

NOLAN RIBEIRO BEZERRA

**APLICAÇÃO DE REDES BAYESIANAS NA IDENTIFICAÇÃO DE
PERIGOS EM SISTEMAS DE ABASTECIMENTO DE ÁGUA PARA
CONSUMO HUMANO: ESTUDO DE CASO NO MUNICÍPIO DE VIÇOSA-
MINAS GERAIS**

Tese apresentada à Universidade Federal de Viçosa, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, para obtenção do título de *Doctor Scientiae*.

VIÇOSA
MINAS GERAIS-BRASIL
2011

**Ficha catalográfica preparada pela Seção de Catalogação e
Classificação da Biblioteca Central da UFV**

T

B574a
2011

Bezerra, Nolan Ribeiro, 1971-

Aplicação de redes bayesianas na identificação de perigos em sistemas de abastecimento de água para consumo humano : estudo de caso no Município de Viçosa - Minas Gerais / Nolan Ribeiro Bezerra. – Viçosa, MG, 2011. xix, 164f. : il. ; (algumas color.) ; 29cm.

Inclui anexos.

Orientador: Rafael Kopschitz Xavier Bastos

Tese (doutorado) - Universidade Federal de Viçosa.

Referências bibliográficas: f. 144-152

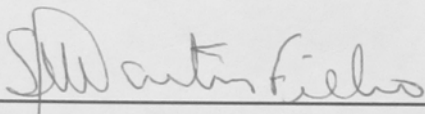
1. Engenharia sanitária. 2. Teoria bayesiana de decisão estatística. 3. Abastecimento de água. Avaliação de riscos. I. Universidade Federal de Viçosa. Departamento de Engenharia Civil. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. II. Título.

CDD 22. ed. 628

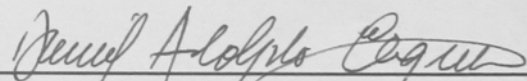
**APLICAÇÃO DE REDES BAYESIANAS NA IDENTIFICAÇÃO DE PERIGOS
EM SISTEMAS DE ABASTECIMENTO DE ÁGUA PARA CONSUMO
HUMANO: ESTUDO DE CASO NO MUNICÍPIO DE VIÇOSA-MINAS GERAIS**

Tese apresentada à Universidade Federal de Viçosa, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, para obtenção do título de *Doctor Scientiae*.

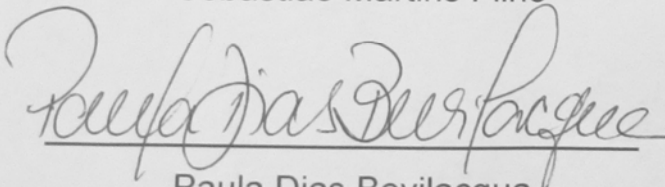
APROVADA: 25 de fevereiro de 2011.



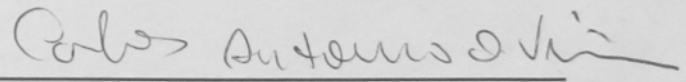
Sebastião Martins Filho



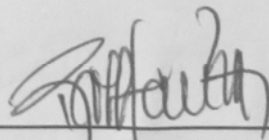
Daniel Adolpho Cerqueira



Paula Dias Bevilacqua
(Coorientadora)



Carlos Antônio Oliveira Vieira
(Coorientador)



Prof. Rafael Kopschitz Xavier Bastos
(Orientador)

Dedicatória

Ao meu pai e minha mãe (in memoriam), pelo exemplo de luta, perseverança e incentivo aos estudos. A saudade de vocês será minha companheira e meu alento.

À minha avó (in memoriam), pelo grande amor, incentivo e dedicação, e que hoje ilumina os meus caminhos.

Ao Carlos, meu marido, pelo amor, apoio, ajuda e compreensão nos momentos mais difíceis.

AGRADECIMENTOS

A Deus, que sempre foi o meu apoio e aos meus familiares por me apoiarem nas dificuldades e nas conquistas. À minha irmã e confidente, com quem sempre posso contar, agradeço o carinho e as palavras sempre tão sinceras. Ao meu marido, Carlos, registro minha admiração pelo seu caráter como ser humano e agradeço por seu amor, por sua dedicação e compreensão.

À Universidade Federal de Viçosa, por meio do Departamento de Engenharia Civil – Divisão de Água e Esgoto, em especial à Regiane, ao Luís Eduardo e às colegas de laboratório Jesana, Rosane, Manuela e Raíssa.

Ao Professor Orientador Rafael Kopschitz Xavier Bastos, pela orientação, incentivo, ética e paciência que demonstrou durante todo o processo do doutorado, além de ser um grande professor e profissional em quem procuro me espelhar.

À Professora Paula Dias Bevilacqua, agradeço pelo aprendizado e incentivo ao longo do doutorado. Ao Coorientador Carlos Antônio Oliveira Vieira, pelo apoio e aprendizado no campo do geoprocessamento.

Às amigas Grazielle, Lourdinha, Regina e Poliana, pelo incentivo para concluir o trabalho.

Meus agradecimentos também aos órgãos financiadores do projeto: Ministério da Saúde, US *Environmental Protection Agency* (EPA) e US *Center for Disease Control and Prevention* (CDC). E em especial à empresa *The Company Coca Cola*, que financiou minha bolsa de doutorado.

A todos os alunos estagiários que contribuíram com o projeto. Agradeço aos amigos que estiveram presentes em diferentes momentos da minha vida, agradeço a atenção e companheirismo de Demétrius, Daniel, Ricardo, Karibe, Rosana, Deisiane, Ulisses, Vinicius, Isaias, Carlos Crespo, Raquel e Edneya Gomes.

BIOGRAFIA

NOLAN RIBEIRO BEZERRA, filha de Iter Bezerra de Castro e Raimunda Ribeiro Bezerra, nasceu aos 24 dias do mês de março, do ano de 1971, na cidade de Cristalândia, no estado do Tocantins.

Concluiu o ensino técnico em saneamento (2º grau) em 1991 na Escola Técnica Federal de Goiás (atual Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás IFT/GO), em Goiânia – GO.

Em 1993, ingressou no curso de Engenharia Ambiental na Universidade Federal do Tocantins – Palmas – TO, finalizando em 1997.

Em 1995, foi selecionada em concurso público como técnica em saneamento ambiental no Instituto Natureza do Tocantins (Naturatins), órgão ambiental do Estado de Tocantins.

Em 1999, ingressou como bolsista do CNPq no mestrado em Engenharia Civil da Universidade de Brasília (UnB), na área de concentração em Tecnologia Ambiental em Recursos Hídricos, com a dissertação intitulada “*Metodologia para definição de vazões mínimas garantidas em cursos d’água*”, sob a orientação do professor Oscar Cordeiro Neto.

Entre 2001, prestou serviços técnicos especializados ao Ministério da Saúde (MS) na Coordenação Geral de Vigilância em Saúde Ambiental (CGVAM), especificamente na área de Vigilância da Qualidade da Água para Consumo Humano.

Em 2002, ingressou no curso de especialização em Vigilância em Saúde Ambiental no Núcleo de Estudos de Saúde Coletiva da Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ).

Em 2006, ingressou no Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal de Viçosa, área de concentração Saneamento Ambiental, em nível de doutorado, com bolsa financiada pela empresa *The Coca-Cola Company*, submetendo-se à defesa de tese em fevereiro de 2011.

SUMÁRIO

LISTA DE ABREVIATURAS	vii
LISTA DE EQUAÇÕES	viii
LISTA DE FIGURAS	ix
LISTA DE QUADROS	xi
LISTAS DE TABELAS	ix
RESUMO	xiv
ABSTRACT	xvii
1. INTRODUÇÃO GERAL	1
1.1. Considerações Iniciais.....	1
1.2. Hipótese	3
1.3. Objetivos	4
1.3.1. Objetivo Geral	4
1.3.2. Objetivos Específicos	4
1.4. Motivação da Pesquisa	5
1.5. Estruturação do Trabalho	6
2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	8
2.1. Aspectos conceituais aplicados ao sistema de abastecimento de água.....	8
2.2. Plano de Segurança da Água (PSA).....	13
2.2.1. Avaliação do sistema	16
2.2.2. Monitoramento operacional	21
2.2.3. Planos de gestão.....	23
2.3.1. Sistema de Análise de Perigos e Pontos Críticos de Controle (APPCC).....	24
2.3.2. Matrizes de priorização do risco.....	30
2.3.3 Avaliação quantitativa do risco.....	33
2.3.4. Redes Bayesianas	37
3. MATERIAL E MÉTODOS	48
3.1. Localização e caracterização da área em estudo	49
3.2. Procedimentos metodológicos utilizados no levantamento de dados.....	52
3.2.1. <i>Diagnóstico da Bacia hidrográfica do Ribeirão São Bartolomeu contribuinte à zona de captação</i>	52
3.2.2. <i>Estação de Tratamento de Água (ETA SAAE I)</i>	53
3.2.3. <i>Sistema de distribuição</i>	54

3.2.4. Monitoramento da qualidade da água e medição de vazões.....	56
3.3. Construção de redes Bayesianas	58
3.3.1. Determinação da probabilidade de ocorrência dos eventos perigosos na bacia hidrográfica contribuinte à zona de captação.....	59
3.3.2. Determinação da probabilidade de ocorrência do nível de contaminação dos perigos associados à zona de captação	67
3.3.2. Base de conhecimento para identificação dos pontos críticos de controle na estação de tratamento de água.....	75
3.3.4. Base de conhecimento para identificação dos perigos na rede distribuição..	77
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO	82
4.1. Determinação da probabilidade de ocorrência dos eventos perigosos na bacia hidrográfica contribuinte à zona de captação.....	82
4.2. Determinação da probabilidade de ocorrência do nível de contaminação dos perigos associados à zona de captação	95
4.3. Descrição e identificação dos pontos críticos de controle na estação de tratamento de água	109
4.4. Determinação da probabilidade de ocorrência dos perigosos na rede de distribuição	130
5. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES	140
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	143
6. ANEXOS	152
Anexo 1 - Questionário para levantamento das informações na Bacia Hidrográfica do Ribeirão São Bartolomeu, Viçosa, Minas Gerais, 2008	152
Anexo 2 - Questionário do método Delphi, Viçosa, Minas Gerais, 2008.....	154
Anexo 3 - Tabelas de probabilidades utilizadas na construção da rede Bayesiana para a bacia hidrográfica contribuinte à zona de captação.....	159
Anexo 4 - Tabelas de probabilidades utilizadas na construção da rede Bayesiana para as sub-bacias da bacia do Ribeirão São Bartolomeu e zona de captação....	160
Anexo 5 - Lista de Verificação (<i>Check List</i>)-para identificação dos eventos perigosos na estação de tratamento.....	161
Anexo 6 - Tabelas de probabilidades utilizadas na construção da rede Bayesiana para as variáveis física, hidráulica e qualidade da água.....	163

LISTA DE ABREVIATURAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
APPCC	Análise de Pontos Críticos de Controle
AQR	Avaliação Quantitativa do Risco
AQRQ	Quantitativa do Risco Químico
CDC	<i>Center for Disease Control and Prevention</i>
CRL	Cloro Residual Livre
DI	Diagrama de Influência
ETA	Estação de Tratamento de Água
FI	Fator de Incerteza
IDT	Ingestão Diária Tolerável
IQA	Índice da Qualidade de Água
MDE	Modelo Digital de Elevação
NOAEL	Efeito Adverso Não Observado
OMS	Organização Mundial da Saúde
PA	Pontos de Atenção
PC	Ponto de Controle
PCC	Pontos Críticos de Controle
PSA	Plano de Segurança da Água
RBMS	Rede Bayesiana Múltipla Seleccionada
SAA	Sistemas de Abastecimento de Água
SAAE	Sistema Autônomo de Água e Esgoto
UFV	Universidade Federal de Viçosa
USEPA	<i>Environmental Protection Agency</i>
VMD	Valor Máximo Desejável

LISTA DE EQUAÇÕES

Equação		Página
2.1	Ingestão Diária Tolerável (IDT).....	30
2.2	Valor Máximo Permitido (VMP) para uma dada substância na água.....	30
2.3	Probabilidade de infecção resultante da ingestão de um número conhecido de organismos pelo modelo exponencial.....	31
2.4	Probabilidade de infecção resultante da ingestão de um número conhecido de organismos pelo modelo <i>Beta-poisson</i>	31
2.5	Probabilidade anual de infecção decorrente de n exposições à mesma dose (d).....	31
2.6	Regra do produto.....	35
2.7	Probabilidade condicional “ <i>a posteriori</i> ”.....	35
2.8	Entrada do domínio modelado.....	37
2.9	Regra da cadeia.....	37
2.10	Regra da cadeia.....	37
2.11	Rede com independência de cada nó em relação aos seus predecessores.....	37
2.12	Rede com independência de cada nó em relação aos seus predecessores.....	37
2.13	Probabilidades condicionais da rede.....	37
2.14	Índice da Qualidade das Águas.....	66
2.15	Número de parâmetros que entram no cálculo do IQA.....	67

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Estrutura para a segurança da água para consumo humano.....	14
Figura 2. Ilustração esquemática do processo de avaliação e gestão de risco no contexto do ciclo interativo da segurança da água para consumo humano.....	14
Figura 4. Árvore de decisão para definição de Pontos Críticos de Controle.....	28
Figura 5. Matriz de tolerabilidade de riscos.....	31
Figura 6. Exemplos de grafos direcionados	39
Figura 7. Exemplo de rede Bayesiana	39
Figura 8. Interface do UnBBayes	47
Figura 9. Localização do município de Viçosa no estado de Minas Gerais, delimitação do município e da bacia do Ribeirão São Bartolomeu	49
Figura 10. Representação espacial dos bairros e da rede de distribuição de água na área urbana do município de Viçosa-MG	52
Figura 11. Espacialização das ligações de água em Viçosa – MG.....	52
Figura 12. Principais eventos perigosos na bacia hidrográfica contribuinte à zona de captação de água para consumo humano	60
Figura 13. Árvore de Decisão para identificação de PCC.....	77
Figura 14. Etapas do sistema de abastecimento de água.	82
Figura 15. Mapa de uso e ocupação do solo gerado pela vetorização da ortoimagem, bacia hidrográfica do Ribeirão São Bartolomeu contribuinte à zona de captação, Viçosa –MG	86
Figura 16. Mapa de declividades, bacia hidrográfica contribuinte à zona de captação, Ribeirão São Bartolomeu, Viçosa – MG	88
Figura 17. Mapa de tipos de solos, bacia hidrográfica contribuinte à zona de captação, Ribeirão São Bartolomeu, Viçosa – MG	89
Figura 18. Representação gráfica dos nós e arcos que compõem uma rede Bayesiana em bacia hidrográfica contribuinte à zona de captação	91
Figura 19. Propagação das evidências da rede Bayesiana a partir das informações obtidas no diagnóstico.....	91
Figura 20: Resultado da aplicação da rede Bayesiana na bacia hidrográfica do Ribeirão São Bartolomeu	93
Figura 21. Mapa de fragilidades ambientais da bacia de captação do Ribeirão São Bartolomeu, Viçosa-MG gerado com o emprego análise multicritério.	94
Figura 22. Representação gráfica dos nós e arcos que compõem uma rede Bayesiana para a zona de captação	106

Figura 23: Resultado da aplicação da rede Bayesiana na zona de captação do Ribeirão São Bartolomeu	107
Figura 24. Distribuição de frequência dos dados horários de turbidez da água decantada, 2006 a 2008.....	111
Figura 25. Distribuição de frequência dos dados horários de turbidez das águas decantada e filtrada, 2006 a 2008.....	112
Figura 26. Distribuição de frequência dos dados horários de turbidez da água filtrada, 2004 a 2008.....	113
Figura 27. Frequência acumulada dos dados horários de turbidez da água filtrada, 2004 a 2008	113
Figura 28. Distribuição de frequência dos dados horários de turbidez da água bruta para os eventos nos quais a água filtrada apresentou turbidez inferior e superior a 1,0; 0,5; e 0,3 UT, 2004 a 2008.....	114
Figura 29. Distribuição de frequência dos dados horários de turbidez medidos em cada filtro separadamente, 2004 a 2008.....	114
Figura 30. Distribuição de frequência da concentração de cloro residual na saída do tanque de contato, 2004 a 2008.....	116
Figura 31. Mapa da variável hidráulica da rede de distribuição associada à pressão.	132
Figura 32. Mapas dos registros de reclamações sobre o abastecimento de água, Viçosa - MG janeiro de 2006 a dezembro de 2008.....	134
Figura 33: Resultado da aplicação da rede Bayesiana na rede de distribuição do Município de Viçosa, Minas Gerais, 2008	137
Figura 34: Mapa de perigo na rede de distribuição de Viçosa gerado com emprego técnicas de SIG e análise multicritério.	138

LISTA DE QUADROS

Quadro 1. Informações importantes para a detalhada descrição do sistema de abastecimento de água	17
Quadro 2. Exemplos de parâmetros de monitoramento em pontos críticos de controle.....	23
Quadro 3. Exemplos de características qualitativas de probabilidade de ocorrência e de consequência de riscos	32
Quadro 4. Exemplo de matriz qualitativa de priorização de risco	32
Quadro 5. Exemplo de matriz semiquantitativa de priorização de risco.....	33
Quadro 6. Programa de controle da qualidade da água - pontos de coleta de amostras, frequência de monitoramento e parâmetros analisados.....	57
Quadro 7. Nível do perigo atribuído à variável idade da tubulação em função do tipo de material da tubulação	79
Quadro 8. Nível do perigo atribuído à variável comprimento da tubulação.....	79
Quadro 9. Nível do perigo atribuído à variável diâmetro da tubulação	80
Quadro 10. Nível de perigo da rede de distribuição associado ao índice de perdas de água	81
Quadro 11. Procedimento de aplicação da árvore de decisão.....	118
Quadro 12. Nível de perigo físico da rede de distribuição em função da composição da rede de distribuição de Viçosa, Minas Gerais	131
Quadro 13. Síntese dos principais resultados obtidos na bacia hidrográfica do Ribeirão São Bartolomeu, zona de captação, estação de tratamento (ETA/SAAE) e rede de distribuição do Município de Viçosa, Minas Gerais, 2008.....	139

LISTAS DE TABELAS

Tabela 1. Objetivos contemplados na rede Bayesiana e os critérios de avaliação..	58
Tabela 2. Tabela das variáveis e atributos na bacia hidrográfica contribuinte à zona de captação de água para consumo humano	61
Tabela 3. Etapas para a aplicação do método <i>Delphi</i>	63
Tabela 4. Respostas enviadas pelos especialistas na primeira rodada do método Delphi (eliminando o especialista número 7) e suas respectivas estatísticas.....	65
Tabela 5. Resumo dos resultados da consulta <i>Delphi</i> junto aos especialistas	66
Tabela 6. Níveis de impactos dos eventos perigosos na bacia hidrográfica contribuinte à zona de captação	66
Tabela 7. Variáveis e atributos para identificação dos perigos que interferem na qualidade da água na zona de captação	68
Tabela 8. Remoção necessária de oocistos de <i>Cryptosporidium</i> spp. de acordo com a concentração na água bruta e a técnica de filtração.....	70
Tabela 9. Níveis de contaminação dos perigos associados à zona de captação	75
Tabela 10. Variáveis e atributos para determinação da probabilidade de ocorrência do nível de perigo físico da rede de distribuição	78
Tabela 11. Uso e ocupação do solo na bacia hidrográfica do Ribeirão São Bartolomeu, classes, áreas e nível de impacto.....	84
Tabela 12. Resultados obtidos a partir do levantamento realizado na bacia hidrográfica do Ribeirão São Bartolomeu, Viçosa-MG.....	92
Tabela 13. Concentração de <i>Escherichia coli</i> na bacia do Ribeirão São Bartolomeu, novembro de 2007 a outubro de 2008, Viçosa – MG.....	96
Tabela 14. Estatística descritiva da concentração de <i>Cryptosporidium</i> spp. na bacia do Ribeirão São Bartolomeu, novembro de 2007 a outubro de 2008, Viçosa – MG.	96
Tabela 15. Caracterização da comunidade fitoplanctônica no ponto de captação para abastecimento da ETA, Viçosa-MG, novembro de 2007 a outubro de 2008....	97
Tabela 16. Índice de qualidade da água na bacia do Ribeirão São Bartolomeu, novembro de 2007 a outubro de 2008, Viçosa – MG.....	99
Tabela 17. Resultados obtidos a partir do monitoramento realizado nas sub-bacias do Ribeirão São Bartolomeu, Viçosa-MG.....	101
Tabela 18. Resultados obtidos a partir do monitoramento realizado na zona de captação do Ribeirão São Bartolomeu, Viçosa-MG	103
Tabela 19. Resultado da aplicação da rede Bayesiana nas sub-bacias do Ribeirão São Bartolomeu, Viçosa – MG	103

Tabela 20. Aporte de cargas poluente, bacia do Ribeirão São Bartolomeu, novembro de 2007 a outubro de 2008, Viçosa – MG.....	108
Tabela 21. Características hidráulicas do floculador.....	110
Tabela 22. Gradientes de velocidade nas câmaras de floculação.....	110
Tabela 23. Características hidráulicas do decantador	111
Tabela 24. Valores de turbidez e caracterização microbiológica da água no efluente dos filtros, novembro de 2007 a outubro de 2008.....	115
Tabela 25. Parâmetros operacionais dos filtros da ETA	115
Tabela 26. Identificação dos pontos críticos de controle e as medidas de controle na ETAI/SAAE, Viçosa, Brasil, 2008	119
Tabela 27. Caracterização dos pontos críticos de controle e as medidas de controle na ETAI/SAAE, Viçosa, Brasil, 2008	124
Tabela 28. Resumo dos resultados da aplicação do modelo de árvore de decisão para determinação do Ponto Crítico de Controle, Ponto de Controle e Ponto de Atenção, na ETAI/SAAE, Viçosa, Brasil, 2008.....	129
Tabela 29. Características físicas da rede de distribuição em função dos materiais das tubulações e idade, Viçosa, Minas Gerais.....	131
Tabela 30. Variáveis para determinação da probabilidade de ocorrência dos perigos na rede de distribuição de Viçosa, Minas Gerais	135

RESUMO

BEZERRA, Nolan Ribeiro, D.Sc., Universidade Federal de Viçosa, fevereiro de 2011. **Aplicação de Redes Bayesianas na Identificação de Perigos em Sistemas de Abastecimento de Água para Consumo Humano: Estudo de caso no Município de Viçosa-Minas Gerais.** Orientador: Rafael Kopschitz Xavier Bastos. Coorientadores: Carlos Antônio Oliveira Vieira, José Manoel Pereira Vieira e Paula Dias Bevilacqua.

Este trabalho tem por objetivo aplicar os princípios das redes Bayesianas como ferramenta para estimar a probabilidade de ocorrência dos perigos na bacia hidrográfica, manancial de captação e rede de distribuição e o uso do Sistema de Análise de Perigos e Pontos Críticos de Controle (APPCC) para identificar perigos em cada etapa da estação de tratamento de água, por meio de estudo de caso envolvendo o município de Viçosa (Minas Gerais/Brasil). Para auxiliar na identificação de perigos associados ao sistema de abastecimento de água no âmbito da bacia hidrográfica, zona de captação e rede distribuição foi adotado um classificador probabilístico, denominado de algoritmo de aprendizagem Bayesiana, utilizado na construção da rede Bayesiana. Na modelagem da rede Bayesiana, utilizou-se o UnBBayes, um software de domínio público desenvolvido pelo Grupo de Inteligência Artificial da Universidade de Brasília (UnB). Na estação de tratamento de água foi utilizado o Sistema de Análise de Perigos e Pontos Críticos de Controle (APPCC) para identificar e priorizar os perigos em cada etapa do tratamento (coagulação / mistura rápida, floculação, decantação, filtração rápida e desinfecção). A identificação de perigos e a caracterização dos riscos foram feitas, a partir de um levantamento de dados secundários e primários, em todo o sistema de abastecimento de água. Para determinar a probabilidade de ocorrência dos eventos perigosos na bacia hidrográfica, zona de captação e rede de distribuição foi necessário definir as

probabilidades de distribuição *a priori* para construção da rede Bayesiana. A determinação da probabilidade *a posteriori* foi obtida a partir das informações colhidas em campo. As informações *a priori* na bacia hidrográfica foram obtidas, por meio de uma consulta aos especialistas utilizando o método Delphi. Para a realização da consulta foi elaborado um questionário, com as variáveis classificadas em eventos perigosos, enviado aos especialistas que atuam nas áreas de hidrologia, recursos hídricos, qualidade de água, solos e geoprocessamento. As variáveis selecionadas foram o uso e ocupação da superfície do solo, disponibilidade hídrica, atividades urbanas, industriais, dentre outras características do solo, declividade, cobertura vegetal e escoamento superficial. Os resultados sistematizados junto aos especialistas foram utilizados na definição das tabelas de probabilidade de distribuição *a priori* para construção da rede Bayesiana. O resultado da aplicação da rede criada com o software UnBBayes, para a determinação da probabilidade de ocorrência dos eventos perigosos na bacia hidrográfica contribuinte à zona de captação, apresentou uma probabilidade *a posteriori* de 78,53% para que a ocorrência de eventos perigosos na bacia hidrográfica que contribuíssem para alteração da qualidade da água na zona de captação. Esse nível de perigo foi classificado como alto, resultando em um manancial com eventos perigosos potencialmente significativos que possam interferir diretamente na qualidade da água e, conseqüentemente, no seu tratamento. Na zona de captação foi determinada a probabilidade de ocorrência do nível de contaminação com relação aos perigos associados à bacia hidrográfica do Ribeirão São Bartolomeu. O resultado da aplicação do modelo de classificação Bayesiana na zona de captação apresentou uma probabilidade “alta” (90%) para o nível de contaminação microbiológico e baixa (70% e 99%) para os níveis de contaminação biológicos e químicos, respectivamente. Na estação de tratamento de água (ETAI / SAAE) a aplicação da ferramenta “árvore de decisão” foi utilizada para a identificação dos Pontos Críticos de Controle (PCC) e Pontos de Atenção (PA) para detectar os perigos vírus, bactérias e protozoários. Foi identificado, apenas PCC para protozoários como perigo em todas as etapas do tratamento, exceto na desinfecção que foi identificada com Ponto de Atenção (PA). Para os perigos decorrentes de

bactérias e vírus, foram identificados PCC apenas para filtração. O resultado da aplicação do método da árvore de decisão em cada etapa da estação de tratamento de água foi coerente com o resultado histórico do monitoramento da estação de tratamento (ETA-I / SAAE). Assim, o sistema APPCC apresentou-se como ferramenta preventiva, sendo adequada para identificar os perigos inerentes ao abastecimento de água. Forneceu indicações importantes, do ponto de vista de definição de prioridades e de adoção de medidas preventivas ou mesmo corretivas, ao invés de apenas remeter à avaliação da qualidade final do produto. A aplicação do modelo de classificação Bayesiana na rede de distribuição apresentou probabilidade de ocorrência de perigo para as variáveis física (80%) e hidráulica foram (60%) altos. Já a variável qualidade da água obteve valor baixo (60%). A inferência Bayesiana tem ganhado cada vez mais espaço, sendo utilizada em inúmeros trabalhos para tomada de decisão na bacia hidrográfica, bem como no sistema de abastecimento de água. Por fim, mesmo com algumas limitações deste estudo, conclui-se que a aplicação de técnicas de inferências Bayesianas pode ser utilizada como ferramenta de identificação de perigos em sistemas de abastecimento de água para consumo humano, com base nos preceitos dos Planos de Segurança da Água.

ABSTRACT

BEZERRA, Nolan Ribeiro, D.Sc., Universidade Federal de Viçosa, February, 2011. **Application of bayesian networks in hazard identification systems water supply for human consumption: a case study in the municipality of Viçosa, Minas Gerais.** Advisor: Rafael Kopschitz Xavier Bastos. Co-advisors: Carlos Antônio Oliveira Vieira, José Manoel Pereira Vieira and Paula Dias Bevilacqua.

