'RESULTADO','A4');
xlswrite(arquivo, RISCOFUZZY, 'RESULTADO','A5');
xlswrite(arquivo, {'Risco Subistema'}, 'RESULTADO','B4');
xlswrite(arquivo, RISCOsub,'RESULTADO','B5');
xlswrite(arquivo, {'Risco Global'}, 'RESULTADO','C4');
xlswrite(arquivo, RISCOGlobal, 'RESULTADO','C5');
disp('Arquivo salvo em: Resultados\Risco-Fuzzy.xls');

```

Fonte: Elaborada pelo autor.

Quadro A.2 – Script *Dados Entrada*

```
SIS=xlsread('DadosFuzzy.xlsx','Risco-Fuzzy');

ACOEsriscos=SIS(:,3:6);
ACOEsimpatos=SIS(:,7:10);
NRISK=length(SIS);
NSUBSIS=max(SIS(:,1));
SUBSIS=zeros(NSUBSIS*NRISK,1);
for i=1:NSUBSIS
a=find(SIS(:,1)==i);
ini=(i-1)*NRISK+a(1);
fim=ini+length(a)-1;
SUBSIS(ini:fim)=1;
end
%%%RELEVANCIA DO COMPONENTE PARA O RISCO GLOBAL -- IMPACTO GLOBAL (1) OU
LOCAL (0)
RELEVSubsistema= SIS(:,11);
%%%QUALIDADE DA INFORMACAO SOBRE O RISCO
ACOEQUALIINFO = SIS(:,12);
```

Fonte: Elaborada pelo autor.

Quadro A.3 – Script *Conjuntos Fuzzy*

```
global x fuzzyconjP fuzzyconjS fuzzyconjR REGRA

fuzzyconjP=xlsread('DadosFuzzy.xlsx','fuzzyconjP');
fuzzyconjS=xlsread('DadosFuzzy.xlsx','fuzzyconjS');
fuzzyconjR=xlsread('DadosFuzzy.xlsx','fuzzyconjR');
REGRA=xlsread('DadosFuzzy.xlsx','REGRA');
```

Fonte: Elaborada pelo autor.

Quadro A.4 – Script da função *Inferência*

```

function [RiscoF,Risco]= Inferencia(NFamilia, prob, impac)
global x qualinfo relevSub fuzzyconjP fuzzyconjS fuzzyconjR REGRA

%%%%%1. Definição dos conjuntos fuzzy
AClassP=fuzzyconjP;
AClassS=fuzzyconjS;
CClass=fuzzyconjR;
posregra=1;

%%%%% 2. Aplicação da regra de inferencia FUZZY
for i=1:size(AClassP,1)
    for j=1:size(AClassS,1)
        pfaixa=AClassP(i,3:6); %%antecedente
        Pclass=trapmf(x,pfaixa);
        mprob= max(min(prob,Pclass));
        mprob2= min(prob,Pclass);
        ifaixa=AClassS(j,3:6); %%antecedente
        iclass=trapmf(x,ifaixa);
        mimpac= max(min(impac,iclass));
        nRisk=REGRA(posregra,4);
        rfaixa=CClass(nRisk,3:6); %% consequente
        rclass=trapmf(x,rfaixa);
        mR(1:length(x))=min(mprob, mimpac);
        Riscopac(posregra,:)=min(rclass,mR);
        posregra=posregra+1;
    end
end

%%%% 3. Agregação por união
for i= 1:length(x)
    vet=Riscopac(:,i);
    Risco(i) = max(vet);
end
Risco=Risco*qualinfo;
Risco=Risco*relevSub;