This paper aims to apply principles of Bayesian networks as a tool to estimate the occurrence probability of hazards in the watershed, the source water uptaking and distribution network, and to apply the Hazard Analysis and Critical Control Points System (HACCPS) to identify hazards at each stage on the water treatment plant, through a case study involving the city of Viçosa (Minas Gerais/Brazil). To assist in the identification of hazards associated with the water supply system within the watershed, caption zone and distribution network was adopted a probabilistic classifier, called Bayesian learning algorithm, which was used in the construction of the Bayesian network. For the Bayesian network modeling, it was used the public domain software UnBBayes, developed by the Artificial Intelligence Group at the University of Brasilia (UnB). In the water treatment plant it was used the Hazard Analysis and Critical Control Points System (HACCP) to identify hazards at each stage of treatment (coagulation / rapid mixing, flocculation, sedimentation, rapid filtration and disinfection). The hazard identification and risk characterization were made from a survey of secondary and primary data in the entire system of water supply. To determine the probability of dangerous events in the watershed, caption zone and distribution network it was necessary to define the probabilities of an “*a priori*” distribution for the Bayesian network construction. The determination of the “*a posteriori*” probability was obtained from information obtained in the field. The “*a priori*” information from the watershed was obtained through an experts consultation following the Delphi method. For the consultation, a questionnaire was designed with the variables classified in hazardous events and sent to

working specialists in the fields of hydrology, water resources, water quality, soils, and geoprocessing. The selected variables (land use and soil utilization, water availability, urban and industrial activities, among other soil characteristics as slope, vegetation cover and superficial drainage). The results agreed upon together with experts were used in the probability tables definition for “*a priori*” distribution of the Bayesian network construction. The outcomes of the created network application, with the software UnBBayes for determining the probability of dangerous events in the contributing watershed to caption zone, presented the “*a posteriori*” probability of 78.53% in occurrence of hazardous events in the watershed to contribute towards change in water quality at the caption zone. This level of danger was classified as high, resulting in a water spring with potentially significant hazardous events that directly interfere in the water quality and therefore the on the water treatment. In the caption zone it was determined the contamination dangers propensity levels associated with the Ribeirão São Bartolomeu basin. The result of the Bayesian classification model application in the caption zone presented a "high" probability (90%) for the microbiological contamination level and a low probability (70% and 99%) for biological and chemical contamination levels, respectively. In the water treatment plant (ETAI/SAAE) the "decision tree" tool application is used to identify the Critical Control Points (CCP) and Points of Cares (PC) for detecting viruses, bacteria and protozoa identified dangers. It was identified the protozoan as PCC danger at all stages of treatment, except for disinfection which was identified as Point of Care (PA). In bacterial and viral dangers it has been identified CCP only for filtration. The result of the decision tree method utilization at each step of the treatment plant water was consistent with the historical result of the treatment plant (ETA-I/SAAE). monitoring. Thus, the HACCP system was presented as a preventive and appropriate tool to identify the hazards involved in water supply. It was able to provide important information, from the standpoint of setting priorities and preventive or corrective action adoption, rather than just referring to the evaluation of final product quality. The Bayesian classification model application results on the distribution network presented a danger propensity to the physical (80%) and hydro (60%) variables, which were considered

high. The variable about water quality achieved a value considered as low (60%). The Bayesian inference has increasingly found more space for its application, being used in many studies on decision making for watershed and water supply system concerns. Finally, even with some study limitations in this paper, it is possible to conclude that the Bayesian inference technique utilization is a tool for hazard identification in water supply systems for human consumption, based on the Water Safety Plans guidelines.

1. INTRODUÇÃO GERAL

1.1. Considerações Iniciais

Até o final do século XIX, a potabilidade da água para consumo humano era, em geral, aferida por sua aparência física. A partir do século XX, depois da ocorrência de diversos surtos de doenças de transmissão hídrica e com o avanço do conhecimento científico, tornou-se necessário o desenvolvimento de recursos técnicos, e mais tarde legais, que, de forma objetiva, traduzissem as características a que a água deveria obedecer para ser considerada potável. Assim, a qualidade da água para consumo humano passou a ser estabelecida, como o é até hoje, com base em valores máximos permitidos para os diversos contaminantes, ou indicadores da qualidade da água, reunidos em normas e critérios de qualidade da água, ou padrões de potabilidade (BASTOS *et al.*, 2007).

Atualmente, a garantia da segurança¹ da água para consumo humano passa por revisão de seus paradigmas, tornando evidente que os mecanismos de monitoramento estabelecidos por meio do controle laboratorial não são suficientes. Mesmo em países industrializados com elevado padrão tecnológico em abastecimento de água, observa-se notificação de doenças de transmissão hídrica causadas por problemas não detectados e, ou não solucionados em tempo hábil (HRUDEY e HRUDEY, 2004), sendo emblemático o exemplo do surto de *criptosporidiose* em Milwaukee (EUA), em 1993, responsável por cerca de 400.000 casos de infecção (FOX *et al.*, 1998). No Brasil, ocorreu um surto de toxoplasmose no Município de Santa Isabel do Ivaí – Paraná, em 2001, com 426 casos de infecção causados pela contaminação por oocistos do *Toxoplasma gondii*, isolado em um dos dois reservatórios (BRASIL, 2002).

¹ Água segura para consumo humano é definida pela OMS como aquela que não apresente risco significativo à saúde ao longo do consumo por toda a vida, incluindo as diferentes sensibilidades que podem ocorrer durante os distintos estágios de vida (WHO, 2004).

As limitações do controle laboratorial da qualidade da água encontram justificativa em argumentos tais como: (i) a amostragem para o monitoramento da qualidade da água baseia-se em princípio estatístico / probabilístico incorporando inevitavelmente margem de erro / incerteza; (ii) a qualidade da água pode sofrer variações bruscas não detectadas em tempo real; (iii) por razões financeiras, limitações técnico-analíticas e pela necessidade de respostas ágeis, no controle microbiológico da qualidade da água usualmente se recorre ao emprego de organismos indicadores, entretanto, reconhecidamente não existem organismos que indiquem a presença / ausência de ampla variedade de patógenos possíveis de serem removidos / inativados ou que resistam / trespassem os diversos processos de tratamento da água; e (iv) para substâncias químicas, os limites de concentração adotados internacionalmente, muitas vezes, partem de estudos toxicológicos ou epidemiológicos com elevado grau de incerteza, arbitrariedade ou não representatividade, além disso, não há como assegurar o desejável dinamismo e agilidade na legislação para corrigir valores máximos permitidos ou incluir / excluir parâmetros (BASTOS *et al.*, 2001).

Assim, nos últimos anos, nota-se uma preocupação crescente no sentido de que, além do atendimento ao padrão de potabilidade da água estabelecido legalmente, os sistemas de abastecimento devem apresentar níveis de desempenho que garantam sua segurança, evitando vulnerabilidades que possam impor risco à saúde. Nesse sentido, a Organização Mundial da Saúde (OMS), a partir da segunda e, principalmente, da terceira edição das Diretrizes de Qualidade da Água para Consumo Humano, incorpora o conceito de “água segura”, enfatizando que ferramentas de avaliação e gerenciamento de risco aplicadas de forma abrangente e integrada desde a captação até o consumo são a forma mais efetiva de garantir a segurança da qualidade da água para consumo humano (WHO, 2006). Tal abordagem, na terceira edição das Diretrizes da OMS, recebe a denominação de Plano de Segurança da Água (*Water Safety Plan*) (WHO, 2004).

A OMS lançou em julho de 2011 a quarta edição das diretrizes sobre a qualidade da água para consumo humano. Nas diretrizes a OMS pede aos governos, que reforcem o controle da qualidade da água para consumo

humano, com a implantação dos planos de segurança da água, salientando que podem gerar melhorias significativas e sustentáveis à saúde pública (WHO, 2011).

Os Planos de Segurança da Água (PSA) são instrumentos de identificação dos perigos e caracterização dos riscos em sistema e solução alternativa coletiva de abastecimento de água para consumo humano, desde o manancial até o consumidor, visando a estabelecer medidas de controle para eliminá-los ou reduzi-los para níveis aceitáveis (WHO, 2004).

As publicações da OMS fornecem, como não poderia deixar de ser, apenas diretrizes gerais para implementação dos Planos de Segurança da Água - PSA em todas as suas etapas características: (i) diagnóstico e avaliação do sistema de abastecimento de água, incluindo as etapas de identificação de perigos e de pontos críticos de controle e de caracterização dos riscos; (ii) especificação de medidas de controle para os perigos e pontos críticos prioritários; (iii) monitoramento dos pontos críticos de controle; e (iv) estabelecimento de planos de gestão para a manutenção da segurança do sistema e da qualidade da água e para a verificação contínua da eficácia de todos os procedimentos definidos no PSA (WHO, 2004; WHO, 2006; BARTRAM *et al.*, 2009).

Por conseguinte, cabem aos países à adoção e adequação dessas diretrizes, para implantação dos Planos de Segurança da Água, considerado os aspectos econômicos, socioambientais e a realidade local dos países.

1.2. Hipótese

Este trabalho foi baseado na hipótese de que a forma como atualmente tem sido feito o controle da qualidade da água em sistemas de abastecimento de água por meio da análise do produto final não constitui garantia suficiente, sendo necessário estudar novas abordagens para tratar o problema da segurança da água em sistemas de abastecimento de água, desde o manancial até a distribuição.

Entre as novas abordagens, pretende-se verificar se o princípio das redes Bayesianas e o uso do Sistema de Análise de Perigos e Pontos Críticos de

Controle (APPCC) podem contribuir para minimizar a subjetividade na identificação dos perigos em cada etapa do sistema de abastecimento de água.

1.3. Objetivos

1.3.1. Objetivo Geral

Aplicar os princípios das redes Bayesianas e o uso do Sistema de Análise de Perigos e Pontos Críticos de Controle (APPCC) como ferramenta para estimar a probabilidade de ocorrência dos perigos, em cada etapa do sistema de abastecimento de água para consumo humano, por meio de estudo de caso no município de Viçosa- Minas Gerais.

1.3.2. Objetivos Específicos

- Caracterizar o sistema de abastecimento de água de Viçosa – MG;
- Determinar a probabilidade de ocorrência dos eventos perigosos na bacia hidrográfica contribuinte à zona de captação de água para consumo humano;
- Determinar a probabilidade de ocorrência do nível de contaminação dos perigos associados à zona de captação;
- Identificar os pontos críticos de controle na estação de tratamento de água; e
- Determinar a probabilidade de ocorrência dos níveis de perigos na rede de distribuição.

1.4. Motivação da Pesquisa

No Brasil, a qualidade da água para consumo humano é regulamentada pela Portaria MS nº 2.914, de 12 de dezembro de 2011 em substituição a Portaria MS nº 518/2004 (BRASIL, 2011). Segundo Bastos *et al.* (2007), essa Portaria incorpora, além do controle laboratorial, os fundamentos do PSA, tais como os elementos de boas práticas em abastecimento de água, a abordagem de múltiplas barreiras e a perspectiva de análise de risco (avaliação, gerenciamento e comunicação do risco).

Entretanto, a norma brasileira trazia apenas menção à necessidade da abordagem preventiva de avaliação e gerenciamento de risco, mas isso não se apresenta sistematizado o suficiente, de forma que possa ser traduzida em uma ferramenta metodológica de pronta utilização pelos responsáveis pelos serviços de abastecimento de água (BASTOS *et al.*, 2007). A Portaria atual, traz recomendação explícita de implementação de Planos de Segurança da Água, nos moldes preconizados pela OMS e Diretriz do Governo Federal (BRASIL, 2011).

Dessa forma, torna-se de todo oportuno a realização de um estudo piloto no Brasil, de forma a adaptar e testar as ferramentas metodológicas de identificação de perigos e caracterização de riscos, com base na estrutura de segurança da água proposta pela OMS e os princípios e pressupostos previstos na legislação de potabilidade brasileira.

Para suprir essa lacuna, foi desenvolvido o projeto piloto 'Plano de Segurança da Água', financiado pelo Ministério da Saúde, pelas agências norteamericanas *US Center for Disease Control and Prevention* (CDC) e *US Environmental Protection Agency* (USEPA), e desenvolvido pela Universidade Federal de Viçosa (UFV), sob a coordenação do Departamento de Engenharia Civil, em parceria com o Serviço Autônomo de Água e Esgotos de Viçosa (SAAE-Viçosa-MG).

Como projeto piloto demonstrativo, ele foi cumprido na íntegra, abrangendo

todas as etapas típicas dos PSA acima delineadas, com abordagem técnica e acadêmica, utilizando as ferramentas tradicionais de identificação dos perigos e caracterização dos riscos, para as quais já foram apontadas limitações.

A identificação dos perigos e a caracterização do risco constituem etapas fundamentais, pois delas depende a priorização dos perigos a serem controlados e das medidas de controle a serem especificadas, ou seja, as atividades centrais de execução do PSA. As publicações da OMS fazem menção a técnicas qualitativas e semiquantitativas de caracterização de riscos, que são, entretanto, carregadas de subjetividades, ou seja, são dependentes de julgamentos empíricos por parte dos responsáveis pela aplicação do PSA.

Por conseguinte, o tema a ser pesquisado desta tese é original, por envolver uma área carente de informações no Brasil e apresentar novas ferramentas metodológicas para estimar a probabilidade de ocorrência dos perigos e sua priorização ao longo das etapas dos Sistemas de Abastecimento de Água (SAA).

Nesse contexto, o presente estudo constitui, assim, contribuição adicional aos Planos de Segurança da Água, incorporando abordagem acadêmico-científica por meio da aplicação de metodologias de análise baseada no uso de redes Bayesianas como ferramenta para estimar a probabilidade de ocorrência dos perigos na bacia hidrográfica, zona de captação e rede de distribuição, e o uso do Sistema de Análise de Perigos e Pontos Críticos de Controle (APPCC) para identificar os perigos em cada etapa da estação de tratamento de água.

1.5. Estruturação do Trabalho

O presente trabalho foi estruturado em tópicos. Além da introdução, este trabalho apresenta uma fundamentação teórica em temas inerentes à avaliação e gestão de risco e aos Planos de Segurança da Água. Naturalmente é dado destaque aos instrumentos e ferramentas utilizados no

trabalho, a exemplo do sistema de Análise de Perigos e Pontos Críticos de Controle (APPCC) e os princípios da rede Bayesiana.

No item, material e métodos, são descritos os procedimentos empregados para o desenvolvimento deste estudo. Para estimar as probabilidades de ocorrências de perigos associados ao sistema de abastecimento de água no âmbito da bacia hidrográfica, zona de captação e rede de distribuição, foi utilizada o modelo de redes Bayesianas e o uso do Sistema de Análise de Perigos e Pontos Críticos de Controle (APPCC) para identificar perigos em cada etapa da estação de tratamento de água.

O item final trata da aplicação e avaliação das ferramentas, onde se descreve e se discute os resultados de teste em um sistema de abastecimento de água do município de Viçosa-MG.

2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Este capítulo apresenta uma breve revisão de literatura sobre os aspectos conceituais aplicados ao sistema de abastecimento de água, os planos de segurança da água, métodos e as técnicas utilizadas para identificação de perigos e caracterização dos riscos, bem como os fundamentos das redes Bayesianas e método da árvore de decisão objeto deste trabalho.

2.1. Aspectos conceituais aplicados ao sistema de abastecimento de água

Em função de as limitações inerentes ao controle tradicional da qualidade da água em sistemas de abastecimento de água não constituírem garantia suficiente para o fornecimento de água segura, novas ferramentas de avaliação e gerenciamento de risco vêm sendo aplicadas na bacia hidrográfica contribuinte ao manancial de captação, no sistema de tratamento de água e no sistema de distribuição.

Cabe, inicialmente, esclarecer termos e conceitos utilizados nessa área do conhecimento, pois a literatura, por vezes, os utiliza com conotações um pouco distintas (DHA, 2002). Para efeito deste trabalho, serão adotadas as definições, a seguir citadas, de uso mais comum no campo da saúde ambiental e, mais especificamente no campo do abastecimento de água para consumo humano, tendo como principais referências as publicações de Haas *et al.* (1999), CDC (2000), DHA (2002), AS/NZ (2004), WHO (2006) e de Techneau (2009).

O conceito de água segura foi utilizado em 1992 em resposta à epidemia do cólera que, então, se propagava pela América Latina. O Centro de Controle e Prevenção de Doenças (CDC) e a Organização Pan-americana de Saúde (OPS) formularam um conjunto de intervenções para ser possível alcançar a

melhoria imediata da qualidade da água (CDC, 2000).

Atualmente, água segura pode ser entendida como a água que não implica risco à saúde humana. Para ser segura, a água somente poderá apresentar contaminantes em concentrações tão baixas que não causem danos à saúde. Segundo a Organização Mundial de Saúde (OMS), água segura é aquela que não representa qualquer risco significativo para a saúde se consumida durante toda a vida, mesmo levando em conta diferentes suscetibilidades que podem ocorrer entre os estágios de vida (WHO, 2006).

O conceito de água potável sempre esteve ligado ao atendimento ao padrão de potabilidade. A norma brasileira (Portaria MS nº 518/2004 atualizada pela Portaria MS nº 2.914/2011) inovou ao exigir que a água, além de atender aos Padrões de Potabilidade, não apresente riscos à saúde, além de anteceder a recomendação da OMS ao explicitar a necessidade de avaliação de riscos à saúde, desde a bacia hidrográfica até a distribuição.

O atual padrão brasileiro de potabilidade traz recomendação explícita de implementação de Planos de Segurança da Água nos moldes preconizados pela OMS e, ou pela diretriz do governo federal. Desta forma, o padrão brasileiro de potabilidade apresenta estreita harmonia com as diretrizes da OMS.

Os principais elementos do Plano de Segurança da Água (PSA) estão baseados nos princípios e conceitos de múltiplas barreiras, Análise de Perigos e Pontos Críticos de Controle (APPCC), avaliação e gerenciamento de risco e gestão de qualidade (DEWETTINCK *et al.*, 2001; BARTRAM *et al.*, 2001; DAVISON *et al.*, 2002; NOKES, 2003).

A Avaliação do risco é uma metodologia que faz parte de uma abordagem maior, denominada Análise do risco, que compreende três procedimentos desenvolvidos normalmente de forma sequencial e integrada: Avaliação do risco, Gerenciamento do Risco e a Comunicação do risco (WHO 2005; BASTOS *et al.*, 2009).

A Análise do risco é um processo sistemático e integrado que permite a compreensão da origem e natureza do risco, a análise da probabilidade de ocorrência do risco e de suas consequências. De acordo com Bastos *et al.* (2009), de forma genérica, essa metodologia permite, a partir do conhecimento e descrição de possíveis fatores, agentes ou situações que

possam determinar a ocorrência de eventos indesejáveis, propor medidas e intervenções que possam evitá-los ou controlá-los, envolvendo a participação da população ou grupo que sofre as consequências advindas dos eventos indesejáveis, ainda que a participação signifique apenas a disponibilização de informação.

A Avaliação do risco compreende a caracterização e a estimativa, quantitativa ou qualitativa, de efeitos potencialmente adversos à saúde de indivíduos ou populações, em determinado prazo e cenário de exposição a um dado perigo. A avaliação do risco envolve quatro etapas:

i) Identificação de perigo: compreende uma avaliação do conhecimento disponível e a descrição de efeitos adversos à saúde, crônicos ou agudos, associados a um determinado agente, ou seja, perigo (físico, químico, microbiológico) ou situação (evento perigoso).

ii) Avaliação da dose-resposta: avaliação do potencial que o perigo tem de causar resposta (efeito adverso à saúde) em diversos níveis de exposição (doses, no caso do consumo de água via ingestão). A dose mínima ou dose-resposta para alguns dos microrganismos patogênicos de rota fecal oral foi identificada em estudos com voluntários humanos ou de evidências epidemiológicas. Em geral, esses resultados são expressos por meio de funções matemáticas.

iii) Avaliação da exposição: compreende a determinação do tamanho e a caracterização da população exposta, bem como a magnitude, a frequência, a duração e as prováveis vias da exposição.

iv) Caracterização do risco: integra as informações das etapas de identificação de perigo, avaliação da dose-resposta e da exposição, fornecendo estimativas da magnitude do risco, qualitativas ou quantitativas, incorporando variabilidades e incertezas que cerquem todo o processo de avaliação do risco.

A etapa de avaliação do risco tem por objetivo hierarquizar e priorizar os riscos para subsidiar no gerenciamento do risco. Nessa etapa, o componente de caracterização do risco procura dimensionar a probabilidade (ou frequência) de ocorrência do risco e suas consequências (severidade ou magnitude). Isso pode ser realizado em vários graus de detalhamento, dependendo do risco, da finalidade da análise e das informações, dados e

recursos disponíveis. Assim, probabilidade e consequência do risco podem ser combinadas por meio de análises qualitativas, semiquantitativas, quantitativas, ou por meio de suas combinações, fornecendo estimativas da magnitude do risco (AS / NZ, 2004; ROSÉN *et al.*, 2007; HOKSTAD *et al.*, 2009).

O Gerenciamento do risco é um processo sistemático de controle do risco, ponderando alternativas para a implementação de ações, considerando aspectos científicos, tecnológicos, sociais, econômicos e políticos. Envolve, inevitavelmente, tomada de decisões e juízo de valor em termos de tolerabilidade e razoabilidade, em relação a custos de aspectos e saúde pública.

A Comunicação do risco é um processo interativo de intercâmbio e de opiniões, que deve ocorrer durante todo o processo de gerenciamento do risco, entre consumidores, grupos, gestores, instituições, comunidade científica e outros interessados, a respeito dos perigos, riscos, dos resultados da avaliação e sobre as decisões do gerenciamento.

Em resumo, o processo de análise do risco subsidia ao processo de tomada de decisão, levando em consideração incertezas e a possibilidade de circunstâncias ou eventos futuros e seus efeitos à saúde.

Ainda considerando a abordagem conceitual da Análise do Risco, os conceitos de risco, perigo e evento perigoso devem ser compreendidos e diferenciados:

i) Risco: é a probabilidade da ocorrência e, ou magnitude de efeito adverso à saúde de um indivíduo ou população em determinado prazo e cenário de exposição a um dado perigo.

ii) Perigo (ou agente perigoso): agente biológico, químico, físico ou radiológico com capacidade de provocar dano à saúde.

iii) Evento perigoso: situação que possa levar à presença de perigos.

Incorporando os conceitos acima apresentados para o campo do abastecimento de água para consumo humano, como exemplificado por Bastos *et al.* (2009), a presença de organismos patogênicos ou substâncias químicas na água para consumo humano seria exemplo de perigo. O consumo da água (exposição) pode levar à ocorrência de efeitos adversos na população consumidora, significando o risco.

Os perigos na água para consumo humano que podem causar danos podem ser microbiológicos, físicos, químicos ou radiológicos e devem ser considerados juntamente com os eventos que resultam na introdução da contaminação. Podem ser citadas, como exemplos de eventos perigosos, a existência de exploração agrícola, a descarga de esgotos sanitários ou efluentes de agroindústrias na bacia hidrográfica contribuinte à zona de captação, falhas no tratamento da água e rupturas na rede de distribuição.

Na etapa de identificação de perigos, a princípio, todos os perigos e eventos perigosos devem ser identificados e mapeados, em todos os componentes do sistema de abastecimento, da fonte ao consumidor. Devem ser mapeadas as fontes de contaminação, identificados os perigos de maior ocorrência ou importância, o potencial de remoção no sistema de tratamento, devendo ser também avaliado o potencial de reintrodução de perigos, por exemplo, via recirculação de água de lavagem de filtros ou recontaminação na rede de distribuição.

Na etapa de avaliação da exposição, fundamentalmente, procura-se estimar a dose do agente (microbiológico ou químico) ingerida por indivíduos ou populações a cada evento de exposição ou em exposição continuada (isto é, em base temporal, por exemplo, ao longo de um ano). O cenário de exposição ao fator de risco 'consumo de água' consiste, essencialmente, no conhecimento ou estimativa da concentração do agente na água e do volume de água consumido (BASTOS *et al.*, 2009).

Cumprida a etapa de caracterização do risco, do ponto de vista da gestão preventiva do risco, na medida em que o sistema de abastecimento é descrito e são identificados os principais perigos, é possível a tomada de decisão em relação aos riscos mais relevantes, que podem ser eliminados, minimizados ou simplesmente assumidos como aceitáveis. Porém aqui se esbarra em problema cercado de injunções econômicas, sociais, políticas e éticas, qual seja, por exemplo, o que vem a ser 'risco aceitável'?

As autoridades de saúde de vários países, por meio das diretrizes e de regulamentações, admitem, atualmente, um risco mínimo, ou seja, aceitável, de infecções na população exposta (WHO, 2006). Esse risco, por exemplo, no caso da criptosporidiose, pode ser avaliado ao serem identificadas as concentrações de *oocistos* nas fontes de água, a capacidade ou eficiência

dos sistemas de tratamento em sua remoção e, ou a inativação, a resposta imunológica² e o efeito à saúde das populações expostas (CERQUEIRA, 2008).

Para substâncias carcinogênicas genotóxicas presentes na água para consumo humano, a *Environmental Protection Agency* dos Estados Unidos (USEPA) adota níveis de riscos aceitáveis entre 10^{-4} e 10^{-6} (um caso de câncer por 10.000 a 1.000.000 pessoas ao longo de 70 anos). A OMS, em geral, assume risco aceitável de 10^{-5} para substâncias carcinogênicas genotóxicas (USEPA, 2005; USEPA, 2006; WHO, 2006). Nos Estados Unidos (EUA), para os diversos microrganismos patogênicos transmissíveis via abastecimento de água para consumo humano, admite-se risco anual de infecção de 10^{-4} por pessoa por ano (um caso anual de infecção em cada 10.000 consumidores), valor baseado nas diretrizes da OMS para a qualidade da água para consumo humano (HAAS *et al.*, 1999; WHO, 2006).

2.2. Plano de Segurança da Água (PSA)

O Plano de Segurança da Água (PSA) foi sistematizado com foco na abordagem preventiva de análise do risco, aplicado aos sistemas de abastecimento de água (WHO, 2005). O PSA foi desenvolvido para organizar e sistematizar uma longa prática de gestão dos sistemas de abastecimento de água e assegurar o uso dessas práticas na gestão da qualidade da água para consumo humano.

Os Planos de Segurança da Água são instrumentos com foco na abordagem preventiva de análise do risco, os quais devem se inserir em uma estrutura mais ampla, incluindo, de forma interativa, outros importantes componentes como a definição de metas de saúde a serem alcançados / resguardadas em determinado contexto socioeconômico (e, por conseguinte, perfil epidemiológico) e a necessidade de controle externo (auditoria, regulação, vigilância) (Figura 1). Esse ciclo deve ser permeado por instrumentos de

² E a defesa do corpo contra organismos ou objetos estranhos, como bactérias, vírus, órgãos e tecidos transplantados.

avaliação e gerenciamento do risco, conforme preconizado na Figura 2 (WHO, 2004).

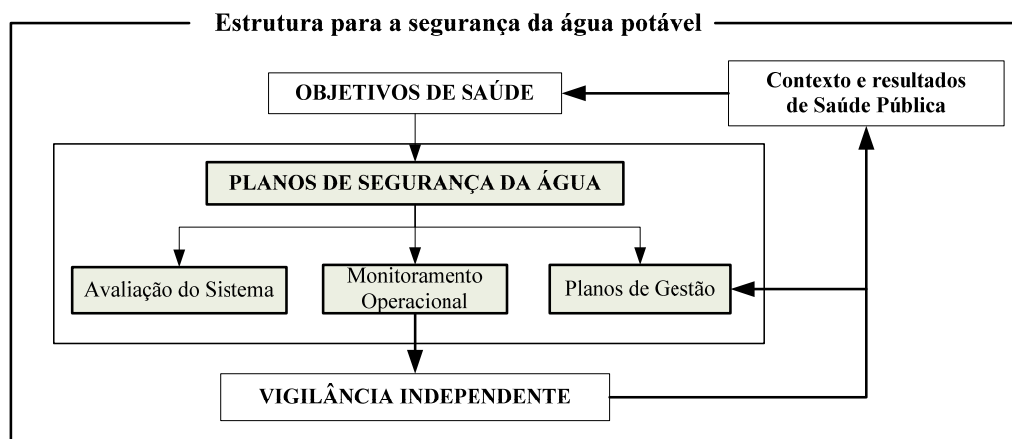


Figura 1. Estrutura para a segurança da água para consumo humano

Fonte: WHO (2004).

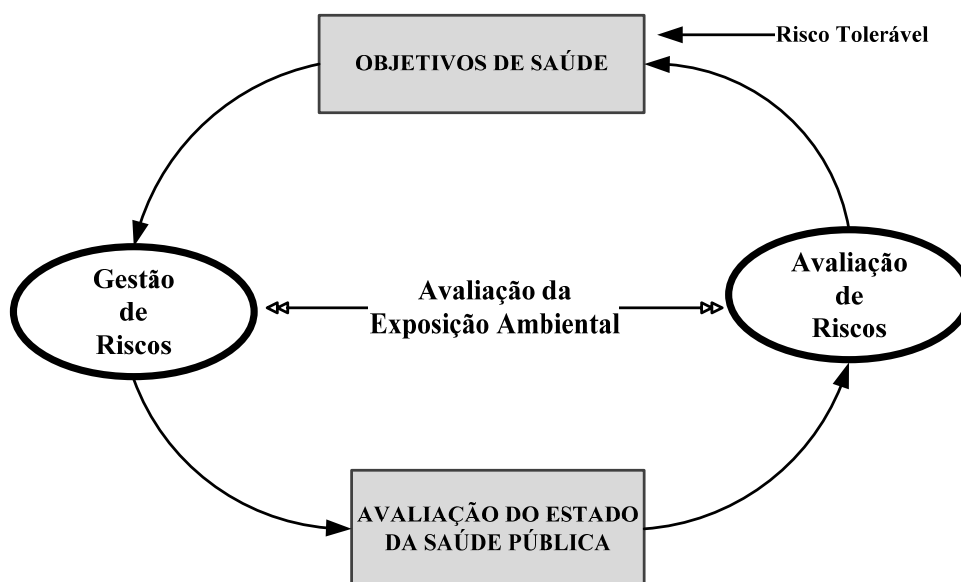


Figura 2. Ilustração esquemática do processo de avaliação e gestão de risco no contexto do ciclo interativo da segurança da água para consumo humano

Fonte: Fewtrell e Bartram (2001).

Ainda na Figura 2, Os principais objetivos de um PSA são: assegurar boas práticas no abastecimento de água, diminuir a contaminação do manancial, reduzir ou remover os contaminantes por meio dos processos de tratamento e proteger a água durante sua reservação, distribuição e uso. Esses objetivos são aplicáveis a sistemas de abastecimento de água e soluções

alternativas coletivas, sendo avaliados por meio de:

i) conhecimento detalhado do sistema e de sua capacidade para abastecer com água que atenda as metas baseadas na saúde;

ii) identificação de fontes potenciais de contaminação e como elas podem ser controladas;

iii) validação das medidas de controle empregadas para controlar perigos;

iv) desenvolvimento de um sistema de monitoramento das medidas de controle dentro de um sistema de abastecimento de água;

v) estabelecimento de ações corretivas rápidas para assegurar que a água distribuída é segura; e

vi) verificação da qualidade da água para assegurar que o PSA esteja sendo executado corretamente e o seu desempenho avaliado para atender as metas baseadas na saúde.

O PSA foi concebido e estruturado em três componentes principais: (i) avaliação do sistema; (ii) monitoramento do sistema; e (iii) implementação de planos de gestão (Figura 3).

Em suma, o que se pretende é a implementação de um sistema estruturado que, permeado pela abordagem de prevenção de risco, promova a eliminação, redução ou remoção dos perigos na fonte no processo de tratamento e a prevenção da contaminação no sistema de distribuição.

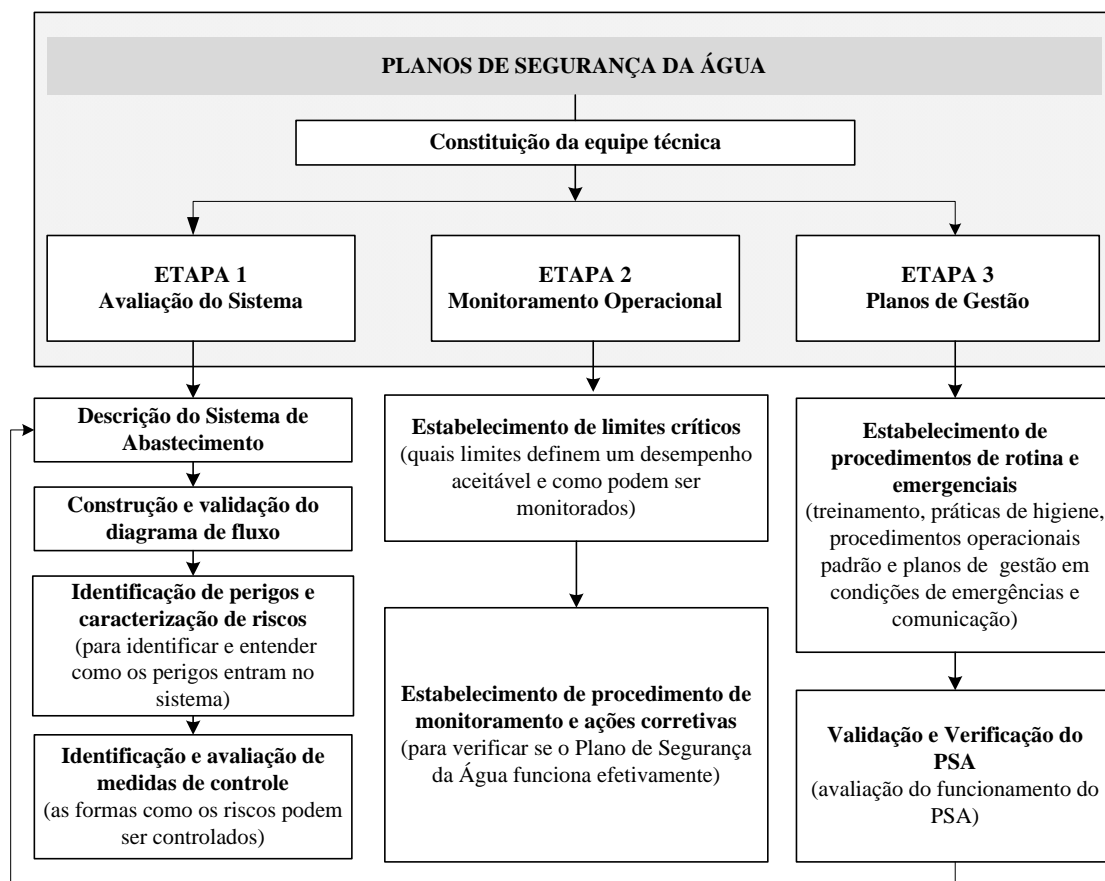


Figura 3. Etapas para o desenvolvimento de um Plano de Segurança da Água

Fonte: Adaptado de WHO (2005) e WHO (2006).

A seguir, discorre-se, anda que sucintamente, sobre as etapas que compõem um PSA.

2.2.1. Avaliação do sistema

A avaliação do sistema deve partir de um diagnóstico o mais detalhado possível da bacia hidrográfica contribuinte à zona de captação até a distribuição e tem por objetivo verificar se este sistema, tal como se encontra, assegura a produção e o abastecimento de água de acordo com as metas de saúde. Essa etapa inclui, portanto, a identificação de perigos, a caracterização do risco e, na sequência, a especificação de medidas de controle.

No Quadro 1 estão listadas algumas informações importantes para a detalhada descrição do sistema de abastecimento de água. Essas

informações subsidiam a construção do “diagrama de fluxo” do sistema, que pode apresentar de forma simples e esquemática todas as etapas do sistema de abastecimento de água.

Quadro 1. Informações importantes para a detalhada descrição do sistema de abastecimento de água

Componentes do sistema de abastecimento	Informações
Bacia de captação	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Hidrologia e geologia ▪ Informações meteorológicas ▪ Usos conflitantes da água ▪ Uso e ocupação do solo ▪ Fontes pontuais e difusas de poluição como atividades agropecuárias, esgotos sanitários, dejetos de animais ▪ Descrição do manancial: informações sobre a qualidade da água, características físicas, vazões, medidas de proteção ▪ Políticas e medidas existentes de proteção dos mananciais e conservação dos recursos hídricos
Estações de tratamento de água	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Descrição dos processos de tratamento ▪ Características físicas da estação ▪ Parâmetros de projeto e de funcionamento dos processos unitários de tratamento: doses de coagulantes, gradientes de velocidade, tempo de floculação, taxa de aplicação superficial (decantação), taxa de filtração, residuais desinfetantes, tempo de contato ▪ Procedimentos de controle operacional ▪ Controle de produtos químicos ▪ Desempenho dos processos unitários ▪ Procedimentos de gestão.
Sistema de distribuição	<ul style="list-style-type: none"> ▪ População atendida (ex: número de ligações, características socioeconômicas, consumo per capita) ▪ Medidas de proteção dos reservatórios de distribuição ▪ Adequação do projeto e condições de operação e manutenção da rede de distribuição (extensão e cobertura da rede, diâmetros, material e idade das tubulações) ▪ Características hidráulicas da rede de distribuição (ex: proteção contra retrossifonagem e conexões cruzadas, estagnação da água em pontas de rede, distribuição de vazões, pressurização do sistema, intermitência de abastecimento, registro de rupturas e vazamentos) ▪ Pontos de coleta de amostras e informações sobre a qualidade da água ▪ Controle operacional e gerenciamento do sistema

Fonte: Adaptado de WHO (2004).

Uma vez descrito o sistema de abastecimento de água, em cada etapa do diagrama de fluxo procura-se identificar perigos e eventos perigosos. A seguir, são listados alguns exemplos de perigos associados aos diversos componentes de um sistema de abastecimento de água. Orientações

adicionais sobre exemplos de perigos e eventos perigosos podem ser encontradas em Howard (2002), WHO (2004), Vieira e Moraes, (2005) e *Health New Zealand* (2005).

(a) Exemplos de perigos / eventos perigosos associados à bacia hidrográfica e à zona de captação

- insuficiência de oferta de água;
 - inexistência de medidas de proteção de nascentes e bacias de captação;
 - inexistência de medidas de disciplina de usos múltiplos e conflitantes da água e solo;
 - inexistência de restrições ao uso para fins recreativos na área de captação;
 - alterações bruscas da qualidade da água.
-
- focos de poluição pontuais ou difusos como atividades agropecuárias, esgotos sanitários, dejetos de animais;
 - sinais de eutrofização e floração de algas;
 - localização imprópria de tomadas de água em relação ao fundo do manancial e influências de correntes; e
 - tomadas de água expostas e sujeitas a violações.

(b) Exemplos de perigos / eventos perigosos associados ao tratamento

- inadequação do processo de tratamento existente à qualidade da água bruta;
- sobrecarga da estação de tratamento;
- controle operacional deficiente dos processos unitários de tratamento, cobrindo as variações sazonais de qualidade da água bruta e de vazões afluentes à estação de tratamento de água;
- negligência no ensaio sistemático de *Jar Test*, dosagem e aplicação incorretas de coagulante;
- negligência no controle rigoroso dos parâmetros de controle da desinfecção: dosagem, tempo de contato e pH;
- procedimentos inadequados para lavagem de filtros;
- recirculação de água de lavagem dos filtros sem a observação de requisitos de segurança;

- desconhecimento ou negligência em relação aos parâmetros hidráulicos de controle e operação dos processos unitários de tratamento: gradientes de velocidade, tempos de detenção hidráulica, taxa de aplicação superficial dos decantadores, taxas de filtração, carreiras de filtração;
- falhas de projeto ou deficiências de instalações e equipamentos;
- falhas de projeto que comprometam a hidráulica e o funcionamento das estações de tratamento de água: tempos de detenção de floculação, decantação e desinfecção insuficientes, granulometria inadequada dos leitos filtrantes;
- estado precário de bombas dosadoras de produtos químicos (coagulantes e desinfetantes) e equipamentos de medição de vazões;
- deterioração dos filtros: leito filtrante, sistema distribuidor de água de lavagem, registros de controle de água de lavagem e água filtrada; e
- controle inadequado da qualidade da água nos processos unitários de tratamento.

(c) Exemplos de perigos / eventos perigosos associados ao sistema de distribuição

- insuficiência de reserva para atender as variações horárias de consumo;
- reservatórios em mau estado de conservação, apresentando fendas e, ou falta de cobertura apropriada;
- negligência na limpeza periódica dos reservatórios, em especial após serviços de construção e reparos;
- negligência no controle de qualidade da água no interior dos reservatórios;
- insuficiência de adequada pressurização na rede de distribuição;
- serviços intermitentes, acarretando diminuição da pressão ou pressão negativa na rede;
- presença de pontos mortos, provocando redução de pressões, pressões negativas, baixas velocidades ou consumo de cloro;
- proximidade e conexões indevidas de dispositivos de descarga com redes de esgotos e de drenagem pluvial;
- pontos de descarga mal localizados na rede e negligência na limpeza, principalmente após operações de reparo e manutenção;

- pressões excessivas e estado de conservação precário da rede, provocando pontos de perda de água e possíveis infiltrações;
- estado de conservação precário ou material impróprio da rede, provocando a deterioração da qualidade da água (exemplos: redes em ferro fundido ou chumbo);
- formação de biofilmes, por exemplo, devido à insuficiência do tratamento ou negligência na limpeza da rede, provocando o consumo do residual de cloro e a colonização do sistema com bactérias patogênicas oportunistas; e
- acúmulo de sedimentos e matéria orgânica na rede de distribuição, provocando o consumo do residual de cloro ou favorecendo a formação de trihalometanos.

Deve-se, inicialmente, procurar identificar todos os perigos / eventos perigosos de ocorrência possível, os quais devem, entretanto, ser priorizados, com o emprego, por exemplo, da técnica de Análise de Perigos e Pontos Críticos de Controle (APPCC) e de técnicas de caracterização dos riscos, tais como a matriz probabilidade x consequência de risco ou a Avaliação Quantitativa do Risco (descritas em itens a seguir). Naturalmente, perigos / eventos perigosos com maior severidade e probabilidade de ocorrência devem merecer maior consideração e prioridade de ação, relativamente àqueles cujos impactos são insignificantes ou cuja ocorrência é muito improvável.

Uma vez identificados os eventos perigosos e caracterizados os riscos, a esses eventos devem ser associadas medidas de controle. Para Bastos *et al.* (2005), a identificação das medidas de controle deve ser baseada no princípio das múltiplas barreiras em todo o processo de produção de água para consumo humano. Bastos *et al.* (2005) sugere, ainda, alguns exemplos de boas práticas que merecem atenção contínua: (i) o estado de proteção e conservação de nascentes e bacias de captação dos mananciais; (ii) a manutenção do bom estado de conservação e proteção das estruturas e equipamentos de captação, recalque e adução; (iii) a manutenção do bom estado de proteção e conservação dos reservatórios de distribuição; (iv) a manutenção do bom estado de conservação da rede de distribuição; (v) a manutenção de pressurização em toda a rede de distribuição; (vi) a

realização de operações planejadas e seguras de reparos e manutenção nas linhas adutoras e na rede de distribuição; (vii) a implementação de controle de qualidade de laboratório; (viii) o levantamento dos parâmetros ótimos e controle periódico dos parâmetros de operação dos processos unitários de tratamento: gradientes de velocidade de mistura e floculação, tempos de detenção hidráulica dos flocladores, decantadores e tanque de contato, taxa de aplicação superficial dos decantadores, taxas de filtração, carreiras de filtração etc.; (ix) a aferição constante dos equipamentos de dosagem de desinfetantes; e (x) a manutenção do bom estado de conservação dos filtros: leitos filtrantes, estruturas e peças e equipamentos de controle de vazões afluentes, água filtrada e água de lavagem dos filtros.

2.2.2. Monitoramento operacional

A cada perigo priorizado nos diversos componentes do sistema, além das medidas de controle, devem ser associados programas de monitoramento, de forma a verificar, continuamente, se tais medidas se mantêm eficazes na eliminação dos perigos ou minimização dos riscos.

Definidos Pontos Críticos de Controle (PCC) (por exemplo, por meio do emprego da árvore decisória do sistema APPCC, ou das matrizes de risco, descritas nos itens 2.3.1 e 2.3.2), a estes devem ser associados parâmetros de controle e programas de monitoramento para verificar se são atendidos os limites críticos.

No sistema APPCC, os pontos críticos de controle são definidos como locais vulneráveis onde é absolutamente essencial prevenir, eliminar ou reduzir um perigo em níveis aceitáveis. A definição de um PCC está associada ao conceito de múltiplas barreiras, ou seja, a identificação de um PCC significa que as fases posteriores do processo não conseguem eliminar o perigo ou reduzir a probabilidade do perigo em níveis aceitáveis.

Os limites críticos definem se o perigo é mantido sob controle e, portanto, sua violação requer ações corretivas. Na definição de limites críticos e programas de monitoramento, cabe destacar os seguintes aspectos:

- os parâmetros de controle (indicadores da qualidade da água, de desempenho operacional etc.) devem ser de fácil obtenção ou determinação e proporcionar resposta rápida;
- o programa e os parâmetros de controle assim como os limites críticos não necessariamente são os mesmos constantes na norma de qualidade da água para consumo humano; e
- os limites críticos podem ser estabelecidos em termos de limites superiores, limites inferiores, um intervalo ou um conjunto de medidas de desempenho (por exemplo, percentual de atendimento, distribuição de frequência).

No Quadro 2, são apresentadas sugestões genéricas de parâmetros de controle, para os quais podem ser definidos limites críticos, guardados os princípios de facilidade de implantação e agilidade de resposta. Outros exemplos podem ser encontrados em Bartram *et al.* (2003), Ainsworth (2004) e LeChevallier e Au (2004).

Aos pontos críticos de controle devem ser associados limites críticos e programas de monitoramento, os quais devem se basear em parâmetros de fácil determinação que possibilitem respostas ágeis (Quadro 2).

A título de exemplo, quando identificado um PCC na etapa da filtração pela negligência no controle operacional dos filtros, esse ponto deve ser monitorado e estabelecido um limite crítico. Os parâmetros recomendados para serem monitorados, conforme Quadro 2, são a turbidez, vazão e perda de carga. O monitoramento dessa etapa (filtração) tem a finalidade principal de remoção de protozoários.

Quadro 2. Exemplos de parâmetros de monitoramento em pontos críticos de controle

Parâmetro	Água bruta Manancial Entrada da ETA	Mistura coagulação	Floculação	Sedimentação	Filtração	Desinfecção Saída da ETA	Distribuição
Precipitação pluviométrica	X						
Vazão	X	X	X	X	X	X	
Pressão							X
Perda de carga					X		
pH	X	X				X	X
Dosagem de produtos químicos		X				X	
Turbidez	X			X	X	X	X
Cor	X					X	X
Coliformes	X					X	X
Contagem de bactérias heterotróficas						X	X
Cloro residual						X	X
Tempo de contato x residual desinfetante						X	

Fonte: Adaptado de WHO (2004).

Os perigos considerados devem ser eliminados ou reduzidos por meio de uma ou mais ações corretivas. O desvio dos limites críticos requer a implementação de medidas corretivas (previamente planejadas), garantindo-se, desta forma, os objetivos de qualidade pretendidos e a renovação do funcionamento do sistema dentro dos valores previamente estabelecidos. Todo este procedimento deve ser devidamente documentado para, continuamente, verificar a eficácia das medidas de controle.

2.2.3. Planos de gestão

Os planos de gestão devem ter por base a devida documentação e a constante atualização das etapas anteriores, quais sejam:

- avaliação do sistema de abastecimento, incluindo a identificação de perigos e pontos críticos de controle;
- os resultados do programa de monitoramento; e

- a eficácia das medidas de controle, incluindo as medidas preventivas e corretivas e melhorias implantadas.

Os planos de gestão devem incluir devidamente documentados, protocolos de ação apropriados para responder à rotina de operação do sistema e a incidentes - planos de emergência, por exemplo, para os seguintes casos: acidentes com cargas perigosas no manancial, interrupção do fornecimento de água, falhas no sistema de tratamento (rompimento de filtros, quebra de equipamentos de dosagem, etc.).

Os planos de gestão devem também incluir, devidamente documentados, programas de suporte, tais como programas de preservação de mananciais, capacitação de recursos humanos, controle de qualidade laboratorial, calibração de instrumentos, controle de estoque e de qualidade de produtos químicos, programas de implantação de boas práticas.

Por fim, os planos de gestão devem prever a verificação periódica de adesão ao PSA e de sua eficácia, além de estratégias de comunicação, incluindo: i) procedimentos para alerta em situações de emergência e ii) informação às autoridades de saúde pública e consumidores.

A última etapa envolve a verificação constante do PSA, com o intuito de avaliar seu funcionamento, e se os objetivos baseados em saúde estão sendo alcançados. Entende-se que o PSA deva ser objeto de auditorias periódicas, internas e externas.

2.3. Métodos e técnicas utilizados na avaliação de risco à saúde em sistemas de abastecimento de água para consumo humano

2.3.1. Sistema de Análise de Perigos e Pontos Críticos de Controle (APPCC)

A Análise de Perigos e Pontos Críticos de Controle (APPCC), do inglês (*Hazard Analysis and Critical Control Points - HACCP*) surgiu na década de 1960 pela exigência da NASA de produzir alimentos inócuos para seus primeiros voos tripulados.

O sistema de APPCC foi desenvolvido a partir do embasamento teórico de

um sistema de engenharia conhecido como Análise de Modos de Falhas e Efeitos (*Failure Mode and Effect Analysis - FMEA*), em que são observadas, em cada etapa do processo, as falhas que podem ocorrer, suas causas prováveis e seus efeitos, para então estabelecer mecanismos de controle (WHO, 1998).

O desenvolvimento de todos os princípios do APPCC ocorreu somente em 1993, com o estabelecimento das diretrizes do *Codex Alimentarius* (FAO / WHO, 1993), que ficou conhecido como *Codex Guidelines for Application of the HACCP System*.

No Brasil, o Ministério da Saúde e o Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento já têm ações com objetivo de adoção da APPCC pelas indústrias alimentícias, por meio da Portaria nº 1.428 / 2003. Os dois órgãos reguladores vêm desenvolvendo uma série de ações para a adoção do sistema pelas empresas nacionais.

O sistema APPCC é definido como um enfoque sistemático para identificar perigos que podem afetar a inocuidade de um alimento, a fim de estabelecer medidas para controlá-los (WHO, 1998). Esse sistema tem como fundamento a detecção de pontos críticos de controle, seu monitoramento e a intervenção na medida em que são detectadas alterações nos parâmetros selecionados para avaliação da qualidade no processo produtivo (MOSSEL, 2004).

Uma das características fundamentais desse sistema é o seu caráter preventivo, pela possibilidade de intervenção antes da distribuição do produto final. Essa perspectiva encontra na produção de água de consumo, amplo campo de aplicação, uma vez que o fornecimento de água de qualidade estaria sendo garantido por várias barreiras sequenciais de monitoramento (MOSSEL, 2004).

Inicialmente, o sistema continha três princípios: (i) identificação e avaliação de perigos associados com a criação / comercialização / abate / industrialização / distribuição; (ii) determinação de pontos críticos para controlar os perigos identificados; e (iii) o estabelecimento de sistemas para monitorar os pontos críticos de controle (ALMEIDA, 1998). Atualmente, o sistema APPCC apresenta doze componentes, sendo cinco etapas preliminares e sete princípios. Os princípios do sistema APPCC aplicados à indústria de

alimentos podem ser descritos como a seguir, tomando como referências centrais *CODEX ALIMENTARIUS* (1993), WHO (1998) e Almeida (1998).

(a) Princípio 1: Identificação de perigos

Esse princípio inclui a identificação dos perigos significativos (microbiológicos, químicos, físicos ou situação) que podem ocorrer durante as diferentes etapas do processamento de um alimento, bem como verificação se existem medidas de controle aplicáveis. A identificação desses perigos se baseia na estimativa da severidade, ou seja, nas consequências para a saúde do consumidor e no risco, entendida como a probabilidade de contaminação, crescimento ou sobrevivência no produto.

Para WHO (1998), essa etapa é fundamental para: (i) definir as medidas preventivas de controle para os perigos identificados; (ii) proceder ao eventual diagrama de fluxo do processo; e (iii) subsidiar a determinação de pontos críticos de controle.

Identificados e caracterizados os perigos, eles devem ser representados em diagrama de fluxo e listados juntamente com as respectivas medidas preventivas de controle.

(b) Princípio 2: Identificação dos Pontos Críticos de Controle

Situações ou locais onde foram identificados perigos significativos são, usualmente, denominados Pontos Crítico de Controle (PCCs). Os PCCs podem ser definidos como pontos, etapas ou procedimentos em que se possam aplicar medidas de controle para prevenir, eliminar ou reduzir os perigos a níveis aceitáveis (MORTIMORE e WALLACE, 1996).

O Ponto de Controle (PC) é entendido como uma etapa do processo em que a perda / falta de controle não implica risco significativo³ para a saúde (WHO, 1998).

Como citado por Braga (2007), várias pesquisas se referem a Pontos Críticos de Atenção (PCA), definidos como atividades, pontos ou fatores que também precisam ser controlados, mas não da mesma forma sistemática e imperativa que os PCCs. A distinção entre PCCs e PCAs, na prática, está relacionada à possibilidade de operacionalização de seu monitoramento. Portanto, quando o parâmetro utilizado para o monitoramento do PC não

³ Esse risco significativo é entendido como dentro do limite crítico definido em normas ou preestabelecido pelo gestor.

disponibiliza resultados ágeis, ou o parâmetro utilizado é fragilmente correlacionado ao(s) perigo(s) identificado(s), ou ainda, quando a frequência de monitoramento é pequena (por exemplo, devido ao custo das análises), pode-se optar por considerar um ponto crítico como objeto de atenção e verificação (PCA) e não como um ponto de monitoramento sistemático e contínuo (PCC). Na verdade, o monitoramento ideal de um PCC deve ser feito a partir de análises simples, de baixo custo e que resultem em dados imediatos (BRAGA, 2007).

Para identificar os pontos nas etapas do processo nas quais o controle é crítico (PCC), a ferramenta usada é a Árvore de Decisão, Figura 4, que consiste de uma série de perguntas que devem ser respondidas para cada perigo encontrado em cada etapa do processo de produção (MORTMORE e WALLACE, 2001).

A flexibilidade e o uso da experiência são as condições básicas para uma aplicação mais racional do sistema APPCC. A árvore de decisão deve ser usada depois de concluída a análise de perigos, sendo seu uso previsto para aquelas etapas em que foram identificados os perigos significativos.

(c) Princípio 3: Estabelecimento dos limites críticos

Limites críticos devem ser estabelecidos para aqueles perigos que não são passíveis de eliminação (ALMEIDA, 1998; DRESCH e JONG, 2002), mas sim de controle em determinado ponto / etapa. Os limites críticos têm que ser mensuráveis, geralmente, são os parâmetros químicos, físicos ou microbiológicos e devem atender às exigências estabelecidas por órgãos governamentais, legislações, padrões da empresa, dados científicos e, ou dados operacionais.