%%%% 4. Defuzificação
RiscoF = defuzz(x,Risco,'bisector');
End

```

Fonte: Elaborada pelo autor.

APÊNDICE B – DADOS DE ENTRADA DO PROGRAMA RISCO-FUZZY

Tabela B.1 – Dados de entrada do programa Risco-Fuzzy para a determinação dos riscos individuais, dos riscos dos subsistemas e do risco global do sistema

Sistema de Aporte de Água Bruta para a Região Metropolitana de Fortaleza (SAAB/RMF)													
Dados de entrada do programa Risco-Fuzzy para a determinação dos riscos individuais, dos riscos dos subsistemas e do risco global do sistema													
Subsistema	Tipos de Risco	Subsistema	Tipos de Risco	Possibilidade de Ocorrência				Severidade das Consequências				Relevância do Subsistema	Qualidade da Informação
Açude Castanhão	Falha estrutural	1	1	30,00	30,00	30,00	30,00	62,50	62,50	62,50	62,50	1	1
	Contaminação da água (*)	1	2	50,00	50,00	50,00	50,00	37,50	37,50	37,50	37,50	1	1
	Floração de cianobactérias	1	3	30,00	30,00	30,00	30,00	12,50	12,50	12,50	12,50	1	1
	Sabotagem/Vandalismo	1	4	10,00	10,00	10,00	10,00	62,50	62,50	62,50	62,50	1	1
Estação Elevatória do Açude Castanhão	Falta de energia	2	1	50,00	50,00	50,00	50,00	62,50	62,50	62,50	62,50	1	1
	Queima de uma bomba	2	2	30,00	30,00	30,00	30,00	62,50	62,50	62,50	62,50	1	1
	Queima/Falha em transformador	2	3	30,00	30,00	30,00	30,00	62,50	62,50	62,50	62,50	1	1
	Queima de cabos	2	4	30,00	30,00	30,00	30,00	37,50	37,50	37,50	37,50	1	1
	Pontos quentes	2	5	30,00	30,00	30,00	30,00	37,50	37,50	37,50	37,50	1	1
	Sabotagem/Vandalismo	2	6	10,00	10,00	10,00	10,00	62,50	62,50	62,50	62,50	1	1
Canal da Integração	Falha na ativação das comportas	3	1	30,00	30,00	30,00	30,00	37,50	37,50	37,50	37,50	1	1
	Falha em sifão invertido	3	2	30,00	30,00	30,00	30,00	62,50	62,50	62,50	62,50	1	1
	Explosões nas pedreiras	3	3	10,00	10,00	10,00	10,00	62,50	62,50	62,50	62,50	1	1
	Obstrução por acidentes automobilísticos	3	4	30,00	30,00	30,00	30,00	37,50	37,50	37,50	37,50	1	1
	Retirada ilegal de água	3	5	70,00	70,00	70,00	70,00	12,50	12,50	12,50	12,50	1	1
	Derramamento de carga contaminante	3	6	30,00	30,00	30,00	30,00	62,50	62,50	62,50	62,50	1	1
	Contaminação da água pelo Lixão	3	7	50,00	50,00	50,00	50,00	37,50	37,50	37,50	37,50	1	1
	Crescimento de macrófitas	3	8	70,00	70,00	70,00	70,00	37,50	37,50	37,50	37,50	1	1
Sabotagem/Vandalismo	3	9	10,00	10,00	10,00	10,00	62,50	62,50	62,50	62,50	1	1	
Açude Curral Velho	Baixo nível de reservação	4	1	30,00	30,00	30,00	30,00	37,50	37,50	37,50	37,50	1	1
	Contaminação da água (*)	4	2	50,00	50,00	50,00	50,00	37,50	37,50	37,50	37,50	1	1
	Contaminação por Cryptosporidium (gado)	4	3	30,00	30,00	30,00	30,00	37,50	37,50	37,50	37,50	1	1
	Floração de cianobactérias	4	4	30,00	30,00	30,00	30,00	12,50	12,50	12,50	12,50	1	1
	Sabotagem/Vandalismo	4	5	10,00	10,00	10,00	10,00	37,50	37,50	37,50	37,50	1	1
Canal do Trabalhador	Falha na ativação das comportas	5	1	30,00	30,00	30,00	30,00	37,50	37,50	37,50	37,50	1	1