Os limites críticos podem ser parâmetros mensuráveis ou constituir avaliação qualitativa de um ponto crítico, como, por exemplo, observação de uma situação ou procedimento. Mortimore (2000) chama atenção para o fato de que sua determinação pode ser feita a partir de informações em publicações científicas, legislação ou por determinação experimental.

(d) Princípio 4: Estabelecimento de procedimentos de monitoramento dos PCC

O monitoramento é uma sequência planejada de observações e de medidas para avaliar se um PCC está controlado. Segundo Almeida (1998), o

monitoramento possui três funções básicas: (i) garantir a inocuidade do produto; (ii) identificar perda de controle e ocorrência de desvios em um PCC (violação do limite crítico); e (iii) proporcionar documentação escrita a ser utilizada na etapa de verificação.

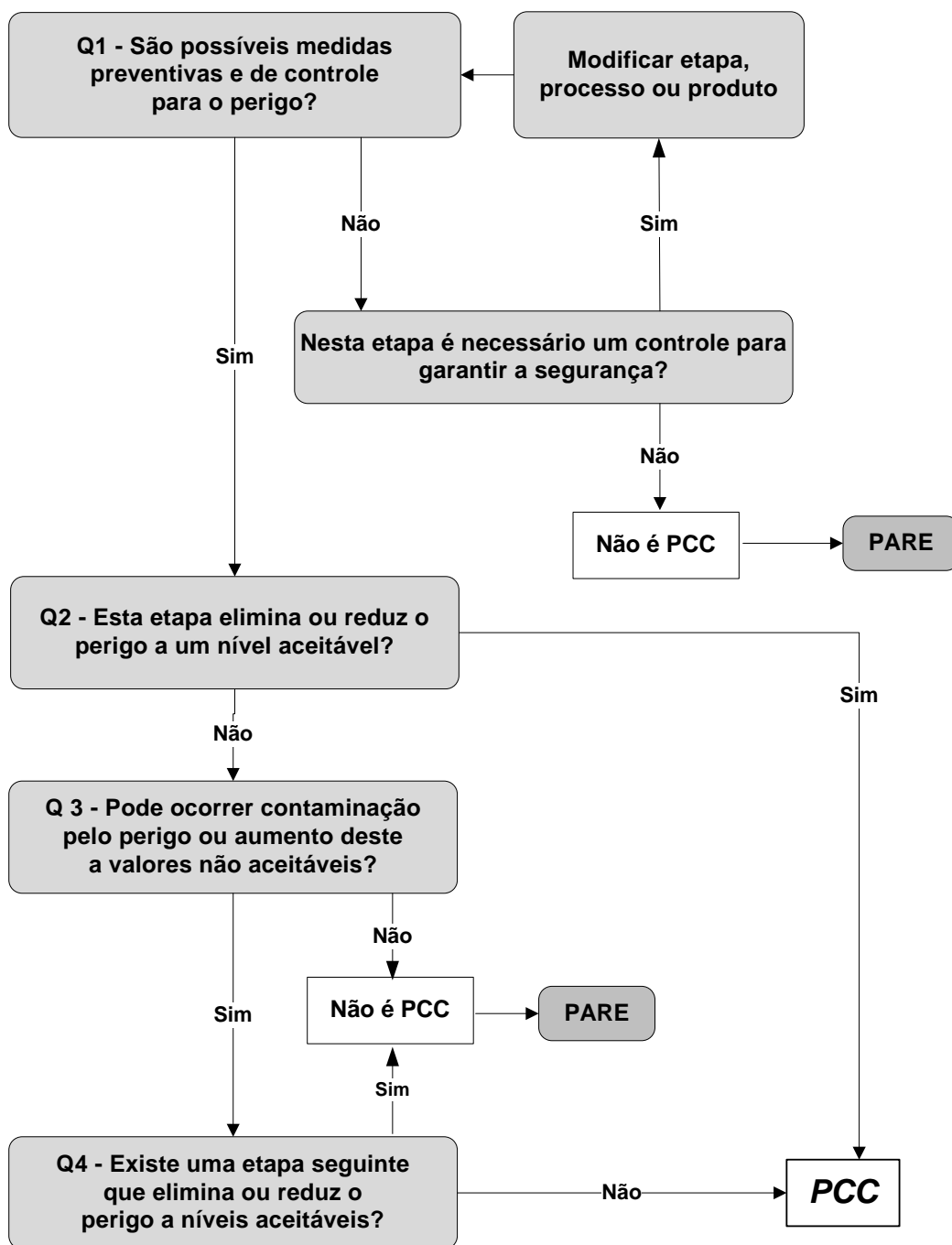


Figura 4. Árvore de decisão para definição de Pontos Críticos de Controle

Fonte: Adaptado de WHO (1997).

Essa etapa inclui a definição dos parâmetros de controle (por exemplo, a observação visual, avaliação sensorial, medidas físicas, testes químicos e análises microbiológicas) e a frequência de monitoramento, o que deve, na medida do possível, contemplar controle estatístico do processo. Simplicidade do monitoramento e agilidade na obtenção de respostas devem também constituir objetivos do processo.

(e) Princípio 5: Estabelecimento das medidas corretivas

Apesar de o sistema APPCC se basear em estratégia preventiva, ações corretivas deverão ser adotadas quando o monitoramento detectar desvios do limite crítico. Portanto, no plano APPCC, são especificadas as medidas corretivas (por exemplo, modificações no processo de produção) para assegurar a retomada de controle do PCC ou, em último caso, determinar novo destino para o produto. A implementação das medidas de controle e os respectivos resultados devem também ser objeto de registros.

(f) Princípio 6: Estabelecimento dos procedimentos de registro

Consiste em estabelecer um sistema eficaz da documentação do APPCC. Esse princípio se baseia no arquivo de registros a ser mantido em local de fácil acesso no próprio estabelecimento. Por sua vez, esses arquivos devem ser elaborados de maneira organizada para que, periodicamente, sejam revistos.

(g) Princípio 7: Estabelecimento dos procedimentos de verificação

Essa etapa consiste em verificar e assegurar que o sistema APPCC continue funcionando eficazmente. Para tanto, faz-se uso da revisão dos limites críticos, como também dos próprios PCCs, da análise laboratorial detalhada dos produtos e das validações periódicas documentadas, independentemente de auditorias ou outros processos de verificação. Alguns exemplos de atividades de verificação podem ser citados: verificação da agenda de inspeção, revisão do sistema APPCC, revisão dos registros de PCCs, coleta aleatória de amostras e análises, revisão de limites críticos para verificar se estão adequados ao controle dos perigos.

A literatura internacional registra vários trabalhos de aplicação da metodologia APPCC em sistemas de abastecimento de água para consumo humano, entre os quais, podem ser citados os trabalhos de Havelaar (1994), Dewettinck *et al.* (2001), Howard (2003), Fok e Emde (2004), Kuslikis e

White (2004), Stevens *et al.* (2004), Smith (2004), Westrell *et al.* (2004) e Gunnarsdottir e Gissurarson (2006). No Brasil, Braga (2007) e Oliveira (2011) apresentam estudo utilizando o sistema APPCC em sistemas de abastecimento de água em Viçosa MG.

Hrudey (2004) enfatiza que os princípios do APPCC são mais facilmente aplicados em estações de tratamento de água por incluírem etapas sequenciais (múltiplas barreiras). Essa mesma menção é também feita nos guias para a qualidade da água para consumo humano da Austrália, com o adendo (ressalva) de que a APPCC não é de fácil aplicação em bacia hidrográfica e sistema de distribuição (NHMRC / NRMMC, 2004), já que estes componentes se apresentam como 'sistemas abertos', ou seja, sistemas que fogem ao controle.

No âmbito internacional, a maior parte dos serviços tem buscado implantar o sistema APPCC juntamente com sistemas de gestão de riscos e de qualidade (KUSLIKIS e WHITE 2004; DAVISON e BARTRAM 2004; MARTEL *et al.*, 2006). Os princípios do sistema APPCC têm ainda sido incorporados e, ou recomendados, em normas de qualidade da água (ou congêneres), em diversos países.

2.3.2. Matrizes de priorização do risco

Na avaliação do risco, seja por meio de técnicas qualitativas, semiquantitativas ou quantitativas, é importante a definição das chamadas 'Zonas de Decisão' ou 'Nível de Tolerabilidade' do risco (DE CICCIO e FANTAZZINI, 2003).

Na Matriz de Tolerabilidade de Riscos proposta por De Cicco e Fantazzini (2003), Figura 5, os riscos são mensurados com base na probabilidade de ocorrência e severidade das consequências e hierarquizados tomando como ponto de corte de tolerabilidade o critério de 'risco tão baixo quanto praticável' (ALARP - *As Low As Reasonably Practicable*).

(a) Análise qualitativa

A análise qualitativa requer utilização de termos que bem expressem a probabilidade de ocorrência e a severidade das consequências de um

determinado risco. É frequentemente utilizada nas seguintes situações: (i) nas fases iniciais de processos, de forma a identificar riscos que possuem alto nível de criticidade; (ii) quando o nível do risco identificado não necessitar de análises mais detalhadas; e (iii) quando não for possível realizar análise quantitativa pela carência de informações numéricas (AS / NZ, 2004). O Quadro 3 apresenta exemplos de escalas qualitativas de probabilidade de consequência e ocorrência, que servem a exercícios de priorização do risco.



Figura 5. Matriz de tolerabilidade de riscos

Fonte: De Cicco e Fantazzini (2003).

Quadro 3. Exemplos de características qualitativas de probabilidade de ocorrência e de consequência de riscos

Consequência			Ocorrência		
Nível	Descritor	Descrição da probabilidade das consequências	Nível	Descritor	Descrição da probabilidade de ocorrência
1	Insignificante	Sem danos à saúde, prejuízo econômico reduzido.	A	Quase certo	Espera-se que ocorra na maioria das vezes.
2	Reduzida	Efeito à saúde baixo e prejuízo econômico moderado	B	Provável	Provavelmente ocorrerá na maioria das vezes.
3	Moderada	Efeito considerável à saúde (por exemplo, tratamento médico necessário), prejuízo econômico significativo.	C	Possível	Deverá ocorrer eventualmente
4	Elevada	Efeito grave à saúde, perda de capacidade de produção, prejuízo econômico elevado.	D	Improvável	Poderá ocorrer eventualmente
5	Catastrófica	Efeito letal ou efeito tóxico crônico, enorme prejuízo econômico	E	Raro	Poderá ocorrer em circunstâncias excepcionais.

Fonte: Adaptado de AS / NZ (2004).

Selecionadas as escalas qualitativas, é possível construir uma matriz qualitativa de priorização do risco, cruzando níveis de probabilidade e ocorrência (Quadro 4).

Quadro 4. Exemplo de matriz qualitativa de priorização de risco

Probabilidade	Consequência				
	Insignificante (1)	Reduzida (2)	Moderada (3)	Elevada (4)	Catastrófica (5)
Quase Certo (A)	Alto	Alto	Elevado	Elevado	Elevado
Provável (B)	Moderado	Alto	Alto	Elevado	Elevado
Possível (C)	Baixo	Moderado	Alto	Elevado	Elevado
Improvável (D)	Baixo	Baixo	Moderado	Alto	Elevado
Raro (E)	Baixo	Baixo	Moderado	Alto	Alto

Fonte: Adaptado de AS / NZ (2004).

Para fins de hierarquização do risco e definição de prioridades, a seguinte interpretação pode ser feita dos resultados da matriz:

- Risco elevado: necessidade de ação imediata;
- Risco alto: necessidade de especial atenção;
- Risco moderado: necessidade de atenção; e

- Risco baixo: controlável por meio de procedimentos de rotina.

(b) Análise semiquantitativa

Na análise semiquantitativa, são atribuídos valores numéricos aos descritores de probabilidade e consequência de forma que de seu cruzamento resulte produto numérico, como exemplificado no Quadro 5.

Quadro 5. Exemplo de matriz semiquantitativa de priorização de risco

Probabilidade	Consequência				
	Insignificante (1)	Reduzida (2)	Moderada (3)	Elevada (4)	Catastrófica (5)
Quase Certo (5)	Alto (5)	Alto (10)	Elevado (15)	Elevado (20)	Elevado (25)
Provável (4)	Moderado (4)	Alto (8)	Alto (12)	Elevado (16)	Elevado (20)
Possível (3)	Baixo (3)	Moderado (6)	Alto (9)	Elevado (3)	Elevado (15)
Improável (2)	Baixo (2)	Baixo (4)	Moderado (6)	Alto (8)	Elevado (10)
Raro (1)	Baixo (1)	Baixo (2)	Moderado (3)	Alto (4)	Alto (5)

Fonte: Adaptado de AS / NZ (2004).

Os resultados do Quadro 5 podem ser interpretados como de risco elevado, Alto, Moderado e Baixo. Observa-se, no exemplo do Quadro 5 que um mesmo produto numérico pode ser classificado em níveis distintos de risco, dependendo do que for assumido como de maior peso (ocorrência ou consequência). Portanto, nessa abordagem, assim como na matriz qualitativa, em função do elevado grau de subjetividade, é preciso definir os descritores por meio da atribuição de pesos.

2.3.3 Avaliação quantitativa do risco

Riscos à saúde podem ser quantificados por meio da medida da associação entre qualidade da água para consumo humano e a ocorrência de agravos / doenças (risco relativo, risco atribuível, risco absoluto, risco atribuível na população exposta e razão de chance). Entretanto, isso demanda estudos epidemiológicos por vezes complexos, nem sempre de fácil interpretação, e com sensibilidade limitada para a detecção de baixos níveis de risco (a menos que amostras populacionais muito grandes sejam utilizadas) (BLUMENTHAL *et al.*, 2001; HUNTER *et al.*, 2001). Como ressalta Cairncross (1991), citado por Heller (1997): "estudos

epidemiológicos” de impacto sobre a saúde não são uma ferramenta operacional para a avaliação de projetos ou intervenções para 'sintonia fina', no setor de abastecimento de água e esgotamento sanitário. Os resultados são imprevisíveis e algumas vezes surpreendentes, na medida em que não oferecem interpretação eficaz. Porém, não obstante sua imprevisibilidade, tomados em conjunto, fornecem firme evidência de que o abastecimento de água, a disposição de excretas e a educação sanitária podem ter impacto significativo nas doenças diarreicas.

Na impossibilidade da medida do risco, alternativamente se pode recorrer à estimativa do risco com o emprego de técnicas de Avaliação Quantitativa do Risco (AQR). Essa metodologia, que há algum tempo é o paradigma central de estudos sobre danos à saúde decorrentes da exposição a substâncias químicas (Avaliação Quantitativa do Risco Químico - AQRQ) (USEPA, 1987; USEPA, 2005), tem sido adaptada à exposição a organismos patogênicos (Avaliação Quantitativa do Risco Microbiológico - AQRM) e servido de base à formulação de diretrizes e normas de qualidade da água (HEALTH CANADA, 1995; HAAS *et al.*, 1999; USEPA, 2004; WHO, 2006; NHMRC / NRMCC, 2004).

Genericamente, a metodologia de AQR segue os mesmos princípios e etapas descritas no item 2.1: identificação de perigos, avaliação da dose-resposta, caracterização da exposição e caracterização do risco, em parte detalhadas a seguir na aplicação do método aos perigos químicos e microbiológicos. O texto a seguir tem como referências centrais WHO (2006) e Bastos *et al.* (2009)

(a) Avaliação Quantitativa do Risco Químico (AQRQ)

Identificados os perigos (as substâncias químicas em questão), as respectivas informações de dose-resposta podem advir de estudos toxicológicos humanos e, ou epidemiológicos, mas são, preponderantemente, obtidas de ensaios de laboratório com animais.

Para substâncias carcinogênicas genotóxicas, dados experimentais (dose-resposta) são extrapolados de doses elevadas (como, em geral, são utilizadas nos experimentos) para doses mais baixas por meio de modelos matemáticos, com base nos quais se estabelece a dose correspondente a risco de câncer de 10^{-4} - 10^{-6} (para a maioria das substâncias, 10^{-5}) (HEALTH

CANADA, 1995; USEPA, 2005; USEPA, 2006 WHO, 2006).

Para substâncias tóxicas não-carcinogênicas e carcinogênicas não-genotóxicas de estudos de toxicidade crônica, são extraídos valores para o Nível do Efeito Adverso Não Observado (NOAEL, do original em inglês *No Observed Adverse Effect Level*), ou seja, a dose ou concentração mais elevada para a qual não se observam aumentos significativos na frequência ou severidade de efeitos adversos entre a população exposta e a população-controle (www.tera.org/iter).⁴

A partir do estabelecimento do NOAEL para as espécies estudadas em ensaios de laboratório e a fim de definir um nível de exposição seguro para seres humanos, são aplicados fatores de incerteza (*FI*) considerando variações interespécie (animal e seres humanos), variações intraespécie (visando a proteger grupos ou indivíduos mais sensíveis ou suscetíveis), a confiabilidade dos estudos ou da base de dados e, ou a natureza ou severidade dos efeitos adversos. Esses aspectos são considerados de forma produtória e, em geral, ao valor de NOAEL é aplicado um fator de incerteza de 100, considerando as variações interespécie (10) e as variações entre indivíduos de populações humanas (10).

Com esses dados, é possível determinar a Ingestão Diária Tolerável (IDT)⁵ (Equação 2.1), ou seja, a quantidade de um agente abaixo da qual as pessoas poderiam estar expostas ao longo de toda a vida (em geral, assumindo 70 anos) sem risco considerável à saúde.

$$IDT = NOAEL / FI \quad (2.1)$$

Em que *IDT* é a Ingestão Diária Tolerável em mg/kg de massa corpórea por dia (mg/kg_{mc.d}); *NOAEL*, a Dose para o Efeito Adverso não Observado (mg/kg_{mc.d}); e *FI*, o Fator de Incerteza.

⁴ Por vezes, é utilizado o LOAEL (*Lowest Observed Adverse Effect Level*): dose ou concentração mais baixa para a qual se observam aumentos significativos na frequência ou severidade de efeitos adversos entre a população exposta e a população-controle (www.tera.org/iter).

⁵ Da expressão inglesa TDI – *Tolerable Daily Intake*. O termo Ingestão Diária Aceitável é usualmente empregado para substâncias deliberadamente incorporadas à produção de alimentos, tais como agrotóxicos e aditivos alimentícios, com o argumento de que cumprem determinada função. Como este não é o caso da maioria dos contaminantes químicos possíveis de serem encontrados na água para consumo humano, exceções seriam, por exemplo, as substâncias utilizadas nos processos de tratamento, tem-se preferido o termo 'tolerável', de forma a explicitar o sentido de tolerância, mais que de aceitação (HEALTH CANADA, 1995; WHO, 2006).

Na etapa de avaliação da exposição, procura-se estimar a contribuição relativa ao consumo de água e, dessa forma, estabelecer a concentração limite, ou seja, o Valor Máximo Permitido (VMP) para uma dada substância na água (Equação 2.2). Como destacam Bastos *et al.* (2009), em uma abordagem integrada de avaliação do risco, devem ser consideradas as exposições via consumo de alimentos e de água, ingestão acidental de solo, inalação e absorção pela pele.

$$VMP = (IDT \times mc \times F_a) / C \quad (2.2)$$

Em que *VMP* é o Valor Máximo Permitido (mg/L); *IDT*, a Ingestão Diária Tolerável (mg/kg_{mc.d}); *mc* é a massa corpórea média (kg); *F_a* é a Fração da IDT atribuída ao consumo de água; e *C*, o Consumo diário de água (L/d).

Os valores de *mc* e *C* na Equação 2.2 variam dependendo do contexto (país, agência reguladora ou norma) (HEALTH CANADA, 1995; USEPA, 2006; WHO, 2006; NHMRC/NRMMC, 2004). Na maioria dos casos, considera-se que a fração da *IDT* atribuída ao consumo de água (*F_a*) deixa margem de segurança relativamente elevada para acomodar outros modos de exposições. Por exemplo, no caso dos agrotóxicos, em que o consumo de alimentos é a principal via de exposição, o valor de *F_a* é fixado em torno de 10-20%. Em situações em que o consumo de água constitui o modo de exposição preponderante, como, por exemplo, no caso dos desinfetantes e produtos secundários da desinfecção, o valor de *F_a* é estabelecido em patamares tão elevados quanto 80% ou 100%.

(b) Avaliação Quantitativa do Risco Microbiológico (AQRM)

Assim como indicado para a AQRQ, identificados os perigos em questão (os organismos patogênicos de interesse), as respectivas informações de dose-resposta em geral advêm de experimentos com humanos ou de estudos epidemiológicos. Desses estudos, dois modelos matemáticos foram selecionados como os que melhor expressam a probabilidade de infecção resultante da ingestão de um número conhecido de organismos: o modelo exponencial (Equação 2.3) e o modelo *Beta-poisson* (Equação 2.4) (HASS *et al.*, 2009):

$$P_i(d) = 1 - \exp(-d/r) \quad (2.3)$$

$$P_i(d) = 1 - [(1 + d/N_{50})(2^{1/\alpha} - 1)]^{-\alpha} \quad (2.4)$$

Em que *P_i* é a probabilidade de infecção para uma única exposição; *d* é o

número de organismos ingeridos por exposição (dose); N_{50} , a dose infectante média; e α e r são os parâmetros característicos da interação agente-hospedeiro (HAAS et al., 1999).

Ambos estimam o risco de infecção associado a uma única exposição, ou seja, a ingestão de determinada dose, que na aplicação do modelo a um dado cenário de exposição é estimada com base no conhecimento da concentração do organismo na água e do padrão de consumo diário de água ($L \cdot d^{-1}$). A caracterização da exposição e do risco é complementada pelo estabelecimento da duração da exposição, o que permite então a estimativa do risco decorrente de múltiplas exposições (por exemplo, risco anual) (Equação 2.5).

$$P_{I(A)}(d) = 1 - [1 - P_I(d)]^n \quad (2.5)$$

Em que $P_{I(A)}$ é a probabilidade anual de infecção decorrente de n exposições à mesma dose (d); P_I é a probabilidade de infecção para uma única exposição; e n é o número de exposições por ano.

Os modelos de AQRM podem ainda ser aplicados de forma inversa, ou seja, estabelecido o risco aceitável, pode-se estimar a concentração admissível de organismos patogênicos na água tratada e, por conseguinte, o grau de tratamento requerido para uma dada concentração encontrada na água bruta.

2.3.4. Redes Bayesianas

Segundo Pear (1988), as redes Bayesianas vêm se tornando a metodologia padrão para a construção dos sistemas que utilizam o conhecimento probabilístico, sendo aplicáveis a uma variedade de atividades no ramo da medicina, engenharia, biologia, etc.

A rede Bayesiana⁶ é um modelo gráfico que representa os relacionamentos probabilísticos entre um grande número de variáveis e realiza inferência probabilística com estas variáveis. O modelo gráfico é entendido como um casamento entre a teoria das probabilidades e a teoria dos grafos, que

⁶ Esse é o nome mais comum, mas existem outros, inclusive rede de crença (conhecimento), rede probabilísticas, rede causal e mapa de conhecimento.

proveem uma ferramenta natural para tratar dois problemas que ocorrem em toda matemática aplicada e engenharia: incerteza e complexidade (JORDAN, 1998).

Para Nassar (2007), as redes Bayesianas procuram representar a realidade, podendo inferir a probabilidade de um ou mais eventos, dada a observação de algumas evidências. Essas evidências são percepções nas quais se baseiam as asserções de probabilidade (RUSSELL e NORVIG 2005).

Segundo Simões *et al.* (2001), as redes Bayesianas são constituídas basicamente por dois componentes, um qualitativo e outro quantitativo.

O componente qualitativo evidencia o conhecimento por meio de modelo grafo (conjunto de arcos e nós) acíclico e direcionado, em que cada nó representa uma variável aleatória (que pode ser discreta ou contínua). Esses nós são conectados por arcos direcionados representando as dependências entre as variáveis do domínio que está sendo modelado. Se um dado arco parte do nó Y e chega ao nó Z , diz-se que Y é pai de Z e que Z é filho de Y .

No componente quantitativo, cada nó X_i recebe uma distribuição de probabilidades condicionais $P(X_i | \text{pais}(X_i))$, exprimindo a influência dos nós pais (nesta expressão pais (X_i) representa o conjunto dos nós pais do nó X_i). As redes bayesianas não apresentam ciclos direcionados, ou seja, não é possível passar duas vezes por determinado nó seguindo um caminho que respeite as orientações dos arcos.

A Figura 6 apresenta um grafo cíclico e acíclico. Devido a isto, é classificada como um grafo direcionado acíclico (ou *Directed Acyclic Graph* - DAG) na teoria dos grafos. Um grafo direcionado em que é possível, a partir de um nó, percorrendo os arcos nas direções indicadas, voltar ao mesmo nó, é um grafo direcionado cíclico Figura 6 (a). Caso não seja possível, a partir de nenhum nó, percorrendo os arcos nas direções indicadas, voltar ao mesmo nó, o grafo direcionado é acíclico Figura 6 (b).

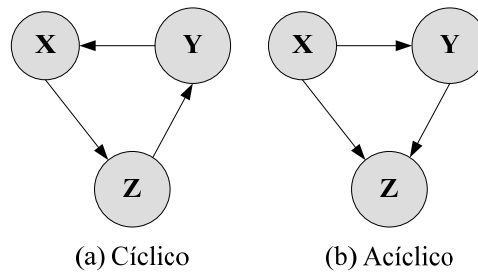


Figura 6. Exemplos de grafos direcionados

Fonte: Russell e Norvig (2005).

Um exemplo de redes Bayesianas é apresentado na Figura 7, em que as variáveis do domínio são *NUTRIENTES*, *GRAU DE TROFIA*, *FLORAÇÃO DE CIANOACTÉRIAS* e *QUALIDADE DA ÁGUA*. Cada uma das variáveis pode assumir apenas dois valores, sim ou não.

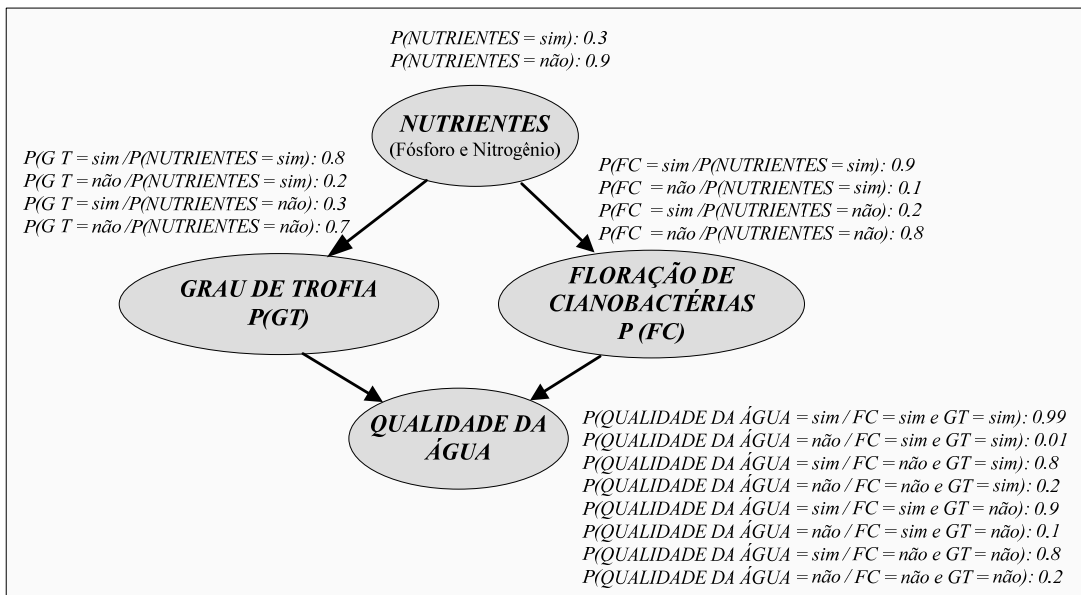


Figura 7. Exemplo de rede Bayesiana

Para a variável *NUTRIENTES*, o valor *sim* indica que na zona de captação de água para consumo humano a concentração de nutrientes (fósforo e nitrogênio) se encontra acima dos limites estabelecidos pela RESOLUÇÃO CONAMA n.º 357/2005. O valor *não* indica que a concentração de nutrientes esteja abaixo dos limites estabelecidos pela legislação.

Para a variável *GRAU DE TROFIA*, o valor *sim* indica corpo d'água eutrofizado, ou seja, com alta produtividade em relação às condições naturais. O valor *não* indica corpo d'água sem eutrofização (com baixa produtividade).

Para a variável *FLORAÇÃO DE CIANOACTÉRIAS*, o valor *sim* indica alta

densidade de microalgas e de cianobactérias, por exemplo, acima do limite crítico (ou de alerta) estabelecido na norma brasileira de potabilidade. O valor *não* indica baixa densidade de microalgas e de cianobactérias, ou seja, que naturalmente se faz refletir na não detecção de cianotoxinas.

Para a variável *QUALIDADE DA ÁGUA*, o valor *sim* indica alteração na qualidade da água na zona de captação, implicando eficiência do tratamento da água. O valor *não* indica que a qualidade da água na zona de captação se encontra dentro dos limites para tratabilidade.

Os arcos do grafo direcionado acíclico (*Directed Acyclic Graph - DAG*), que representam as relações existentes entre as variáveis, indicam que a variável *NUTRIENTES* se relaciona com as variáveis *GRAU DE TROFIA* e *FLORAÇÃO DE CIANOBACTÉRIAS* e que essas variáveis se relacionam com a variável *QUALIDADE DA ÁGUA*.

As probabilidades condicionais de cada nó quantificam essas relações. As probabilidades condicionais do nó *FLORAÇÃO DE CIANOBACTÉRIAS*, por exemplo, explicitam as probabilidades de densidade de microalgas e de cianobactérias acima do nível de alerta ou abaixo, uma vez estabelecida a presença de nutrientes ou não no corpo d'água. Se o valor da variável *NUTRIENTES* for *sim*, então a probabilidade de o valor da variável *FLORAÇÃO DE CIANOBACTÉRIAS* ser *sim* é de 0.9. Se o valor da variável *NUTRIENTES* for *não*, então a probabilidade de o valor da variável *FLORAÇÃO DE CIANOBACTÉRIAS* ser *sim* é de 0.2.

A teoria de decisão Bayesiana é usada para gerar um modelo probabilístico, pois ela permite determinar probabilidades condicionais de uma evidência *a priori*, já as probabilidades revisadas são chamadas probabilidades *a posteriori*.

Em relação aos conceitos probabilísticos envolvidos neste tipo de representação, o item seguinte apresenta uma breve descrição dos conceitos probabilísticos utilizados na abordagem das redes Bayesianas.

(a) Distribuição a priori

A Distribuição *a priori* ou incondicional associada a uma proposição *a*, representada por $P(a)$, é o grau de conhecimento acordado para a proposição independentemente de quaisquer outras informações (RUSSELL e NORVIG, 2005). A distribuição *a priori* $P(a)$ pode ser usada somente

quando não existir nenhuma outra informação. Quando outras informações novas são conhecidas, devemos raciocinar com a probabilidade condicional de a , dadas essas novas informações. No exemplo da Figura 7, a distribuição *a priori* seria a probabilidade de ocorrer nutrientes na zona de captação é de 0.3.

(b) Probabilidade condicional

Para a probabilidade condicional ou *a posteriori*, a notação usada é $P(a|b) = x$ em que a e b são proposições quaisquer. Essa expressão é lida com “dado o evento b , a probabilidade de a é x ”. Uma regra fundamental que se extrai da definição de probabilidade condicional é conhecida como regra do produto. A regra do produto vem do fato de que, para a e b serem verdadeiras, é necessário que b seja verdadeira, e também que a seja verdadeira dada a b . Essa propriedade está representada na Equação (2.6) para dois eventos.

$$P(a, b) = P(b|a)P(a) \quad (2.6)$$

A probabilidade condicional pode ser definida pela Equação (2.7).

$$P(a|b) = \frac{P(a|b)P(b)}{P(b)} \quad (2.7)$$

Na Equação 2.7, a probabilidade $P(a | b)$ é a denominada probabilidade condicional “*a posteriori*” de ocorrência de um evento em a , dado que tenha ocorrido um determinado evento dentro do conjunto de dados b . O termo $P(b)$ é a distribuição *a priori* da hipótese b . A distribuição *a priori* é a probabilidade de ocorrência não condicionada ao treinamento, e somente ao conjunto de dados que compõem o treinamento. Ela é calculada avaliando-se a probabilidade inicial de ocorrência de cada classe dentro do conjunto de treinamento.

As referidas distribuições de probabilidade condicionais, que representam a atualização do conhecimento adquirido, foram estimadas por meio da distribuição *a priori* via opinião de especialista, geometricamente ou por meio de base de dados.

No exemplo da Figura 7, a probabilidade *a posteriori* seria a probabilidade de ocorrer alteração na qualidade da água na zona de captação, dada a

evidência de que na zona de captação ocorram eutrofização e alta densidade de microalgas e de cianobactérias, que seria de 0.95.

Segundo Hruschka *et al.* (1997) e Coelho *et al.* (2002), o raciocínio ou inferência Bayesiana ou ainda a propagação do conhecimento é justamente o processo de atualização das probabilidades *a posteriori* baseado nas probabilidades condicionais e na evidência fornecida (CARNEIRO *et al.* (1999); KADIE *et al.*, 2001). Nas redes Bayesianas, a evidência pode ser definida para qualquer subconjunto de nós e a probabilidade *a posteriori* pode ser calculada para qualquer outro subconjunto de nós (FRIEDMAN *et al.*, 1998).

Como uma rede Bayesiana representa um modelo probabilístico completo do domínio e como é possível a partir dela calcular a distribuição de probabilidade conjunta para todas as variáveis envolvidas, fica claro que a rede contém informação suficiente para calcular probabilidades de quaisquer variáveis E_1, E_2, E_n (RAMONI *et al.*, 1995).

Em particular, podemos calcular a probabilidade de a variável E_i assumir o valor e_i , dado que $\{E_k = e_k\}, k=1..n, k \neq i$, ou seja, a probabilidade *a posteriori* de E_i .

Essa propagação de crença pode ser calculada pelo teorema de Bayes e pelo teorema da probabilidade total (LARSON, 1982).

Usando novamente a rede Bayesiana do exemplo mostrado na Figura 7 para ilustrar o processo de inferência Bayesiana, tem-se que, dada a evidência da presença de nutrientes no corpo d'água na zona de captação, $\{NUTRIENES: sim\}$, qual seria a probabilidade de ocorrer alteração na qualidade da água, $P(QUALIDADE DA \acute{A}GUA: sim)$?

Como *NUTRIENES* é igual a *sim*, a probabilidade de ocorrência de floração de cianobactérias acima do nível de alerta será:

- $P(GRAU DE TROFIA = sim) | NUTRIENES = sim): 0.8;$
- $P(GRAU DE TROFIA = não): 0.2$
- $P(FLORAÇÃO DE CIANOBACTÉRIAS=sim): 0.9;$
- $P(FLORAÇÃO DE CIANOBACTÉRIAS= não): 0.1.$

Como esses valores de probabilidade *a posteriori* pode-se atualizar a probabilidade de QUALIDADE DA ÁGUA usando o teorema da probabilidade total:

$$P(\text{QUALIDADE DA \u00c1GUA}=\text{sim})=0.99*0.9*0.8+0.8*0.1*0.8+0.9*0.9*0.2+0.8*0.1*0.2 = 0.9548$$

$$P(\text{QUALIDADE DA \u00c1GUA} = \text{n\u00e3o}) =0.01*0.9*0.8+0.2*0.1*0.8+0.1*0.9*0.2+0.2*0.1*0.2 =0.0452.$$

Caso a evid\u00eancia fosse de a vari\u00e1vel *QUALIDADE DA \u00c1GUA*, por exemplo, atualizar a probabilidade de as vari\u00e1veis *FLORA\u00c7\u00c3O DE CIANOBACT\u00c9RIAS* e *GRAU DE TROFIA*, bastaria usar o teorema de Bayes (Equa\u00e7\u00e3o 2.7 para calcular as probabilidades condicionais $P(\text{GRAU DE TROFIA} = \text{sim} \mid \text{QUALIDADE DA \u00c1GUA} = \text{sim})$ e $P(\text{FLORA\u00c7\u00c3O DE CIANOBACT\u00c9RIAS} = \text{sim} \mid \text{QUALIDADE DA \u00c1GUA} = \text{sim})$ a partir das probabilidades da rede Bayesiana e usar novamente o teorema da probabilidade total.

(iv) A sem\u00e2ntica das redes Bayesianas

As redes Bayesianas fornecem uma descri\u00e7\u00e3o completa do dom\u00ednio. Por meio das rela\u00e7\u00f5es de depend\u00eancia condicional entre as vari\u00e1veis do dom\u00ednio, \u00e9 poss\u00edvel determinar a topologia adequada para a rede Bayesiana. Partindo das informa\u00e7\u00f5es apresentadas nessa rede, \u00e9 poss\u00edvel identificar qualquer entrada do dom\u00ednio modelado.

Genericamente, a notaa\u00e7\u00e3o $P(x_1, x_2, \dots, x_n)$ \u00e9 equivalente \u00e0 $P(X_1=x_1 \wedge X_2=x_2 \wedge \dots \wedge X_n = x_n)$ ⁵ e representa uma dada entrada do dom\u00ednio. Observando a regra do produto, obt\u00eam-se a seguinte equa\u00e7\u00e3o para esta entrada:

$$P(x_1, x_2, \dots, x_n) = P(x_n \mid x_{n-1}, \dots, x_1) P(x_{n-1}, \dots, x_1) \tag{2.8}$$

A reaplica\u00e7\u00e3o sistem\u00e1tica da regra do produto gera a identidade apresentada nas Equa\u00e7\u00f5es (2.9) e (2.10), conhecida como Regra da Cadeia.

$$P(x_1, x_2, \dots, x_n) = P(x_n \mid x_{n-1}, \dots, x_1) P(x_{n-1} \mid x_{n-2}, \dots, x_1) \dots P(x_2 \mid x_1) P(x_1) \tag{2.9}$$

$$P(x_1, x_2, \dots, x_n) = \prod_{i=1}^n P(x_i \mid x_{i-1}, \dots, x_1) \tag{2.10}$$

Para o caso de uma rede Bayesiana, tem-se a Equa\u00e7\u00e3o (2.11), que \u00e9 v\u00e1lida se for considerada a restri\u00e7\u00e3o apresentada na Equa\u00e7\u00e3o (2.12).

$$P(X_i \mid X_{i-1}, \dots, X_1) = P(X_i \mid \text{pais}(X_i)) \tag{2.11}$$

$$\text{pais}(X_i) \subseteq \{X_{i-1}, \dots, X_1\} \tag{2.12}$$

Segundo Charniak (1991), a Equa\u00e7\u00e3o (2.11) aponta a independ\u00eancia de cada n\u00f3 em rela\u00e7\u00e3o aos seus predecessores, excetuando-se os n\u00f3s pais. E

a Equação (2.12) presume que os nós pais foram enumerados antes dos nós filhos.

Os resultados apresentados nas Equações (2.10) e (2.11) tornam possível a obtenção da Equação (2.13).

$$P(x_1, x_2, \dots, x_n) = \prod_{i=1}^n P(x_i | \text{pais} X_i) \quad (2.13)$$

Assim, cada entrada da conjunção de probabilidade pode ser obtida por meio da multiplicação dos elementos certos, presentes nas tabelas de probabilidades condicionais da rede. A completa conjunção de probabilidades pode dar qualquer informação a respeito do domínio representado. A rede Bayesiana pode ser utilizada para gerar os dados completos a respeito da conjunção, podendo, desta forma, ser utilizada para representar o domínio, sem perda de informação.

(v) Construção de redes Bayesianas

A construção de redes Bayesianas, de acordo com Russel e Noving (2005), permite quantificar e qualificar o conhecimento de um determinado domínio do problema. Para se construir uma rede Bayesiana, parte-se do princípio de que os dados originais são atuais e refletem o escopo do problema seguido de: (i) primeira etapa: as variáveis e a interpretação da rede Bayesiana são definidas; (ii) segunda etapa: as direções dos grafos acíclicos que indicam as condições de causa e efeito e devem estar de acordo com o conhecimento do especialista; (iii) terceira etapa: uma ou mais redes Bayesianas são construídas usando o conhecimento de estudos, pesquisas e coleta dos dados; e (iv) quarta etapa: calculam-se as distribuições de probabilidades condicionais $P(x_i | \text{Pai})$.

(vi) Aplicação de redes Bayesianas

As redes Bayesianas constituem um modelo probabilístico que mensura relações de causa e efeito por meio de distribuição de probabilidades condicionais (QUEIROZ, 2008). As redes Bayesianas podem ser criadas para lidar com problemas que possuem algum nível de incerteza.

As redes Bayesianas vêm sendo aplicadas em diversas áreas do conhecimento, desde o estabelecimento de diagnósticos de doenças, seleção de tratamentos otimizado, prescrição de tratamentos médicos, modelagem de agentes inteligentes, delineamento de culturas agrícolas,

avaliação genética, tomada de decisão sob incerteza, detecção de fraudes na indústria, robótica, análise da contribuição do erro humano em acidentes de colisão, validação de dados até gestão de recursos hídricos, estudos ecológicos, análise de risco, entre outras áreas.

A abordagem de inferências Bayesianas tem sido empregada no campo da avaliação do risco (IEH,1999), dado que esse tipo de avaliação usualmente envolve juízo de valor, e diferentes atores costumam ter opiniões *a priori* distintas. A inferência Bayesiana incorpora tal aspecto (conhecimento *a priori*, pressupostos e juízos de valor) formalmente na avaliação de risco, por meio de simulações com diferentes pesos (DHA, 2002).

Em estudo realizado para os aproveitamentos hidrelétricos de Foz do Areia e Salto Santiago na bacia do Rio Iguaçu – Paraná, Cataldi *et al.* (2007) aplicaram as técnicas de mineração de dados e de redes neurais com treinamento Bayesiano para auxiliar na escolha da melhor predição das classes de vazões naturais na bacia do Rio Iguaçu. Os resultados obtidos indicaram que a utilização dessa ferramenta pode ser uma solução simples e eficaz para a diminuição dos erros de previsão em horizonte semanal de vazão natural nessa bacia.

Willian (2004) aplicou a abordagem probabilística da rede Bayesiana para explorar as possíveis causas das violações de conformidade em sistema de abastecimento de água na Pensilvânia, Estados Unidos da América do Norte. A rede Bayesiana foi construída para cada componente da estação de tratamento, incluídas as variáveis operacionais, bem como a decisão do operador, que desempenha um papel mais importante na garantia da segurança da água, como, por exemplo, as decisões do operador em dimensionar a dosagem do coagulante e a frequência da lavagem dos filtros, que são considerados perigos significativos na operação de uma estação de tratamento. Pelos resultados obtidos, é possível também vislumbrar o potencial da aplicação das redes Bayesianas em combinar a experiência dos operadores e os dados históricos do sistema de abastecimento de água, de forma a auxiliar os operadores na tomada de decisão para garantir a segurança da água.

A inferência bayesiana tem ganho cada vez mais espaço, sendo utilizada em inúmeros trabalhos, tanto em bacias hidrográfica como em estação de

tratamento de água e rede de distribuição. Entre esses trabalhos, destacam-se aqueles desenvolvidos por Pearl (1982), Renooij e Witteman (1999), Pike (2004), Wesley *et al.* (2006), Lanini (2006) e Merritta *et al.* (2010).

As redes Bayesianas constituem uma área profícua e de grande interesse em grandes empresas e na comunidade científica internacional. Os produtos comerciais mais importantes em redes são os sistemas HUGIN (*Hugin Expert A/S*, Dinamarca)⁷ e o Netica (*Norsys Software Corporation*, Noruega)⁸. O HUGIN é utilizado pela NASA, GM, Ford e outras grandes corporações mundiais. A *Microsoft* desenvolveu seu próprio *software* para avaliação de redes probabilísticas, a *Microsoft Bayesian Network* (MSBN).

No mercado também foram desenvolvidos *software* livres. Cabe destacar o UnBBayes⁹, um *software* de domínio público desenvolvido pelo Grupo de Inteligência Artificial da Universidade de Brasília (UnB) para modelar e avaliar redes Bayesianas (LADEIRA *et al.*, 2003). Esse *software* utiliza raciocínio probabilístico baseado na realização de inferências com o método de árvore de junções, ou seja, é atribuir as distribuições de probabilidades aos cliques.

O UnBBayes possui interface gráfica amigável que permite a criação de redes Bayesianas, a entrada de evidências e a atualização de crenças. A biblioteca suporta o desenvolvimento de aplicações capazes de realizar inferências probabilísticas em redes Bayesianas.

De acordo com Ladeira *et al.* (2002), o UnBBayes é um ambiente visual e interativo para edição e compilação de redes Bayesianas, Diagrama de Influência (DI) ou Rede Bayesiana Múltipla Seleccionada (RBMS), entrada e propagação de evidências, realização de inferência probabilística e aprendizagem da topologia e, ou parâmetros de uma rede Bayesiana.

O UnBBayes foi desenvolvido em *Java* e documentado com *Javadoc* e *JavaHelp*. O sistema é distribuído gratuitamente para uso não comercial sob a licença GNU GPL¹⁰. Para tornar essa técnica de fácil utilização, foi criada o *JAVA UnBBayes*, um sistema visual, interativo e independente de

7 HUGIN: <http://www.hugin.com>

8 Netica: <http://www.norsys.com>

⁹ Disponível em: unbbayes.sourceforge.net/.

¹⁰ General Public License (<http://www.gnu.org/licenses/gpl.html>).

plataforma, que torna possível a edição, compilação das redes, entrada de evidências e o raciocínio probabilístico (Figura 8).

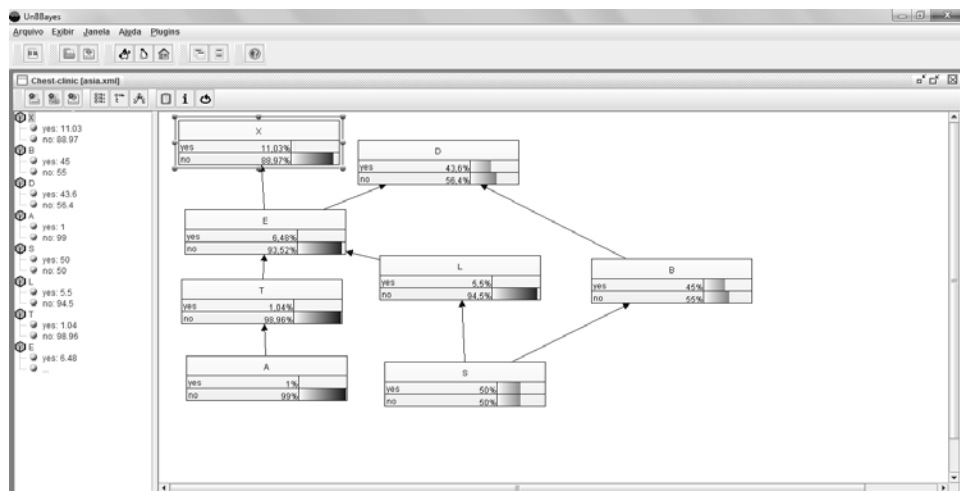


Figura 8. Interface do UnBBayes

Fonte: www.unbbayes.sourceforge.net.

O *Java* UnBBayes utiliza uma técnica para raciocinar por probabilidades em sistemas inteligentes. Através de uma rede probabilística - grafo onde os nós são variáveis de probabilidade que representam um domínio de conhecimento e os arcos indicam relações entre elas, a partir de certas evidências - podemos estimar probabilidades condicionadas (*a posteriori*) a essas evidências que nos auxiliam na tomada de decisão. Esse cálculo é chamado de inferência probabilística. Com a técnica da árvore de junção, consegue-se uma inferência em redes probabilísticas de grande eficiência (LADEIRA *et al.*, 2003).

3. MATERIAL E MÉTODOS

Neste capítulo, são descritos o material e os métodos empregados para o desenvolvimento deste estudo. Para estimar as probabilidades de ocorrências de perigos associados ao sistema de abastecimento de água no âmbito da bacia hidrográfica, zona de captação e rede de distribuição, foi utilizada o modelo de redes Bayesianas descrito no item 2.3.4 e o uso do Sistema de Análise de Perigos e Pontos Críticos de Controle (APPCC) para identificar perigos em cada etapa da estação de tratamento de água descrito no item 2.3.1.

As probabilidades de ocorrências de perigos na bacia hidrográfica, manancial de captação (zona de captação) e rede de distribuição foram estimadas, por meio do uso do *software* UnBBayes, de domínio público. Conforme já explicitado, esse *software* foi desenvolvido pelo Grupo de Inteligência Artificial da Universidade de Brasília (UnB), com o propósito de construir e avaliar as redes Bayesianas (LADEIRA *et al.*, 2003).

Na estação de tratamento de água foi utilizada a ferramenta, Árvore de Decisão, para identificar os pontos em que o controle é crítico.

Considerando os objetivos expostos neste estudo, a metodologia foi desenvolvida em etapas: i) diagnóstico e avaliação do sistema de abastecimento de água de Viçosa – MG; ii) identificação dos níveis de impactos dos eventos perigosos e perigos na bacia hidrográfica de abastecimento de água para consumo humano; iii) identificação dos pontos críticos de controle na estação de tratamento de água; e iv) identificação dos perigos na rede de distribuição de água para consumo humano.

Neste estudo, utilizou-se a primeira etapa (avaliação do sistema) preconizada no âmbito do PSA, e as demais etapas (monitoramento operacional e plano de gestão) não foram objeto deste trabalho.

3.1. Localização e caracterização da área em estudo

O município de Viçosa se encontra localizado na Zona Norte da Mata do Estado de Minas Gerais, entre as coordenadas 20° 44' de latitude Sul e 42° 53' de longitude Oeste (Figura 9).

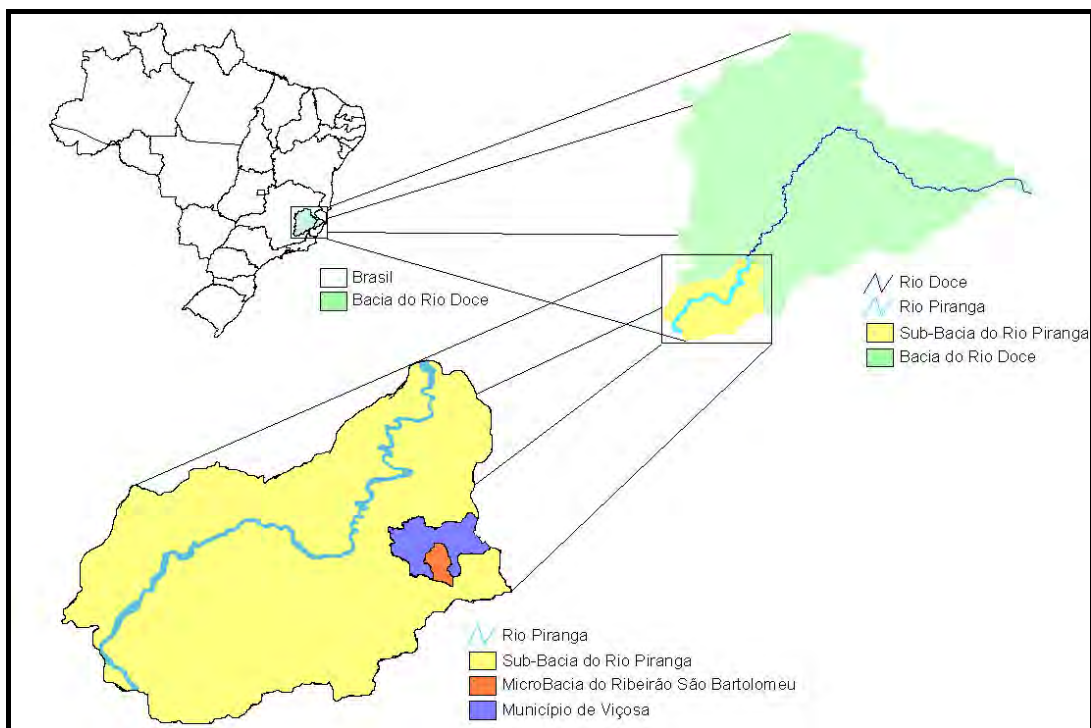


Figura 9. Localização do município de Viçosa no estado de Minas Gerais, delimitação do município e da bacia do Ribeirão São Bartolomeu

Fonte: Silva (2009).

A bacia hidrográfica do manancial de abastecimento de água, Ribeirão São Bartolomeu (SB), abrange área de aproximadamente 5.500 *ha*. A área de estudo compreendeu a região a montante (sentido sudoeste) do campus da Universidade Federal de Viçosa (UFV) e da zona urbana do município, em extensão de aproximadamente 2.000 *ha* (Figura 9). Essa região é caracterizada por atividades agropecuárias desenvolvidas por pequenos produtores rurais e, mais recentemente, pela expansão urbana, com a implantação paulatina de condomínios e loteamentos.

A área urbana do município de Viçosa-MG é servida por duas Estações de Tratamento de Água, ETA SAAE I e ETA SAAE II, sob a administração do Serviço Autônomo de Água e Esgoto de Viçosa (SAAE), supridas,

respectivamente, pelos mananciais superficiais o Ribeirão São Bartolomeu e o Rio Turvo Sujo (Figura 9).

Os respectivos sistemas de distribuição são interconectados: (i) durante o período de chuvas a ETA SAAE I é responsável pelo abastecimento de cerca de 70% da população urbana e (ii) por meio de manobras de válvulas, a situação se inverte no período de estiagem, e 70% da população passa a ser servida pela ETA SAAE II.

A UFV conta com um sistema próprio de abastecimento de água, suprido também pelo Ribeirão São Bartolomeu. No campus da UFV, o Ribeirão São Bartolomeu recebe cinco barramentos consecutivos. As duas primeiras represas cumprem função de reservatórios de acumulação, sendo que na segunda se encontram as estruturas de captação de água para abastecimento do campus universitário e de parte da população urbana de Viçosa por meio da ETA SAAE I, objeto deste estudo.

A ETA SAAE I opera em tratamento por ciclo completo, incluindo as etapas de mistura rápida (calha *Parshall*), floculação (hidráulica), decantação, filtração, desinfecção. A unidade alterna vazões de 80 a 100 L.s⁻¹, sob ciclo operacional de cerca de 24 horas por dia.

O floculador hidráulico é composto por treze câmaras de igual tamanho, perfazendo um volume total de 179.4 m³. A unidade apresenta tempo de detenção teórico de 30 min., operando com vazão de 100 L.s⁻¹, e de 37 min., com vazão de 80 L.s⁻¹.

O decantador tem formato circular com alimentação central e fluxo radial, área de 231 m², volume de 796 m³ e taxa de aplicação superficial de 37,45 e 30 m³.m⁻².d⁻¹ quando a unidade opera com vazão de, respectivamente, 100 e de 80 L.s⁻¹. O tempo de detenção hidráulica teórico da unidade varia entre 132,6 e 166 min. para as vazões de 100 e 80 L.s⁻¹

A ETA SAAE I dispõe de quatro filtros rápidos de fluxo ascendente com área de 14,6 m² cada e taxa de filtração média de 118 e 148 m³.m⁻².dia⁻¹, respectivamente,

para as vazões de 80 e 100 L.s⁻¹. A operação de limpeza do meio filtrante é feita por lavagem no mesmo sentido da filtração, diferenciando-se o canal de coleta. Faz-se uso de água tratada, desinfetada, da própria ETA nesse processo. A água de lavagem de filtros é armazenada e reintroduzida no

sistema junto com a água bruta, a uma razão de recirculação de 5%. Por fim, a água filtrada é submetida à desinfecção com cloro gás.