	Obstrução por acidentes automobilísticos	5	2	30,00	30,00	30,00	30,00	37,50	37,50	37,50	37,50	1	1
	Retirada ilegal de água	5	3	50,00	50,00	50,00	50,00	12,50	12,50	12,50	12,50	1	1
	Derramamento de carga contaminante	5	4	10,00	10,00	10,00	10,00	62,50	62,50	62,50	62,50	1	1
	Crescimento de macrófitas	5	5	50,00	50,00	50,00	50,00	37,50	37,50	37,50	37,50	1	1
	Sabotagem/Vandalismo	5	6	10,00	10,00	10,00	10,00	62,50	62,50	62,50	62,50	1	1
Açude Pacajus	Baixo nível de reservação	6	1	30,00	30,00	30,00	30,00	37,50	37,50	37,50	37,50	1	1
	Contaminação da água (*)	6	2	50,00	50,00	50,00	50,00	37,50	37,50	37,50	37,50	1	1
	Contaminação por Cryptosporidium (gado)	6	3	30,00	30,00	30,00	30,00	37,50	37,50	37,50	37,50	1	1
	Floração de cianobactérias	6	4	30,00	30,00	30,00	30,00	37,50	37,50	37,50	37,50	1	1
	Sabotagem/Vandalismo	6	5	10,00	10,00	10,00	10,00	37,50	37,50	37,50	37,50	1	1
Estações Elevatórias EB1 e EB2	Falta de energia	7	1	50,00	50,00	50,00	50,00	62,50	62,50	62,50	62,50	1	1
	Queima de uma bomba	7	2	30,00	30,00	30,00	30,00	62,50	62,50	62,50	62,50	1	1
	Queima/Falha em transformador	7	3	30,00	30,00	30,00	30,00	62,50	62,50	62,50	62,50	1	1
	Queima de cabos	7	4	30,00	30,00	30,00	30,00	37,50	37,50	37,50	37,50	1	1
	Pontos quentes	7	5	30,00	30,00	30,00	30,00	37,50	37,50	37,50	37,50	1	1
	Sabotagem/Vandalismo	7	6	10,00	10,00	10,00	10,00	62,50	62,50	62,50	62,50	1	1
Canal do Ererê	Retirada ilegal de água	8	1	30,00	30,00	30,00	30,00	12,50	12,50	12,50	12,50	1	1
	Lançamentos de efluentes	8	2	50,00	50,00	50,00	50,00	37,50	37,50	37,50	37,50	1	1
	Derramamento de carga contaminante	8	3	30,00	30,00	30,00	30,00	37,50	37,50	37,50	37,50	1	1
Sabotagem/Vandalismo	8	4	10,00	10,00	10,00	10,00	62,50	62,50	62,50	62,50	1	1	
Açudes Pacoti e Riachão	Baixo nível de reservação	9	1	30,00	30,00	30,00	30,00	62,50	62,50	62,50	62,50	1	1
	Contaminação da água (*)	9	2	50,00	50,00	50,00	50,00	62,50	62,50	62,50	62,50	1	1
	Contaminação por Cryptosporidium (gado)	9	3	30,00	30,00	30,00	30,00	62,50	62,50	62,50	62,50	1	1
	Floração de cianobactérias	9	4	30,00	30,00	30,00	30,00	37,50	37,50	37,50	37,50	1	1
	Sabotagem/Vandalismo	9	5	10,00	10,00	10,00	10,00	62,50	62,50	62,50	62,50	1	1
Sistema de Túneis	Acidentes geotécnicos	10	1	10,00	10,00	10,00	10,00	62,50	62,50	62,50	62,50	1	1
	Explosões nas pedreiras	10	2	30,00	30,00	30,00	30,00	62,50	62,50	62,50	62,50	1	1
	Sabotagem/Vandalismo	10	3	30,00	30,00	30,00	30,00	62,50	62,50	62,50	62,50	1	1
Açude Gavião	Baixo nível de reservação	11	1	30,00	30,00	30,00	30,00	62,50	62,50	62,50	62,50	1	1
	Contaminação da água (*)	11	2	50,00	50,00	50,00	50,00	62,50	62,50	62,50	62,50	1	1
	Contaminação por Cryptosporidium (gado)	11	3	30,00	30,00	30,00	30,00	62,50	62,50	62,50	62,50	1	1
	Floração de cianobactérias	11	4	30,00	30,00	30,00	30,00	37,50	37,50	37,50	37,50	1	1
	Sabotagem/Vandalismo	11	5	10,00	10,00	10,00	10,00	62,50	62,50	62,50	62,50	1	1

(*) Contaminação da água (física, química ou biologicamente).

Fonte: Elaborada pelo autor.