Na área urbana do município, a rede de distribuição apresenta, aproximadamente, 213 km de extensão (Figura 10), sendo abastecida por duas estações: ETAI/SAAE, suprida pelo Ribeirão São Bartolomeu (objeto deste estudo) e ETAlI/ SAAE, suprida pelo Rio Turvo Sujo, ambas com capacidade de $100 \text{ L}\cdot\text{s}^{-1}$. Um sistema de adução de aproximadamente 16 km permite a interligação das duas ETAs ao sistema de distribuição. O sistema de distribuição assim como as ligações de água encontram-se georreferenciados, Figura 10, o que permitiu a espacialização de informações de consumo de água e a delimitação de zonas de consumo. Os bairros mais afastados, localizados na zona rural, recebem água de poços artesianos. O sistema de distribuição conta com 18 reservatórios, distribuído ao longo da extensão da rede de distribuição, incluindo os reservatórios das respectivas ETAs.

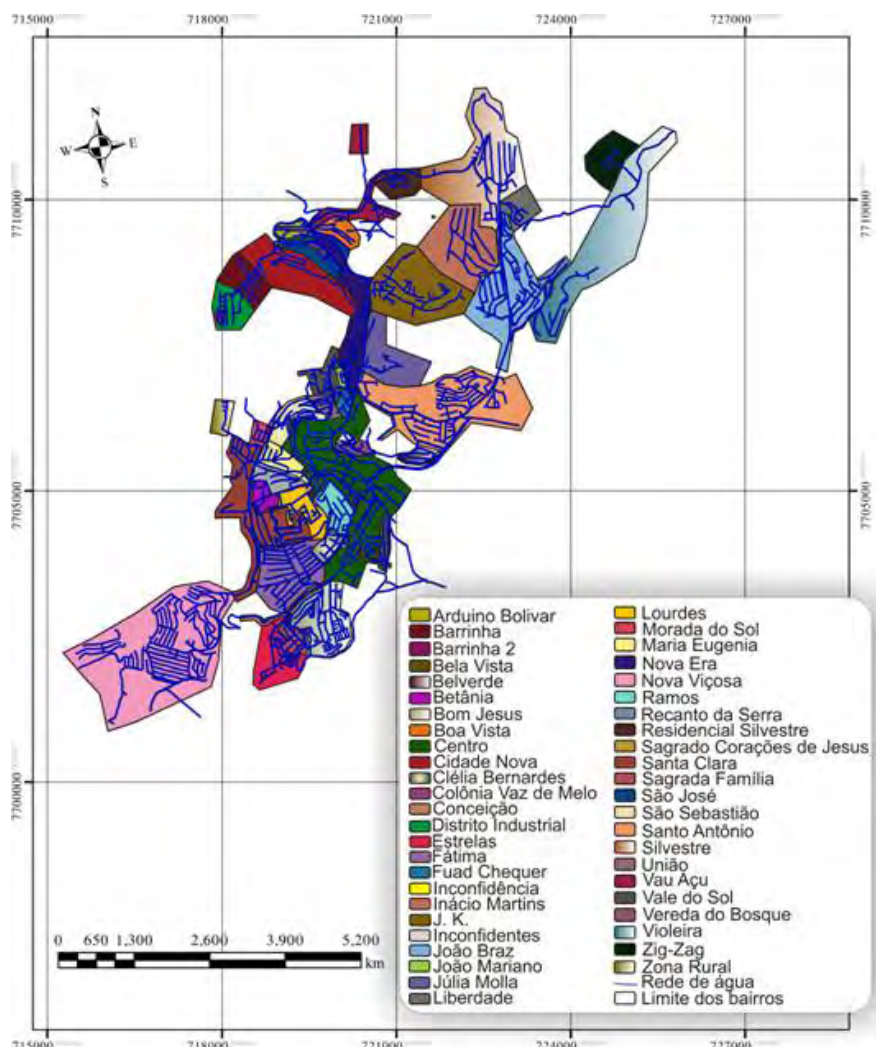


Figura 10. Representação espacial dos bairros e da rede de distribuição de água na área urbana do município de Viçosa-MG

Fonte: Soares (2009).

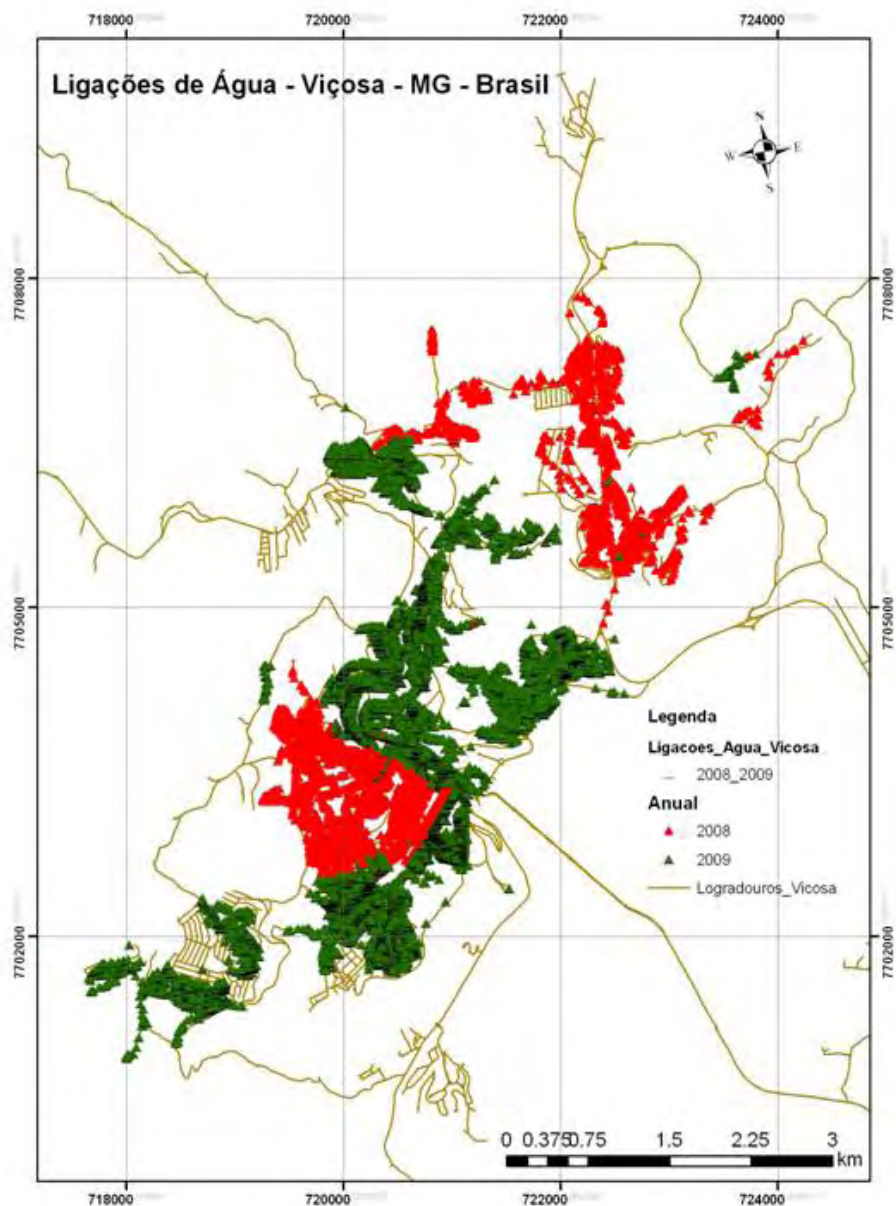


Figura 11. Espacialização das ligações de água em Viçosa – MG

Fonte: Soares (2009).

3.2. Procedimentos metodológicos utilizados no levantamento de dados

3.2.1. Diagnóstico da Bacia hidrográfica do Ribeirão São Bartolomeu

contribuinte à zona de captação

Para o processamento de informações da bacia de captação do Ribeirão São Bartolomeu, foram utilizadas imagem de satélite de alta resolução (*Imagens Ikonos*, 290 km² – Largura 17km e Comprimento 20km), carta planialtimétrica do IBGE, folha Viçosa (SF-23-X-B-V-3) de 1979 e recursos de geoprocessamento (*softwares ArcGis e Idrisi*).

O mapa de uso e ocupação do solo foi elaborado a partir da classificação da imagem de satélite, a qual foi tratada por meio da classificação de imagens digitais. Para aferir o desempenho da classificação, foi utilizado o índice Kappa, derivado de uma matriz de erro, que estima a proporção da variabilidade total devida à variação entre os classificadores. Para maior confiabilidade da classificação, foi realizada supervisão *in loco*.

As informações sobre uso e ocupação do solo foram complementadas por levantamento de atividades de campo a partir da aplicação de questionário orientado para a obtenção das seguintes informações: levantamento cadastral das propriedades rurais, identificação de fontes localizadas e difusas de poluição / contaminação (atividades agropecuárias, esgotos sanitários, dejetos de animais, emprego de fertilizantes e agrotóxicos), identificação de usos da água (Anexo 1).

Foi também gerado um mapa de tipos de solos, com base na análise de amostras de solos coletadas em campo e no conhecimento prévio existente sobre a bacia hidrográfica, ou seja, na interpretação visual de altimetria e declividade em chave de identificação de modelos solo/paisagem (SILVA, 2010). Um mapa de declividades foi também gerado no *software Idrisi* a partir das curvas de nível da região, de 5 em 5 m, e do Modelo Digital de Elevação (MDE) (SILVA, 2010).

3.2.2. Estação de Tratamento de Água (ETA SAAE I)

Para o diagnóstico / descrição da ETA SAAE I, foram levantadas as seguintes informações: (i) descrição da infraestrutura física por meio de

verificação / atualização de plantas de projeto e levantamentos de campo; (ii) levantamento de parâmetros de projeto e reais de operação dos processos unitários de tratamento; (iii) realização de ensaios de tratabilidade da água; (iv) sistematização de banco de dados (séries históricas) de controle de qualidade da água; (v) complementação de dados de controle de qualidade da água por meio de implementação de planos de monitoramento; e (vi) levantamento de procedimentos operacionais existentes.

Os ensaios de tratabilidade da água e a avaliação de desempenho da ETA foram conduzidos de acordo com metodologias descritas em CEPIS (1992) e Di Bernardo *et al.* (2002). A avaliação de desempenho foi realizada, por meio de ensaios de bancada (*Jar-test*), com base nos valores típicos de turbidez da água bruta em épocas de estiagem e chuvas, tendo sido determinados os seguintes parâmetros ótimos: concentrações dose do coagulante (sulfato de alumínio), pH de coagulação, gradientes de velocidade e tempo de detenção hidráulica de floculação, velocidade de sedimentação.

Levantamentos de campo permitiram a confirmação da configuração física e detalhamento de cada unidade de tratamento da ETA. Isso, junto à realização de ensaios com traçador (sal de cozinha), e a determinação do perfil de lâmina d'água (medida com aparelho de precisão - estação total) permitiu a determinação dos parâmetros reais de operação da ETA: gradientes de velocidade de mistura e de floculação, tempo de floculação, tempo de detenção hidráulica do decantador, taxa de aplicação superficial (decantação), taxa de filtração, tempo de contato na desinfecção.

3.2.3. Sistema de distribuição

Para o diagnóstico / descrição do sistema de distribuição de água, foram levantadas as seguintes informações: (i) caracterização da população atendida e do consumo de água: número e localização das ligações, características socioeconômicas, consumo per capita, etc.; (ii) descrição da infraestrutura física por meio da verificação / atualização de plantas de projeto, cadastro e levantamentos de campo - extensão e cobertura da rede,

diâmetros, material e idade das tubulações, condições de manutenção dos reservatórios de distribuição; (iii) levantamento das características hidráulicas e de parâmetros de projeto e reais de operação do sistema - distribuição de vazões, pressurização do sistema; (iv) pontos de coleta de amostras e informações sobre a qualidade da água: sistematização de banco de dados (séries históricas) de controle de qualidade da água e complementação de informações por meio de implementação de planos de monitoramento; e (v) levantamento de procedimentos operacionais existentes e de registros de ocorrências: procedimentos de operação e manutenção dos sistemas, intermitência de abastecimento, registro de rupturas e vazamentos, registros de queixas de consumidores, entre outros. Dados secundários de medição de consumo de água e de controle de qualidade da água foram espacializados com o uso de recursos de geoprocessamento (*Software ArcView-versão 3.3*). Essas informações, somadas à análise de dados primários (programas de monitoramento de qualidade da água), serviram à produção de mapas de risco no sistema de distribuição, com base na dinâmica de vazões, pressões e de qualidade da água na rede de distribuição, gerados com o emprego do programa *software* EPANET.

EPANET foi o sistema computacional de hidráulica utilizado para a obtenção dos dados de pressão na rede de abastecimento de água. Trata-se de um software de domínio público desenvolvido pela *U.S. Environmental Protection Agency* (EPA), muito empregado no gerenciamento dos sistemas de distribuição de água potável (ROSSMAN *et al.*, 2000).

As informações referentes a vazões, a pressões e à qualidade da água foram utilizadas como entrada de dados no *software* EPANET para a simulação de mapas de pressurização do sistema, sob diferentes condições de funcionamento, ao longo do dia.

No sistema de distribuição, as ligações de água encontram-se georreferenciadas no cadastro do SAAE-Viçosa. O tratamento dessas informações em ambiente de geoprocessamento permitiu a identificação de zonas de consumo diferenciadas e a geração de mapas de distribuição de vazões e de pressurização da rede, também com o emprego do *software* EPANET (SOARES, 2009).

3.2.4. Monitoramento da qualidade da água e medição de vazões

Foram feitas coletas de amostras de água e de medição de vazões por sub-bacia. Para as medições de vazão, foram utilizados dois métodos, de acordo com a seção e volume dos cursos d'água: métodos do vertedor e do molinete. Os pontos de amostragem foram definidos de forma a representar reunião de áreas de drenagem de sub-bacias, previamente delimitadas de acordo com a topografia e a hidrografia da região. Ao todo, foram selecionados dez pontos de coleta na bacia do Ribeirão São Bartolomeu (SB), incluindo os pontos de captação de água para abastecimento. Todas essas informações foram trabalhadas com recursos de geoprocessamento (*software ArcView-versão 3.3*).

(a) Procedimentos das análises laboratoriais das amostras de água

O Quadro 6 apresenta o resumo da caracterização dos pontos de coleta de amostras, frequência de amostragem e parâmetros investigados. O monitoramento da qualidade da água na bacia hidrográfica, na zona de captação, na estação de tratamento e no sistema de distribuição, foi feito no período de novembro de 2007 a outubro de 2008.

A pesquisa de coliformes totais e *E.coli* foi desenvolvida com a técnica do substrato definido (cromogênico-fluorogênico) com uso do meio *Colilert*® (*Quanty-tray*®, *Idexx Laboratories Inc, US*) *Standard Methods for Water and Wasterwater* (APHA, 2005).

Para a pesquisa de protozoários, foram utilizadas as técnicas de concentração por floculação com carbonato de cálcio (VESEY *et al.*, 1993), seguidas de identificação e enumeração com microscopia de imunofluorescência (*kit MERIFLUOR*®).

Para contagem de cianobactérias, foi utilizado o método de contagem de *Utermöhl* (APHA, 2005). Para as análises de cianotoxinas e agrotóxicos, foram utilizadas as técnicas de cromatografia líquida acoplada à espectrometria de massas. Essas análises foram realizadas em GC-MS da

marca *Varian (Palo Alto, CA), modelo Saturn 2000R*. As amostras foram preparadas no laboratório da Divisão de Água e Esgoto (DAG) da UFV e analisadas na Universidade Federal de Ouro Preto (UFOP).

A determinação dos demais parâmetros, Quadro 6, seguiu as recomendações previstas no *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater* (APHA, 2005).

Quadro 6. Programa de controle da qualidade da água - pontos de coleta de amostras, frequência de monitoramento e parâmetros analisados

Componentes do sistema	Local das Coletas	Parâmetros	Frequência
Bacia do Ribeirão São Bartolomeu (SB)	Oito sub-bacias	Microbiológicos: <i>E. coli</i> , coliformes totais, <i>Giardia</i> spp., <i>Cryptosporidium</i> spp. Físicos e químicos: turbidez, cor, SST, agrotóxicos, metais, Fe, Mn, N, P, OD, clorofila a, DQO. Hidrológico: vazão.	Mensal
		Químicos: metais	Bimestral
Pontos de captação	Lagoa Hidráulica (L1)	Microbiológicos: <i>E. coli</i> , coliforme totais, <i>Giardia</i> spp., <i>Cryptosporidium</i> spp., cianobactérias	Mensal
	Lagoa Funarbe (L2)	Físicos e químicos: turbidez, cor, SST, Fe, Mn, N, P OD, clorofila-a, DQO.. Químicos: metais	Bimestral
Estação de Tratamento de Água	Água bruta	Físicos e químicos: alcalinidade, pH, cor, turbidez, cianotoxinas e agrotóxicos.	Horário
		Parâmetros operacionais: vazão e dose de coagulante	Diário
	Água decantada	Físicos: Turbidez e cor	Horário
		Químicos e microbiológicos: <i>Giardia</i> spp., <i>Cryptosporidium</i> spp., coliformes totais, <i>E. coli</i> , cianotoxinas e cianobactérias.	Mensal
	Água filtrada	Físicos e operacionais: turbidez, cor, pH e perda de carga.	Horário
		Químicos e microbiológicos: <i>Giardia</i> spp., <i>Cryptosporidium</i> spp., coliformes totais, <i>E. coli</i> e cianotoxinas e cianobactérias	Mensal
Água de lavagem de filtro	Microbiológicos: <i>Giardia</i> spp., <i>Cryptosporidium</i> spp.	Mensal	
	Físico: turbidez	Diário	
Estação de Tratamento de Água	Água desinfetada	Físicos e químicos: cloro residual, cor, pH e temperatura no tanque de contato Químicos e microbiológicos: <i>E. coli</i> , coliformes totais, cianotoxinas e cianobactérias, contagem de bactérias heterotróficas, trihalometanos.	Horário
		Químicos e físicos: turbidez e cloro	Mensal
	Saída da ETA	Químicos: agrotóxicos, ferro e manganês	Diário
Sistema de distribuição	Saída do reservatório de distribuição / entrada na rede	Microbiológicos: <i>E. coli</i> , coliforme totais, contagem de bactérias heterotróficas. Físicos e químicos: turbidez, cor, pH, cloro residual livre, trihalometanos, ferro e manganês, agrotóxicos	Mensal

Componentes do sistema	Local das Coletas	Parâmetros	Frequência
	Rede de distribuição	Microbiológicos: <i>E. coli</i> , coliforme totais, contagem de bactérias heterotróficas Físicos e químicos: turbidez, cor, pH, cloro residual livre, trihalometanos, ferro e manganês.	

3.3. Construção de redes Bayesianas

A construção da rede Bayesiana seguiu os seguintes passos:

- 1º Passo: definição dos objetivos a serem avaliados na rede Bayesiana;
- 2º Passo: definição e criação das variáveis e base de informação para a determinação das probabilidades *a priori*.
- 3º Passo: definição das direções dos arcos. Para que as direções dos grafos acíclicos, que indicam condições independentes, possam estar de acordo com o conhecimento do especialista;
- 4º Passo: construção da rede Bayesiana com a ferramenta UnBBayes;
- 5º Passo: verificação da consistência da rede Bayesiana;
- 6º Passo: compilação da árvore de junção criada a partir da rede Bayesiana;
- 7º Passo: propagação das evidências da rede Bayesiana a partir das informações obtidas no monitoramento; e
- 8º Passo: cálculo das distribuições de probabilidades *a posteriori*.

Antes de construir a rede Bayesiana, é necessário definir os objetivos a serem alcançados. Neste trabalho, os objetivos definidos para a identificação dos perigos associados ao sistema de abastecimento de água, desde a bacia hidrográfica, zona de captação e rede de distribuição, estão expressos na Tabela 1. A construção da rede seguiu a sequência desses objetivos.

Tabela 1. Objetivos contemplados na rede Bayesiana e os critérios de avaliação

Objetivos	Critérios de Avaliação
Determinar a probabilidade de ocorrência dos eventos perigosos na bacia hidrográfica contribuinte à zona de captação de água para consumo humano	Alto
	Moderado
	Baixo
Determinar a probabilidade de ocorrência do nível de contaminação dos perigos associados à zona de captação	Alto
	Moderado
	Baixo
Determinar a probabilidade de ocorrência dos perigos na rede	Alto

de distribuição	Moderado Baixo
-----------------	-------------------

3.3.1. Determinação da probabilidade de ocorrência dos eventos perigosos na bacia hidrográfica contribuinte à zona de captação

(i) Definição das variáveis

Essa etapa teve como objetivo determinar a probabilidade de ocorrência dos eventos perigosos na bacia hidrográfica contribuinte à zona de captação. Para isso, é necessário definir as variáveis¹¹ para a construção da rede Bayesiana.

As variáveis são entendidas, neste estudo, como os eventos perigosos na bacia hidrográfica. Evento perigoso é um incidente ou situação que pode permitir a presença de um perigo. Por exemplo, uma indústria de metal quando lança seus efluentes sem tratamento ou parcialmente tratados (evento perigoso) pode alterar a qualidade da água na bacia hidrográfica pelo lançamento de cádmio (perigo).

As variáveis foram classificadas em eventos perigosos de origens antrópicas (uso e ocupação do solo, disponibilidade hídrica, atividades urbanas, industriais, dentre outras) e de origens naturais (características do solo, declividade, cobertura vegetal, escoamento superficial, entre outras). A Figura 12 apresenta os principais eventos perigosos de origens antrópicas e naturais, que podem interferir na qualidade da água da bacia hidrográfica contribuinte à zona de captação.

Os perigos decorrentes desses eventos perigosos impactam diretamente a qualidade da água e a conservação ambiental das bacias hidrográficas e, conseqüentemente, interferem na eficiência de remoção do tratamento de água para consumo humano. A Tabela 2 apresenta as variáveis (eventos perigosos) e os seus atributos para determinação da probabilidade de

¹¹ É definida como a característica de interesse que é medida em cada elemento da amostra ou população. As variáveis podem ter valores numéricos ou não numéricos.

ocorrência dos eventos perigosos na bacia hidrográfica contribuinte à zona de captação.

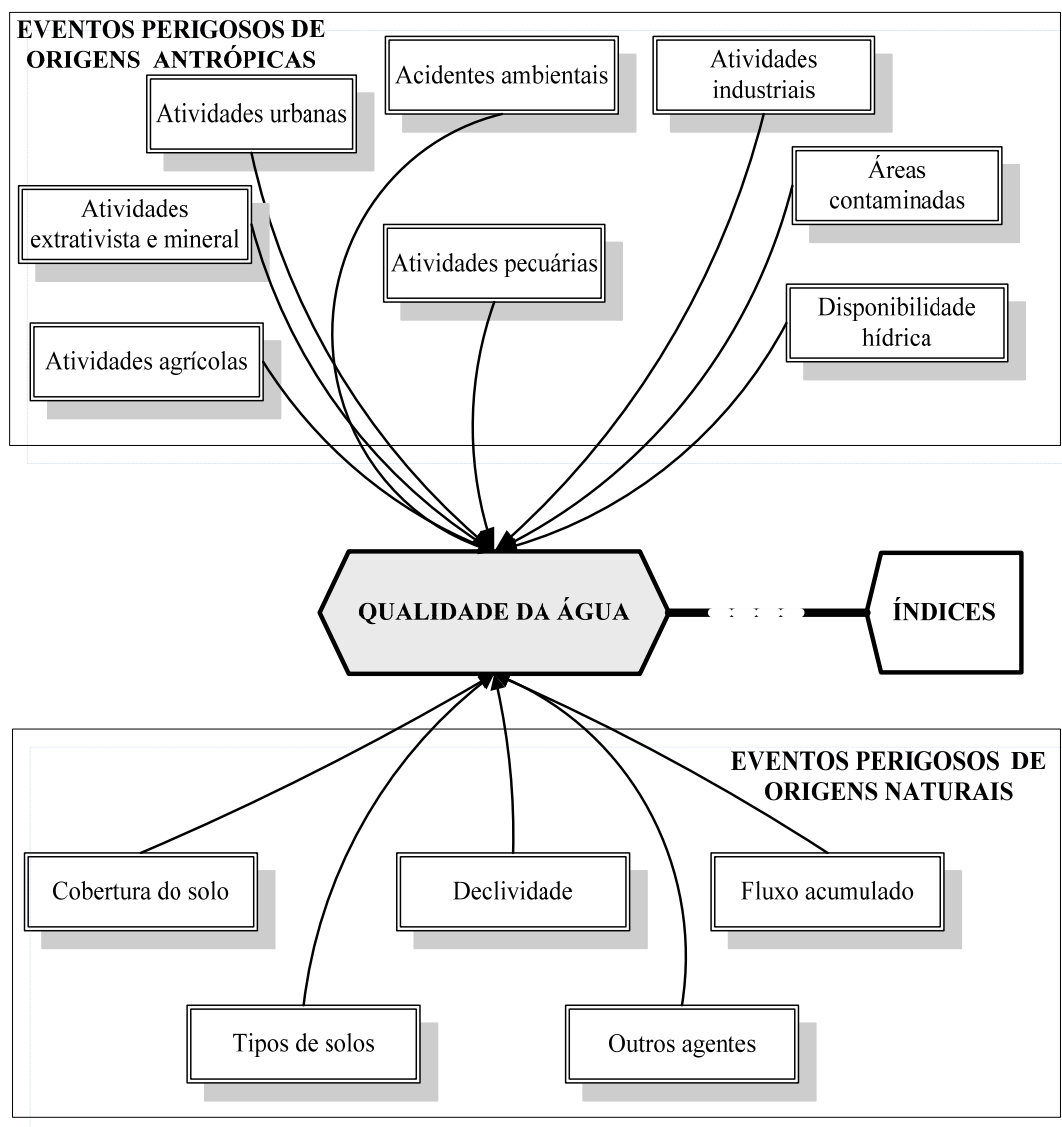


Figura 12. Principais eventos perigosos na bacia hidrográfica contribuinte à zona de captação de água para consumo humano

Fonte: Adaptado de Buschinelli *et al.* (2004).

A água apresenta elevada capacidade de dissolução de substâncias químicas e de transporte de material em suspensão e, assim, dependendo de variáveis como a intensidade de chuvas, as características do solo (por exemplo, geomorfologia, capacidade de infiltração, erodibilidade), o uso e ocupação do solo, a cobertura vegetal e o escoamento superficial no solo impactarão de forma mais ou menos intensa a qualidade da água dos cursos superficiais.

A declividade acentuada do terreno é um exemplo de evento perigoso de origem natural que pode favorecer o carreamento de contaminantes aos cursos d'água e, conseqüentemente, alterar sua qualidade. Além disso, áreas com declividades elevadas associadas ao tipo de solo, por exemplo, estão mais propensas a serem erodidas.

Tabela 2. Tabela das variáveis e atributos na bacia hidrográfica contribuinte à zona de captação de água para consumo humano

Variáveis (Eventos perigosos)		Atributos
1	Grau de atendimento da disponibilidade hídrica é insatisfatório	Sim Não
2	Predominância de uso e ocupação por indústrias	Sim Não
3	Predominância de uso e ocupação por pecuária	Sim Não
4	Predominância de uso e ocupação por olericultura	Sim Não
5	Predominância de uso e ocupação por agriculturas diversas	Sim Não
6	Predominância de uso e ocupação por solo exposto	Sim Não
7	Predominância de uso e ocupação por áreas urbanas	Sim Não
8	Predominância de uso e ocupação por pastagem degradada	Sim Não
9	Predominância de uso e ocupação por formações florestais	Sim Não
10	Declividade acima de 45%	Sim Não
11	Tipo de solo predominante, Cambissolo Háplico	Sim Não
12	Distâncias dos currais e fossa próximas ao manancial	Sim Não

A cobertura do solo indica que, quanto mais impermeável ela for (pavimentos, asfalto etc.), maior a percentagem relativa de precipitação a escoar. Quando o solo se apresenta descoberto e com substrato vegetal, consoante suas características são definidos os níveis de escoamento superficial da água.

A erosão gera problemas de assoreamento de corpos hídricos, taxas elevadas de material em suspensão, redução da profundidade da camada eutrófica (camada onde se concentram os nutrientes) e, conseqüentemente, modificação da qualidade da água. Esse fato é confirmado por Streher e Schäfer (2008), que demonstraram ter a declividade influência na determinação dos índices químicos de qualidade da água, e comprovado estatisticamente via regressão linear.

Os diferentes tipos de solos de uma bacia de drenagem são importantes na avaliação das propriedades relacionadas à susceptibilidade à erosão, além de permitir a análise integrada a outros fatores, como agentes contaminantes presentes no solo, cuja finalidade é subsidiar análises de riscos de contaminação da água.

O uso do solo de forma inadequada gera a deterioração de todo meio ambiente, afetando principalmente a qualidade da água para abastecimento humano, uma vez que as diversas formas de uso e ocupação do solo podem intensificar uma série de processos que acarretam erosão, assoreamento, contaminação das águas, do solo e, conseqüentemente, diminuição da quantidade e da qualidade da água disponível para este fim.

O uso e a ocupação do solo medem o potencial de as fontes de poluição difusas que contribuirão para contaminar a superfície do solo. Estudo de Silva e Rodrigues (2004) estabelece uma relação entre diferentes usos e ocupação do solo e a bacia hidrográfica do Córrego do Salto (Uberlândia, MG), apontando tal variável como determinante para os fatores que interferem na qualidade da água. Desta forma, pode-se concluir que o diagnóstico da bacia, obtido através da integração dos processos naturais e do uso do solo na mesma, permite a compreensão das relações existentes e, além disso, possibilita a tomada de ações mitigadoras a fim de manter a qualidade da água no sistema de abastecimento.

A distância das fontes de poluição é um fator que afeta inversamente a qualidade da água que chega às estações de tratamento, porque quanto mais próximo do foco de poluição, maior a probabilidade de a contaminação encontrar a água.

(ii) Definição das informações a priori

Para determinar os níveis de eventos perigosos na bacia hidrográfica, foi necessário definir as probabilidades de distribuição *a priori* para construção da rede Bayesiana.

Para isso, foi feita uma consulta aos especialistas por meio do método *Delphi*, que, segundo Piola *et al.* (2002), pode ser visto como uma forma de estruturar um processo de comunicação, de forma a possibilitar que um conjunto de especialistas gere uma opinião coletiva qualificada sobre problemas complexos.

De forma resumida, a Tabela 3 descreve o procedimento metodológico utilizado neste estudo, que foi baseado na proposta metodológica definida por Wright (1986).

Tabela 3. Etapas para a aplicação do método *Delphi*

Etapas	Descrição
Definição das variáveis (eventos perigosos) e elaboração do questionário	Nessa etapa, deve-se recorrer à literatura consagrada sobre o fenômeno em estudo e sobre as variáveis a serem analisados pelos especialistas, a fim de gerar o questionário a ser utilizado, ou seja, são elaboradas questões de modo a atender as necessidades específicas do estudo. É importante ressaltar que, no questionário, deve haver um breve resumo das informações a respeito das variáveis, relacionando-as com o fenômeno em questão. As variáveis selecionadas estão preconizadas na Tabela 2.
Definição dos especialistas e envio dos questionários	A seleção dos especialistas deve ser multidisciplinar com conhecimento sobre o assunto. Em seguida, eles são contatados individualmente pelos coordenadores, que devem explanar sobre a técnica e os objetivos do estudo, entregando em seguida os questionários, para que eles atribuam notas (pesos) de importância a esses eventos perigosos em função do objetivo do estudo (nessa etapa, deve ser assegurado o anonimato da opinião dos especialistas)
Análise das Respostas da Primeira rodada	Tratam-se estatisticamente as respostas, calculando mediana, primeiro e terceiro quartis. Além disso, entre a primeira e a segunda rodada, os organizadores podem sentir necessidade de inserir novas questões, podendo fazê-lo a qualquer momento.
Envio da segunda rodada do questionário	Essa rodada traz aos especialistas os resultados obtidos no primeiro questionário, de modo a possibilitar que eles revejam suas posições diante da posição do grupo, uma vez que são inseridas as justificativas dos outros especialistas de forma anônima.
Análise das Respostas da Segunda rodada	Tratam-se estatisticamente as respostas, calculando mediana, primeiro e terceiro quartis.
Conclusões finais	Faz a repetição das rodas até que se chegue a um grau satisfatório de convergência a critério dos coordenadores. O método exige no mínimo duas rodadas. Diz-se estatisticamente que o processo evolui ao consenso através da relação entre o distanciamento dos 1º e 3º quartis e o valor da mediana das respostas, que deve sempre diminuir a cada rodada (GRISI e BRITTO, 2003).

Fonte: Adaptado de Wright (1986).

Para a realização da consulta, foi elaborado um questionário (Anexo 2), enviado aos especialistas que atuam nas áreas de hidrologia, recursos hídricos, qualidade de água, solos e geoprocessamento. Essa consulta objetivou inferir sobre o resultado dos pesos atribuídos à importância do grau de interferência desses eventos perigosos na qualidade da água da bacia hidrográfica de abastecimento humano (SILVA, 2010). Foi realizada a primeira rodada do questionário, ou seja, os questionários foram enviados

aos especialistas e suas respostas foram analisadas estatisticamente a fim de identificar possíveis discrepâncias nas respostas obtidas.

Após obtenção do resultado das respostas da primeira consulta, as respostas divergentes dos demais foram excluídas e recalculadas as estatísticas sem suas avaliações, conforme expresso na Tabela 4. Neste trabalho, ocorreu uma resposta divergente, ou seja, do especialista número 07.

Após a eliminação do especialista (sete) 7, pode ser observado consenso entre os demais especialistas e, além disso, como menos de 40% dos questionários enviados foram respondidos, optou-se por encerrar o método Delphi nesse ponto, e com os resultados encontrados, as diferentes camadas de informação foram devidamente reescaladas, e as camadas de informação ganharam sua ordem de importância (Tabela 5).

Dessa forma, a Tabela 5 apresenta os resultados consensuados junto aos especialistas, que serão utilizados na definição das tabelas de probabilidade de distribuição *a priori* para construção da rede Bayesiana.

(iii) Construção de rede Bayesiana

Para construção da rede, utilizou-se o *Software UnBBayes* com o propósito de determinar o nível de ocorrência de eventos perigosos na bacia hidrográfica que interferem na qualidade da água para o abastecimento.

As variáveis da rede estão especificadas na Tabela 2. Cada uma das variáveis pode assumir apenas dois valores, “*sim*” ou “*não*”. Por exemplo, para variável *AGRICULTURA*, o valor “*sim*” indica possível alteração na qualidade da água na bacia hidrográfica. O valor “*não*” indica que a qualidade da água da bacia hidrográfica não sofre alteração.

A construção da rede se inicia com definição das direções dos arcos. Os arcos do grafo direcionado acíclico (*Directed Acyclic Graph - DAG*) representam as relações existentes entre as variáveis, ou seja, indicam que a variável *AGRICULTURA* se relaciona com a variável *NÍVEIS DE IMPACTOS EVENTOS PERIGOSOS NA BACIA HIDROGRÁFICA*.

A variável *NÍVEIS DE IMPACTOS DOS EVENTOS PERIGOSOS NA BACIA HIDROGRÁFICA* assume três classificações (alto, moderado e baixo), cujos significados estão definidos na Tabela 6.

Tabela 4. Respostas enviadas pelos especialistas na primeira rodada do método Delphi (eliminando o especialista número 7) e suas respectivas estatísticas

Itens Avaliados	Especialistas						Estatísticas sem Especialista.7			
	1	2	3	4	5	6	Média	Mediana	1°Q*	3°Q*
Declividade (%)	Grau de perigo (0-100)									
< 3	1	5	10	1	5	1	3,83	5	5	5
3 a 8	10	30	30	10	25	10	19,17	25	10	30
8 a 20	30	50	50	50	50	30	43,33	50	30	50
20 a 45	80	75	75	100	70	60	76,67	75	70	80
45 a 75	100	10	10	100	10	80	96,67	100	100	100
> 75	100	10	10	100	10	10	100,0	100	100	100
	0	0	0	0	0	0	0			
Solos	Grau de perigo (0-100)						Média	Mediana	1° Q*	3° Q*
Cambissolo Háplico	20	60	75	-----	10	----	63,75	60	50	75
					0					
Gleissolo Háplico	20	30	10	-----	50	----	27,50	30	20	50
Latossolo Vermelho-Amarelo	60	25	30	-----	50	----	41,25	30	25	50
Argissolo Vermelho-Amarelo	40	20	20	-----	25	----	26,25	20	20	25
Uso e ocupação do solo	Grau de perigo (0-100)						Média	Mediana	1° Q*	3° Q*
Olericultura	60	80	75	100	50	60	70,83	75	60	80
Café	60	65	50	30	50	50	50,83	50	50	60
Culturas anuais (milho/feijão)	60	70	75	50	50	50	59,17	55	50	70
Solo Exposto	70	85	90	90	75	30	73,33	80	70	90
Áreas urbanas	100	10	10	-----	10	10	100,0	100	100	100
		0	0		0	0	0			
Pastagem degradada	70	50	75	30	25	80	55,00	60	35	75
Pastagem não degradada	70	40	50	20	15	70	44,17	50	20	70
Formações florestais	1	1	0	1	5	10	3,00	1	1	5
Ponderação das camadas	Grau de perigo (0-100)						Média	Mediana	1° Q*	3° Q*
Uso e Ocupação	100	10	10	90	75	90	92,50	95	90	100
		0	0							
Declividade	50	60	50	70	50	70	58,33	60	50	70
Tipo de Solo	50	40	75	30	25	30	41,67	40	30	50
Dist. das Fontes Poluentes**	80	80	75	70	50	----	71,00	80	70	80

* Q = Quartil
** Fontes pontuais de poluição
Fonte: Adaptado de Silva (2010).

Tabela 5. Resumo dos resultados da consulta *Delphi* junto aos especialistas

Uso e ocupação do solo	Ponderação	Declividade (%)	Ponderação
Olericultura	70	45% a maior que 75%	100
Agriculturas diversas	60	20 a 45%	75
Solo Exposto	75	< 3% a 20%	45
Áreas urbanas	100	Distância das Fontes Poluentes Distâncias dos currais e fossa	Ponderação 70
Pastagem degradada	55		
Pastagem não degradada	45		
Formações florestais	1		
Tipo de solo	Ponderação		
Cambissolo Háplico	65		
Gleissolo Háplico	25		
Latossolo Vermelho-Amarelo	40		
Argissolo Vermelho-Amarelo	20		
Eventos Perigosos	Importância da interferência dos eventos perigosos na alteração da qualidade da água		
	Ordem	Ponderação	Percentual (%)
Uso e Ocupação	1	95	30,16
Declividade	3		19,05
Tipo de Solo	4	40	12,70
Distâncias das fontes poluentes	2	70	22,22

Fonte: Adaptado de Silva (2010).

Tabela 6. Níveis de impactos dos eventos perigosos na bacia hidrográfica contribuinte à zona de captação

Nível de impacto dos eventos perigosos	Significado
Alto	Manancial com eventos perigosos potencialmente significativos que interferem diretamente na qualidade da água e, conseqüentemente, no tratamento.
Moderado	Manancial com eventos perigosos significativos que podem alterar a qualidade da água sem afetar diretamente seu tratamento.
Baixo	Manancial com eventos perigosos não significativos sem interferência direta na qualidade da água e tratamento.

A partir das informações e opiniões obtidas pelos especialistas, as tabelas de probabilidade de distribuição *a priori* são definidas para cada variável (evento perigoso) pela inclusão das informações e opiniões obtidas na Tabela 5.

Se a probabilidade de distribuição *a priori* do nó (*AGRICULTURA*) for “*sim*”, por exemplo, explicitam-se as probabilidades de ocorrência de perigos associados a substâncias químicas (agrotóxicos) no corpo d’água. Nesse caso, o valor da probabilidade da variável *AGRICULTURA* é de 0.6 se for “*sim*” e 0,4 se for *não*.

Com a rede criada, o passo seguinte consiste no uso do *Software UnBBayes*[®] para gerar o modelo probabilístico que permite determinar as probabilidades condicionais da evidência *a priori*, definidas por meio da informações obtidas pelos especialistas. Assim, as probabilidades *a posteriori* são determinadas pelo

levantamento das informações da bacia hidrográfica em campo. O cálculo é o mesmo explicitado no item 2.3.4.

3.3.2. Determinação da probabilidade de ocorrência do nível de contaminação dos perigos associados à zona de captação

(i) Definição das variáveis

A determinação das variáveis (perigos) e de seus efeitos na saúde não é uma tarefa simples, pois o avanço tecnológico, o aumento da produtividade nas atividades industriais e agrossilvopastoris, o crescimento urbano e até mesmo o aumento do número de substâncias químicas utilizadas e de produtos gerados no próprio tratamento da água contribuem para o incremento de substâncias potencialmente perigosas para a saúde pública.

Mendes (2005) relata que os efeitos adversos dos perigos podem resultar de condições agudas (curto tempo de exposição a doses elevadas) ou crônicas (longo tempo de exposição a doses baixas); podem ser tóxicos (afetando seriamente funções biológicas ou provocando a morte), carcinogênicos (induzindo o crescimento descontrolado de células, vindo a provocar tumores malignos), mutagênicos (causando alterações hereditárias do material genético das células) ou teratogênicos (causando deformações congênitas não hereditárias).

Como a cada dia surgem novos perigos, denominados “emergentes”, e uma grande variedade de patogênicos e substâncias químicas, neste estudo, foram adotados os perigos químicos, microbiológicos e físicos previstos na norma brasileira de potabilidade da água (BRASIL, 2004) e o Índice da Qualidade da Água (IQA).

Assim, para determinar a probabilidade de ocorrência do nível de contaminação dos perigos associados à zona de captação, as seguintes variáveis (perigos) foram definidas na Tabela 7.

(ii) Definição das informações a priori

As Justificativas das informações, atribuídas às variáveis e aos atributos (Tabela 6), para a determinação das distribuições de probabilidades *a priori*

foram:

(a) *Concentração de Escherichia coli na água bruta*

Tabela 7. Variáveis e atributos para identificação dos perigos que interferem na qualidade da água na zona de captação

Variáveis (perigos)	Atributos
Concentração de <i>E. coli</i> acima de 1000/100mL	Sim Não
Concentração de protozoários <i>Cryptosporidium</i> spp. acima de 3 oocistos/L	Sim Não
Concentração de cianobactérias acima de 20.00 células/mL	Sim Não
Cianotoxinas acima do Valor Máximo Permitido (VMP)	Sim Não
Agrotóxicos ⁽¹⁾ acima do Valor Máximo Permitido (VMP)	Sim Não
Substâncias químicas orgânicas ⁽²⁾ acima do Valor Máximo Permitido (VMP)	Sim Não
Substâncias químicas inorgânicas ⁽³⁾ acima do Valor Máximo Permitido (VMP)	Sim Não
Índice de qualidade de água (IQA)	Ótima a Boa (52 < IQA ≤ 100) Razoável = (37 < IQA ≤ 51) Ruim a Péssima (≤ 36)

NOTAS: (1) Listas dos agrotóxicos estabelecidos na Portaria de Potabilidade do Ministério da Saúde (2 e 3) Listas das substâncias químicas orgânicas e inorgânicas estabelecidas na Portaria de Potabilidade do Ministério da Saúde.

- **Risco à saúde:** *Escherichia coli* é um indicador de poluição fecal e, portanto, da presença potencial de organismos patogênicos (WHO, 2004).

- **Fonte de informação:** Resolução CONAMA n.º 357, de 17 de março de 2005, dispõe sobre a classificação dos corpos de água e diretrizes ambientais para o seu enquadramento. Portaria de Potabilidade¹². A Portaria de Potabilidade exige o monitoramento mensal de *Escherichia coli* no(s) ponto(s) de captação de água superficial e:

- ✓ quando for identificada média geométrica anual maior ou igual a 1.000 *Escherichia coli* / 100mL deve-se realizar pesquisa de cistos de *Giardia* spp. e oocistos de *Cryptosporidium* spp. no(s) ponto(s) de captação de água;

- ✓ quando a média aritmética da concentração de oocistos de *Cryptosporidium* spp. for maior ou igual a 3,0 oocistos/L no manancial superficial, recomenda-se a obtenção de efluente em filtração rápida com valor de

¹² Alguns dos critérios especificados nesses itens têm por base a Portaria MS nº 2.914/2011, cujo processo de elaboração participou a autora do presente trabalho.

turbidez menor ou igual a 0,3 uT em 95% das amostras mensais.

- **Definição do limite:** concentração de *Escherichia coli* acima de 1000/100mL.

- **Justificativa:** o monitoramento de *Escherichia coli* deverá ser feito quando a água for proveniente de mananciais superficiais, no entendimento de que eles sejam mais sujeitos à contaminação. Embora não existam correlações numéricas explícitas entre a ocorrência de *Escherichia coli* e de (oo)cistos de protozoários em mananciais superficiais, definiu-se que a pesquisa de oocistos deverá ser feita quando a média de *Escherichia coli* for superior a 1.000 organismos / 100mL. Esse limite foi definido como um indicativo de mananciais fortemente impactados por contaminação de origem fecal e que, portanto, apresentam maior probabilidade de ocorrência de patógenos de origem intestinal (BRASIL, 2010).

(b) *Concentração de oocistos de Cryptosporidium spp. na água bruta*

- **Risco à saúde:** cistos de *Giardia* spp. e oocistos de *Cryptosporidium* spp. possuem dose infectante relativamente baixa e elevada resistência ao cloro, mas são passíveis de remoção na etapa de filtração da água, desde que ocorra uma eficiente remoção de turbidez nos filtros (WHO, 2004).

- **Fonte de informação:** em várias normas e diretrizes da qualidade da água para consumo humano vigentes em diversos países, em geral, não são estabelecidos Valores Máximos Permitidos (VMP) como limites numéricos para micro-organismos patogênicos, mas Valor Máximo Desejável (VMD) de 'zero'; além disso, a abordagem para o controle de protozoários costuma combinar os seguintes critérios: (i) Avaliação Quantitativa de Risco Microbiológico (AQRM); (ii) padrão de turbidez como indicador da remoção de (oo)cistos por meio da filtração; e (iii) tratamento requerido – filtração e desinfecção (USEPA, 2006 e WHO, 2006). Metas de remoção de oocistos de *Cryptosporidium* spp., em geral, são estabelecidas em função da qualidade da água bruta, visando a assegurar um nível de risco anual tido como aceitável.

Nos Estados Unidos (EUA), admite-se como risco aceitável a relação 10^{-4} por pessoa por ano (pppa), ou um caso anual de infecção (independentemente do patógeno) em um universo de 10.000 consumidores,

e valores similares são assumidos nas Diretrizes da Qualidade da Água para Consumo Humano da Organização Mundial da Saúde (OMS) (USEPA, 2006; OMS, 2006).

A norma de potabilidade da água dos EUA, tendo o *Cryptosporidium* spp. como organismo-referência e como pano de fundo o referido nível de risco aceitável, apresenta a seguinte fundamentação (USEPA, 2006):

✓ tratamento convencional (filtração rápida) e filtração lenta: 3 log de remoção de oocistos de *Cryptosporidium* spp., desde que obedecido o padrão de turbidez de 0,3 uT para o tratamento convencional (95% dos dados mensais e máximo de 1,0 uT) e 1,0 uT para a filtração lenta (95% dos dados mensais e máximo de 5,0 uT);

✓ filtração direta: 2,5 log de remoção de oocistos de *Cryptosporidium* spp., desde que obedecido o padrão de turbidez de 0,3 uT (95% dos dados mensais e máximo de 1,0 uT); e,

✓ tratamento convencional ou filtração direta: 0,5 log adicional de remoção de oocistos de *Cryptosporidium* spp., desde que atendido critério de efluente filtrado com turbidez $\leq 0,15$ uT (95% dos dados mensais).

Tais créditos de remoção devem então ser confrontados com o tratamento requerido conforme a seguinte classificação dos mananciais de abastecimento, devendo, ainda, ser verificada a necessidade de remoção adicional àquela proporcionada pela filtração (por exemplo, por desinfecção) (Tabela 8).

Tabela 8. Remoção necessária de oocistos de *Cryptosporidium* spp. de acordo com a concentração na água bruta e a técnica de filtração

Categoria	Concentração (C) de <i>Cryptosporidium</i> spp. no manancial (oocistos/L) ⁽¹⁾	Tratamento adicional aos créditos assumidos	
		Tratamento convencional e filtração lenta	Filtração direta
1	$C \leq 0,075$	NR ⁽²⁾	NR
2	$0,075 \leq C < 1,0$	1,0 log	1,5 log
3	$1,0 \leq C < 3,0$	2,0 log	2,5 log
4	$C \geq 3,0$	2,5 log	3,0 log

Fonte: Usepa (2006).

NOTAS: (1) média aritmética de 12 meses de monitoramento (USEPA, 2006);

(2) NR: não requerido.

A concentração de oocistos no manancial, abaixo da qual não é exigida remoção adicional (0,075 oocistos/L), refere-se a valor baixo e pouco prático

do ponto de vista de detecção de oocistos em programas anuais de monitoramento entre 0,01-0,1 oocistos/L, que, considerando 3 log de remoção por tratamento convencional, corresponderiam a níveis de risco de $1,7 \times 10^{-4}$ e $6,0 \times 10^{-3}$ (valores próximos ao risco aceitável de 10^{-4}). Para as demais categorias, os requerimentos de remoção adicional são computados sobre os créditos pré-conferidos a cada técnica de filtração (3 log para tratamento convencional e filtração lenta e 2,5 log para filtração direta), de forma a resguardar a mesma proteção proporcionada na categoria 1 (os mesmos níveis de risco). Portanto, nas categorias 2, 3 e 4, a remoção total deve ser de 4 log, 5 log e 5,5 log, respectivamente, podendo essa remoção ser alcançada em etapas adicionais de pré ou pós-tratamento, como a filtração em margem, filtração secundária ou desinfecção.

• **Definição do limite:** concentração de protozoários *Cryptosporidium* spp. acima de 3 oocistos/L

• **Justificativa:** a definição do limite de concentração de protozoários (*Cryptosporidium* spp.) foi estabelecido com base no critério de classificação da USEPA ($\geq 3,0$ oocistos/L), sendo baseado em informações de rara ocorrência de valores superiores a este em mananciais dos EUA (USEPA, 2006).

A Portaria de potabilidade brasileira fixa 0,5 uT como limite máximo de turbidez para o efluente de filtros rápidos, tendo em vista o controle de cistos de *Giardia* spp. Adicionalmente, determina o monitoramento de oocistos de *Cryptosporidium* spp. no manancial por um período de dois anos e recomenda que, quando o manancial apresentar 3,0 ou mais oocistos por litro, o limite de turbidez a ser verificado passa a ser de 0,3 uT.

(c) *Concentração de cianobactérias na água bruta*

• **Risco à saúde:** os perigos associados à presença de cianobactérias em mananciais de abastecimento de água derivam de sua capacidade de produzir diversas toxinas, conhecidas como “cianotoxinas”, que oferecem risco à saúde humana.

• **Fonte de informação:** a Resolução CONAMA nº 357/2005 fixa o valor de 20.000 células/mL como o limite de enquadramento de corpos d'água para fins de tratamento da água para consumo humano:

✓ tratamento simplificado - 20.000 células/mL; e

✓ tratamento convencional - 50.000 células/mL (BRASIL, 2005).

A norma brasileira de potabilidade da água apresenta as seguintes disposições em relação ao monitoramento de cianobactérias e cianotoxinas:

✓ o monitoramento de cianobactérias na água do manancial no ponto de captação deve obedecer à frequência mensal quando o número de cianobactérias não exceder 10.000 células/mL e semanal, quando o número de cianobactérias exceder este valor; e

✓ sempre que o número de cianobactérias na água do manancial no ponto de captação exceder 20.000 células/mL, será exigida a análise semanal de cianotoxinas na água na saída do tratamento.

• **Definição do limite:** concentração de cianobactérias acima de 20.00 células/mL.

• **Justificativa:** Esse valor foi adotado com base nas disposições desses instrumentos reguladores.

(d) Cianotoxinas na água bruta

• **Riscos à saúde:** vários gêneros e espécies de cianobactérias que formam florações podem produzir toxinas (cianotoxinas), que podem provocar efeitos graves à saúde humana. As cianobactérias são passíveis de remoção por meio de tratamento convencional, exceto as cianotoxinas (AZEVEDO *et al.*, 2005).

• **Fonte de informação:** tendo em vista que a remoção de cianotoxinas por meio do tratamento convencional da água é muito limitada, para efeito deste estudo foi assumido como limite crítico o próprio padrão de potabilidade estabelecido na norma brasileira.

• **Definição do limite:** Cianotoxinas acima do Valor Máximo Permitido (VMP).

• **Justificativa:** Esse VMP foi adotado com base no Padrão de Potabilidade do Ministério da Saúde.

(e) Agrotóxicos na água bruta

• **Efeitos à saúde:** vários agrotóxicos são capazes de provocar efeitos crônicos à saúde pela exposição continuada a doses baixas via consumo de água. Do ponto de vista da avaliação de risco, a *priorização* de substâncias a serem regulamentadas em normas de qualidade da água se

dá pela observação conjunta da toxicidade em si da substância e do grau de exposição, ou seja, considerando a intensidade de uso de determinada substância e sua dinâmica ambiental, favorecendo mais ou menos a probabilidade de ocorrência na água (por exemplo, solubilidade na água, biodegradabilidade, fotodegradabilidade, tendência à sorção em sedimentos, mobilidade em solos). Para as substâncias priorizadas, o respectivo VMP na água é estabelecido levando em consideração informações toxicológicas (em geral, obtidas de ensaios em laboratório com cobaias) e um determinado padrão de consumo diário de água. Em outras palavras, é estabelecida a dose diária aceitável de determinada substância para efeito de controle dos potenciais efeitos adversos advindos do consumo de água em longo prazo (por pressuposto, por toda a vida) (WHO, 2006).

- **Fontes de informações:** tendo em vista que a remoção de agrotóxicos por meio do tratamento convencional da água é muito limitada (WHO, 2004), foi assumido como limite crítico o próprio padrão de potabilidade estabelecido na norma brasileira.

- **Definição do limite:** agrotóxicos acima do VMP.

- **Justificativa:** esse VMP foi adotado com base no Padrão de Potabilidade do Ministério da Saúde.

(f) Grupos de substâncias químicas orgânicas e inorgânicas

- **Efeito à saúde:** o potencial das substâncias químicas orgânicas e inorgânicas em causar danos à saúde humana está fundamentado nas informações toxicológicas (carcinogenicidade e toxicidade aguda) dessas substâncias (WHO, 2006 e PAN, 2005).

- **Fontes de informações:** tendo em vista que a remoção das substâncias químicas (orgânicas e inorgânicas) por meio do tratamento convencional da água é muito limitada (WHO, 2004), foi assumido como limite crítico o próprio padrão de potabilidade estabelecido na norma brasileira.

- **Definição do limite:** Substâncias químicas (orgânicas e inorgânicas) acima do VMP.

- **Justificativa:** Esse VMP foi adotado com base no Padrão de Potabilidade do Ministério da Saúde.

(h) *Índice da Qualidade de Água (IQA)*

• **Efeitos à saúde:** o IQA foi desenvolvido para avaliar a qualidade da água bruta visando a seu uso para o abastecimento público após tratamento. Os parâmetros utilizados no cálculo do IQA são em sua maioria indicadores de contaminação causada pelo lançamento de esgotos domésticos. Os parâmetros envolvidos no cálculo do índice são: temperatura, pH, oxigênio dissolvido, demanda bioquímica de oxigênio, nitrogênio total, fósforo total, resíduo total e turbidez.

• **Base de informação:** o IQA é composto por nove parâmetros, com seus respectivos pesos (w), que foram fixados em função da sua importância para a conformação global da qualidade da água (CETESB, 2009). Além de seu peso (w), cada parâmetro possui um valor de qualidade (q), obtido do gráfico de qualidade em função de sua concentração ou medida (CETESB, 2009). O cálculo do IQA é feito por meio do produto ponderado dos nove parâmetros, segundo a seguinte fórmula (Equação 2.14):

$$IQA = \prod_{i=1}^n q_i^{w_i} \quad (2.14)$$

Em que **IQA** é o Índice de Qualidade das Águas, um número entre 0 e 100; **q_i** é a qualidade do *i-ésimo* parâmetro, um número entre 0 e 100, obtido do respectivo gráfico de qualidade em função de sua concentração ou medida (resultado da análise); e **w_i** é o peso correspondente ao *i-ésimo* parâmetro fixado em função da sua importância para a conformação global da qualidade, isto é, um número entre 0 e 1, sendo a Equação 2.15 e **n** o número de parâmetros que entram no cálculo do IQA.

$$\sum_{i=1}^n W_i = 1 \quad (2.15)$$

• **Definição do limite:** Os valores do IQA são classificados em faixas, que variam entre 0 a 100: Ótima a Boa ($52 < IQA \leq 100$); Razoável = ($37 < IQA \leq 51$); e Ruim a Péssima (≤ 36).

• **Justificativa:** Esses valores permitem avaliar a qualidade da água bruta quanto ao nível de contaminação causada pelo lançamento de esgotos domésticos (nutrientes) e, conseqüentemente, avaliar o grau de trofia da zona de captação. Ambientes eutrofizados podem propiciar o

desenvolvimento acentuado do fitoplâncton (floração), incluindo microalgas e cianobactérias.

(iii) Construção de rede Bayesiana

As probabilidades de distribuição *a priori* utilizadas na construção da rede Bayesiana foram estimadas pelas informações técnico-científicas de cada variável e atributo, conforme justificativas descritas acima.

A variável *NÍVEL DE CONTAMINAÇÃO DOS PERIGOS ASSOCIADOS À ZONA DE CAPTAÇÃO* assume duas classificações (alto e baixo), cujos significados estão definidos na Tabela 9.

Tabela 9. Níveis de contaminação dos perigos associados à zona de captação

Nível de impacto dos perigos	Significado
Alto	Zona de captação com perigos potencialmente significativo que interferem diretamente na qualidade da água e, conseqüentemente, no tratamento. A presença desse tipo de perigo requer tratamento com filtração, produção de água filtrada com turbidez $\leq 0,3$ uT ou uso de desinfecção com cloro ou outro eficiente (como ozônio e radiação ultravioleta) e, ou intervenções para minimização da contaminação na bacia hidrográfica.
Baixo	Zona de captação com perigos não significativos , sem interferência direta na qualidade da água e tratamento. Esses perigos são em tese facilmente removidos por meio das técnicas usuais de tratamento da água (ciclo completo ou não).

A construção da rede seguiu o mesmo procedimento na etapa da bacia hidrográfica.

3.3.2. Base de conhecimento para identificação dos pontos críticos de controle na estação de tratamento de água

Para a determinação dos Pontos Críticos de Controle (PCCs) na Estação de Tratamento de Água (ETA), utiliza-se o método da árvore de decisão preconizada no método de Avaliação de Perigos e Pontos Críticos de Controle (APPCC) (ver item 2.3.1).

Os PCCs são caracterizados como críticos quando: i) o perigo em questão não pode ser controlado / removido em uma etapa seguinte da estação de tratamento de água; e ii) é possível estabelecer limites críticos e, ou

operacionais e as respectivas medidas de controle, de modo a prevenir, reduzir ou eliminar o perigo a um nível aceitável (WHO, 1998).

Sua identificação se baseia no uso de uma árvore de decisão, na qual há perguntas específicas que, segundo as respostas, ajudam a destacar se a etapa da estação de tratamento ou evento perigoso (perigo) é ou não um PCC.

Segundo Mortmore e Wallace, (2001), a árvore de decisão consiste em uma série de perguntas que devem ser respondidas para verificar como cada perigo encontrado pode ser controlado / removido em cada etapa da estação de tratamento de água (mistura rápida, coagulação, floculação, decantação, filtração, correção de pH, desinfecção e fluoretação).

Para responder às questões apresentadas na árvore de decisão, foi feita uma avaliação da capacidade real de remoção e, ou redução dos perigos encontrados na zona de captação. A determinação dos PCCs pressupõe a identificação dos eventos perigosos / perigos. A identificação dos eventos perigosos na estação de tratamento de água foi realizada, com base em uma lista de verificação de verificação (*check list*), destacando os principais eventos em cada etapa do tratamento (Adução Mistura Rápida, Coagulação, Floculação, Decantação, Filtração e Fluoretação).

A definição de um PCC está associada ao conceito de múltiplas barreiras, ou seja, a identificação de um PCC significa que as fases posteriores do processo não conseguem eliminar o perigo ou reduzir a probabilidade do risco em níveis aceitáveis.

Segundo Oliveira (2011), a produção de água potável se diferencia da produção de alimentos principalmente pelos seguintes aspectos: (i) tipo da “matéria-prima”; (ii) quantidade e disponibilidade de “matéria-prima”; e (iii) tempo entre a produção e o consumo. Cabe destacar, que o processamento de alimentos é realizado pelo processo de bateladas, uma vez que a produção de água potável é realizada de forma contínua.

Dessa forma, para a identificação dos PCCs, foi necessário fazer uma adaptação, apenas na terminologia, não alterando os princípios da árvore de decisão original do *Codex Alimentarius*. A Figura 13 ilustra a árvore de decisão utilizada neste estudo.

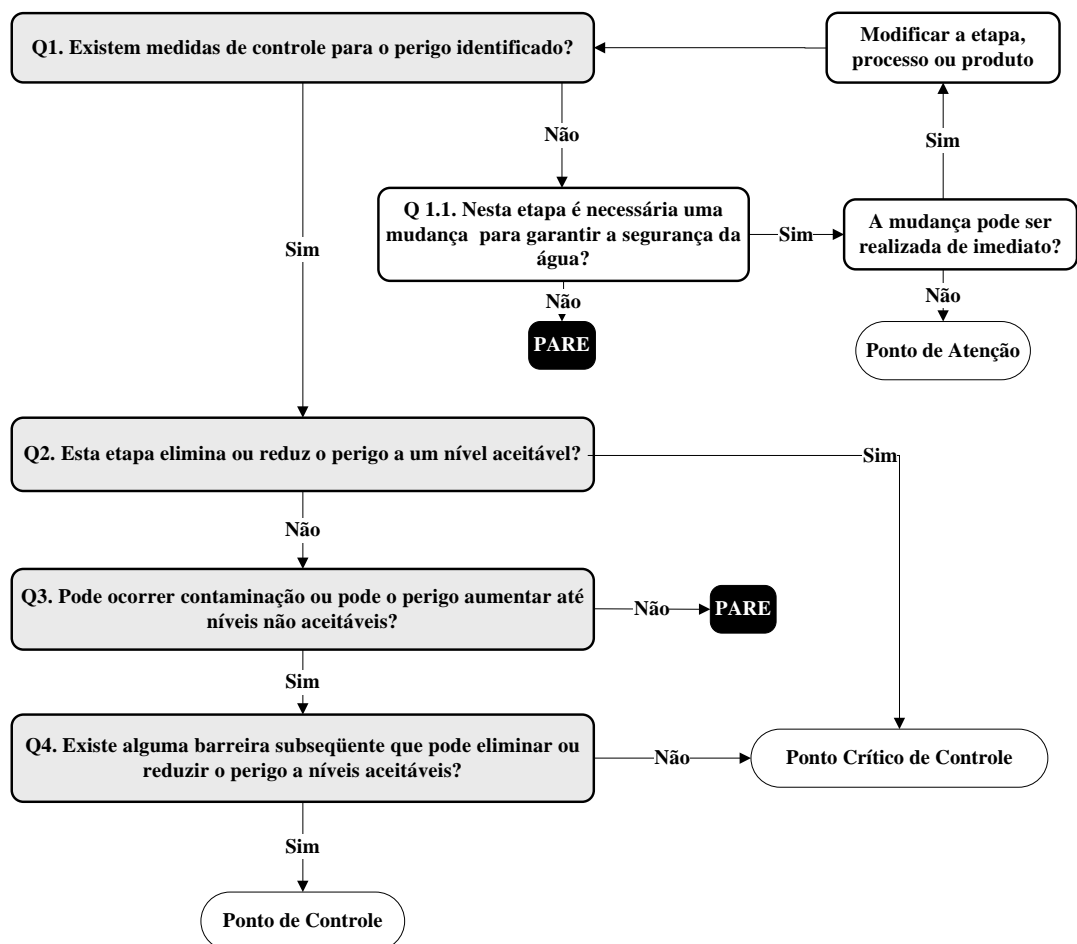


Figura 13. Árvore de Decisão para identificação de PCC

Fonte: Adaptado de WHO (1997) e Vieira e Moraes (2005).

Vieira e Moraes (2005) buscaram adaptar a terminologia, não alterando os princípios da árvore de decisão original do *Codex Alimentarius*, em experiência adquirida na elaboração e aplicação de um Plano de Segurança da Água na empresa Águas do Cávado S.A.

3.3.4. Base de conhecimento para identificação dos perigos na rede distribuição

(i) Definição das variáveis

A Tabela 10 resume as variáveis e os atributos para determinar a probabilidade de ocorrência do nível de perigo na rede de distribuição. As variáveis selecionadas (física, hidráulica e qualidade da água) serão

justificadas no item seguinte.

(ii) *Definição das informações a priori*

As informações *a priori* utilizadas para avaliação dos perigos que interferem na qualidade da água na rede de distribuição foram baseadas em evidências da literatura técnica e estudos e pesquisas sobre o tema.

Tabela 10. Variáveis e atributos para determinação da probabilidade de ocorrência do nível de perigo físico da rede de distribuição

Variáveis	Atributos
Física	
A tubulação de PVC tem idade acima de 20 anos?	Sim Não
A tubulação de cimento amianto tem idade acima de 20 anos?	Sim Não
A tubulação de ferro dúctil tem idade acima de 35 anos?	Sim Não
A tubulação de ferro galvanizado tem idade acima de 15 anos?	Sim Não
Comprimento da tubulação é acima de 240 metros?	Sim Não
Diâmetro da tubulação é abaixo de 125 mm?	Sim Não
Hidráulica	Atributos
Pressão acima do valor recomendado?	Sim Não
Existem vazamentos acima de 3 ou mais?	Sim Não
Índice de Perdas (IP) é acima de 27%?	Sim Não
Qualidade da Água	Atributos
Cloro residual livre acima do limite permitido	Sim Não
Bactérias heterotróficas acima do limite permitido	Sim Não
Coliformes Totais acima do limite permitido	Sim Não
<i>Escherichia coli</i> acima do limite permitido	Sim Não
Substâncias organolépticas acima do limite permitido	Sim Não
Substâncias químicas acima do limite permitido	Sim Não
Substâncias químicas (subprodutos da desinfecção) acima do limite permitido	Sim Não
Turbidez acima do limite permitido	Sim Não

As Justificativas das informações, atribuídas às variáveis e aos atributos (Tabela 9), para a determinação das distribuições de probabilidades *a priori*, foram:

(a) *Variável física*

A variável física é avaliada em função do tipo de material da tubulação da

rede: *PVC, Cimento Amianto, Ferro Dúctil e Ferro Galvanizado*. As variáveis físicas são idade, comprimento e diâmetro da tubulação. Godfrey e Howard (2005) observam que a seleção de materiais a serem utilizados em tubulações deve considerar os seguintes aspectos:

✓ **Idade da tubulação:** o conhecimento de histórico das falhas facilita a predição da vida útil dos diferentes materiais dos tubos, definida como um tempo de vida inferior (curto prazo) e superior (longo prazo). Herz (1998) relata ser difícil prognosticar o tempo de duração das redes de distribuição, que, não obstante, está relacionado ao material dos tubos. Para efeito do presente estudo, o grau de vulnerabilidade associado à idade da tubulação foi estabelecido com base nos estudos de Herz (1998) e Herz e Lipkow (2002) (Quadro 7).

Quadro 7. Nível do perigo atribuído à variável idade da tubulação em função do tipo de material da tubulação

Tipo de material da tubulação	Idade da tubulação	Nível do perigo
PVC	> 20 anos	Alto
Cimento amianto	≥ 20 anos	Alto
Ferro dúctil	≥ 35 anos	Alto
Ferro galvanizado	≥ 15 anos	Alto

Fonte: Adaptado de Herz e Lipkow (2002).

✓ **Comprimento da tubulação:** Godfrey *et al.* (2002) indicam que quanto maior o comprimento das tubulações, maior a vulnerabilidade das redes. Em estudos desenvolvidos por Ballantyne e More (1995) e Geldreich (1996), tubulações de 100 m de extensão foram consideradas menos vulneráveis do que aquelas com 300 m. A associação de limites de comprimento de tubos com diferentes categorias de nível de perigo é característica própria de cada sistema. No presente estudo, foi adotado o valor de 120 m como representativo da situação de menor perigo, sendo as demais categorias arbitradas como múltiplas deste valor (Quadro 8).

Quadro 8. Nível do perigo atribuído a variável comprimento da tubulação

Comprimento da tubulação (m)	Nível do perigo
≤ 120	Baixo
120 < L ≤ 240	Médio
L > 240	Alto

Fonte: Adaptado de Godfrey *et al.* (2002).

✓ **Diâmetro da tubulação:** a estimativa do nível do perigo atribuído

associada ao diâmetro das tubulações foi baseada nos estudos de Cooper *et al.* (2004) e Kiene *et al.* (1998), que revelaram que tubulações de grande diâmetro são menos suscetíveis a falhas em comparação com as de menor diâmetro. Os critérios adotados no presente estudo estão descritos no Quadro 9.

Quadro 9. Nível do perigo atribuído a variável diâmetro da tubulação

Diâmetro da tubulação (m)	Nível do perigo
≤ 50 a 125	Alto
150 a 250	Médio
> 250	Baixo

Fonte: Adaptado de Cooper *et al.* (2004) e Kiene *et al.* (1998).

(b) Variável hidráulica

Na avaliação da variável hidráulica, as informações levadas em consideração foram (i) vazamentos, (ii) pressões e (ii) perdas de água, devendo ser considerados os seguintes aspectos:

✓ **Vazamentos:** o nível de perigo foi associado à quantidade de vazamentos ocorridos em cada trecho da rede de distribuição, da seguinte forma: i) acima de três vazamentos: *nível de perigo alto* e ii) de um a dois vazamentos: *nível de perigo baixo*;

✓ **Pressões:** trechos da rede distribuição que operam com pressões baixas ou negativas estão vulneráveis à contaminação, sendo que tubulações mais antigas e deterioradas têm menor capacidade para suportar essas oscilações. Kiermeyer *et al.* (2001) relatam que estudos indicaram existir correlação direta entre ondas de pressões transientes e ingresso de contaminantes microbiológicos nos sistemas de distribuição de água. A contaminação pode ser devida à entrada direta ou ao desprendimento do biofilme devido às ondas de pressão transitórias (GELDREICH, 1996; LeCHEVALLIER, 1999);

✓ **Perdas de água:** essa variável está associada a vazamentos na rede e, portanto, indica vulnerabilidade. Em geral, índices de perda em redes de distribuição são computados como a diferença entre o volume de água distribuído e o micromedido. A avaliação do nível de perigo, quanto a perdas de água no sistema, foi baseada nos estudos de Marcka (2004) e Tardelli Filho (2004) (Quadro 10).

Quadro 10. Nível de perigo da rede de distribuição associado ao índice de perdas de água

Índices de Perdas (IP) (%)	Nível do perigo
IP < 20	Baixo
20 < IP < 27	Médio
IP > 27	Alto

Fonte: Adaptado de Marcka (2004) e Tardelli Filho (2004).

(c) Variável qualidade da água

Os parâmetros considerados foram turbidez, coliformes totais, *E. coli*, cloro residual, pH, contagem de bactérias heterotróficas, produtos da desinfecção, ferro e manganês. A avaliação do nível de perigo levou em consideração bancos de dados de monitoramento desses parâmetros e os limites estabelecidos na norma brasileira de potabilidade da água.

(iii) Construção de rede Bayesiana

Cada uma das variáveis pode assumir apenas dois valores, *sim* ou *não*, que significam nível de perigo *alto* e *baixo*, respectivamente. Para a variável *QUALIDADE DA ÁGUA*, o valor *sim* indica alteração na qualidade da água tratada e, conseqüentemente, perigo para a população. A partir das informações e opiniões obtidas nos estudos justificados para cada variável acima, as tabelas de probabilidade de distribuição *a priori* são definidas.

Para a construção da rede Bayesiana, os arcos do grafo direcionado acíclico representam as relações existentes entre as variáveis (físicas, hidráulicas e qualidade da água). A variável *NÍVEL DO PERIGO NA REDE DE DISTRIBUIÇÃO* assume duas classificações (alto, e baixo). O nível alto significa perigos associados à alteração da qualidade da água tratada. O procedimento para determinação da probabilidade *a posteriori* seguiu os mesmos procedimentos das etapas da bacia hidrográfica e da zona de captação.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Neste capítulo apresenta o resultado da aplicação das redes Bayesianas para identificação de eventos perigosos / perigos associados à bacia hidrográfica do Ribeirão São Bartolomeu, zona de captação e rede de distribuição, conforme etapas apresentadas no sistema de abastecimento de água apresentado na Figura 14. Na estação de tratamento de água apresenta-se o resultado da técnica de Análise de Perigos e Pontos Críticos de Controle (APPCC), conforme procedimento metodológico (Item 3).

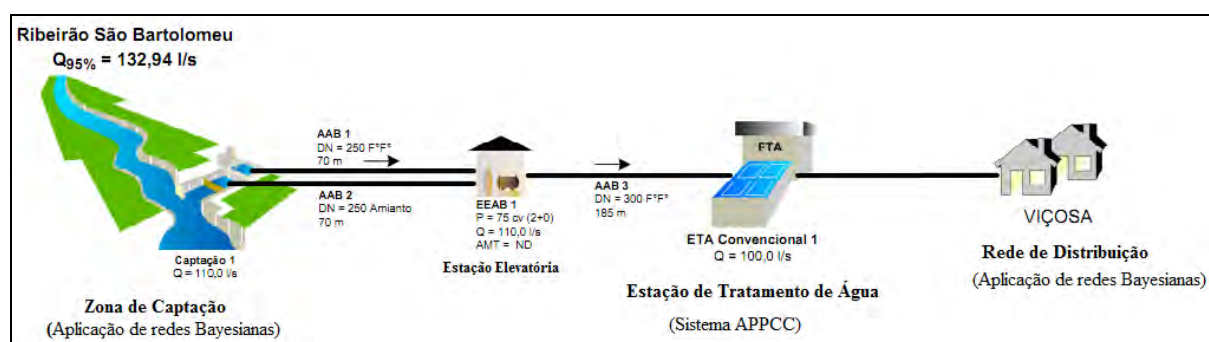


Figura 14. Etapas do sistema de abastecimento de água.

Fonte: Adaptado de Brasil (2011).

4.1. Determinação da probabilidade de ocorrência dos eventos perigosos na bacia hidrográfica contribuinte à zona de captação

4.1.1. Diagnóstico / avaliação da bacia hidrográfica

O Ribeirão São Bartolomeu (SB) recebe o aporte hídrico de sete córregos, a partir dos quais foram delimitadas as sub-bacias monitoradas, nomeadas a partir da denominação do curso d'água principal: sub-bacia 1, Córrego São Lucas; sub-bacia 2, Córrego dos Machados; sub-bacia 3, Córrego Santa Catarina; sub-bacia 4, Córrego Paraíso; sub-bacia 5, Córrego Palmital; sub-bacia 6, Córrego "Antuérpia"; e sub-bacia 7, Córrego do Engenho.

O diagnóstico sobre as fontes de poluição da SB foi obtido pelo levantamento cadastral das 249 propriedades rurais e residenciais. Esse levantamento permitiu

avaliar os tipos de eventos perigosos existentes na bacia hidrográfica, como, por exemplo, a ocorrência de fontes de poluição difusa e pontuais (atividades agropecuárias, esgotos sanitários, dejetos de animais, emprego de fertilizantes e agrotóxicos), além da identificação de usos da água.

Outras informações foram obtidas como o mapa de uso e ocupação do solo, declividade e solo. Essas informações foram elaboradas por meio de classificação supervisionada da imagem de satélite.

Os resultados obtidos do levantamento de campo das 249 propriedades rurais e residenciais na bacia do SB e as informações digitais permitiram identificar as seguintes informações: i) disponibilidade hídrica; ii) uso e ocupação por indústrias, pecuária, olericultura¹³, agriculturas diversas, solo exposto, áreas urbanas, pastagem degradada, pastagem não degradada, formações florestais, declividade, tipo de solo; e iii) distâncias das fontes de poluição (dos currais e fossa próximas ao manancial).

As informações sobre os usos da água na bacia do SB obtidas foram: mina / nascente (47,6%); água de rio / ribeirão (21,4%); poço artesiano (19,0%); poço / cisterna água (7,1%); e represa/açude (4,8%). O consumo doméstico é o principal uso da água na bacia (97,9%), estando entre os demais usos o recreacional, para consumo animal e para irrigação (milho, hortaliças etc.).

O Ribeirão SB apresenta vazão reduzida: $\cong 100 \text{ L s}^{-1}$ e $\cong 200 \text{ L s}^{-1}$, respectivamente, em períodos de estiagem e chuvas. Os usos conflitantes da água e o desequilíbrio no balanço oferta x demanda de água são um dos principais problemas atuais e futuros da bacia. Dessa forma, concluiu-se que a disponibilidade hídrica da bacia é insatisfatória.

Essa avaliação foi baseada no resultado do diagnóstico de disponibilidade hídrica feito pela Agência Nacional de Águas (ANA), denominado de Atlas de Abastecimento Urbano. O resultado da avaliação da situação do abastecimento (SAAE-I), cuja captação é na bacia do Ribeirão São Bartolomeu, apresenta uma demanda urbana de 196 L/s para um cenário de 2015, necessitando de ampliação do sistema (BRASIL, 2011).¹⁴ A resposta à variável / evento perigoso disponibilidade

¹³ É a área da horticultura abrange a exploração de hortaliças e engloba culturas folhosas, raízes, bulbos, tubérculos, frutos diversos e partes comestíveis de plantas.

¹⁴ Atlas de Abastecimento urbano disponível em:

<<http://atlas.ana.gov.br/atlas/forms/analise/Geral.aspx?est=8?>

hídrica da bacia, Tabela 2, para determinação da probabilidade *a posteriori* na rede Bayesiana foi ‘*sim*’, contribuindo, significativamente, para o aumento da probabilidade do impacto no abastecimento do Município de Viçosa-MG.

A Figura 15 mostra o mapa com a distribuição espacial das classes de uso e ocupação do solo na bacia do SB, gerado pela vetorização das feições reconhecidas na ortoimagem. A Tabela 10 resume os resultados dos percentuais encontrados para cada tipo de uso e ocupação do solo, acompanhados do resultado da avaliação do nível de impacto das ameaças realizada por meio da técnica *Delphi* de consulta a especialistas (item 3.3.1 - Tabela 4).

Tabela 11. Uso e ocupação do solo na bacia hidrográfica do Ribeirão São Bartolomeu, classes, áreas e nível de impacto

Classes	Peso atribuído (0 a 100)	Área (ha)	Área (%) em relação ao total da bacia
Áreas urbanas	100	187,8	5,4
Solo Exposto	75	111,2	3,2
Olericultura	70	487,1	13,9
Agricultura diversas	60	906,4	25,9
Pastagem degradada	45	539,6	15,4
Pastagem não degradada	1	1011	28,8

Conforme os resultados do levantamento de campo, a bacia sofre pressão de crescimento urbano, ainda que as áreas urbanizadas representem apenas 5,4% (187,8 / 3523,6 ha) da área total (Figura 15). Quanto ao destino do esgoto doméstico, 36,5% das propriedades utilizam fossa seca; 16,8%, fossa com sumidouro; 2,0%, fossa séptica; 32,9% lançam os esgotos em cursos d’água; 1,6%, a céu aberto; e 10%, em rede pública. No que diz respeito ao destino do lixo, 91,8% (226 / 249) é coletado pela Prefeitura Municipal de Viçosa e 9,2% (23/249) é queimado. Não foram identificadas atividades industriais na bacia hidrográfica e, portanto, essa variável / evento perigoso (Tabela 2) recebeu resposta “*não*” na rede Bayesiana.

O levantamento das atividades pecuárias revelou a existência de 25,3% propriedades com exploração animal. Foi constatada maior população de suínos, embora a maior proporção de propriedades se dedique à criação de bovinos. Registrou-se, ainda, a criação de equinos, caprinos, aves e peixes. Cabe destaque para o fato de que na maioria dessas propriedades os animais têm livre acesso aos cursos d’água. O percentual de pastagem degradada na bacia é alto

(906,4 / 3.523,6 ha = 25,9%) em comparação ao total de pastagem não degradada (539,6 / 3.523,6 ha = 15,4%). Esse evento perigoso, em conjunto com a exploração de animais e a ocupação urbana, eleva o nível de impacto alto na bacia. Dessa forma, a resposta a essa variável / evento perigoso atividades pecuárias recebeu resposta “*sim*” na rede Bayesiana.

A bacia apresentou baixo percentual de solo exposto (111,2 / 3.523,6 ha = 3,2%) e elevada área com cobertura vegetal (1011,0 / 3.523,6 ha = 28,8%) e, portanto, a rede Bayesiana considerou o impacto por solo exposto como evento perigoso baixo (Figura 15). Dessa forma, a resposta à variável / evento perigoso solo exposto recebeu resposta “*não*” na rede Bayesiana.

Em 34,9% das propriedades, é desenvolvido algum tipo de atividade agropecuária, sendo que apenas 8,8% fazem irrigação e 14,85% usam defensivos agrícolas. O uso de agrotóxicos ocorre de forma aleatória (depende da cultura), ou seja, frequentemente de uma a duas vezes ao ano. Apesar do registro de 13,9% (487,1 / 5.523,6 ha) de uso e ocupação do solo com atividades agrícolas diversas, o monitoramento de agrotóxicos na bacia hidrográfica durante um ano, além do resultado do monitoramento na zona de captação realizado pelo SAEE-Viçosa, não revelou presença desses contaminantes na água. Dessa forma, na rede Bayesiana não se considerou o impacto decorrente dessas atividades. Assim, a resposta a essa variável / evento perigoso variável atividades agrícolas diversas foi “*não*”.

Quanto à variável / evento perigoso distâncias dos currais e fossa próximas ao manancial, cabe destacar que foram identificadas as seguintes fontes pontuais de poluição em toda a extensão da bacia: uma caprinocultura, duas suinoculturas e uma estação de tratamento de esgotos sanitários. Currais e fossas sépticas foram encontrados em faixas de distância (raio) de 0 a 1.000 m dos cursos d’água e isso foi considerado na rede Bayesiana como evento perigo alto. Assim, a resposta à variável distâncias dos currais e fossa próximas ao manancial recebeu resposta “*sim*” na rede.

Mapa de Uso e Ocupação

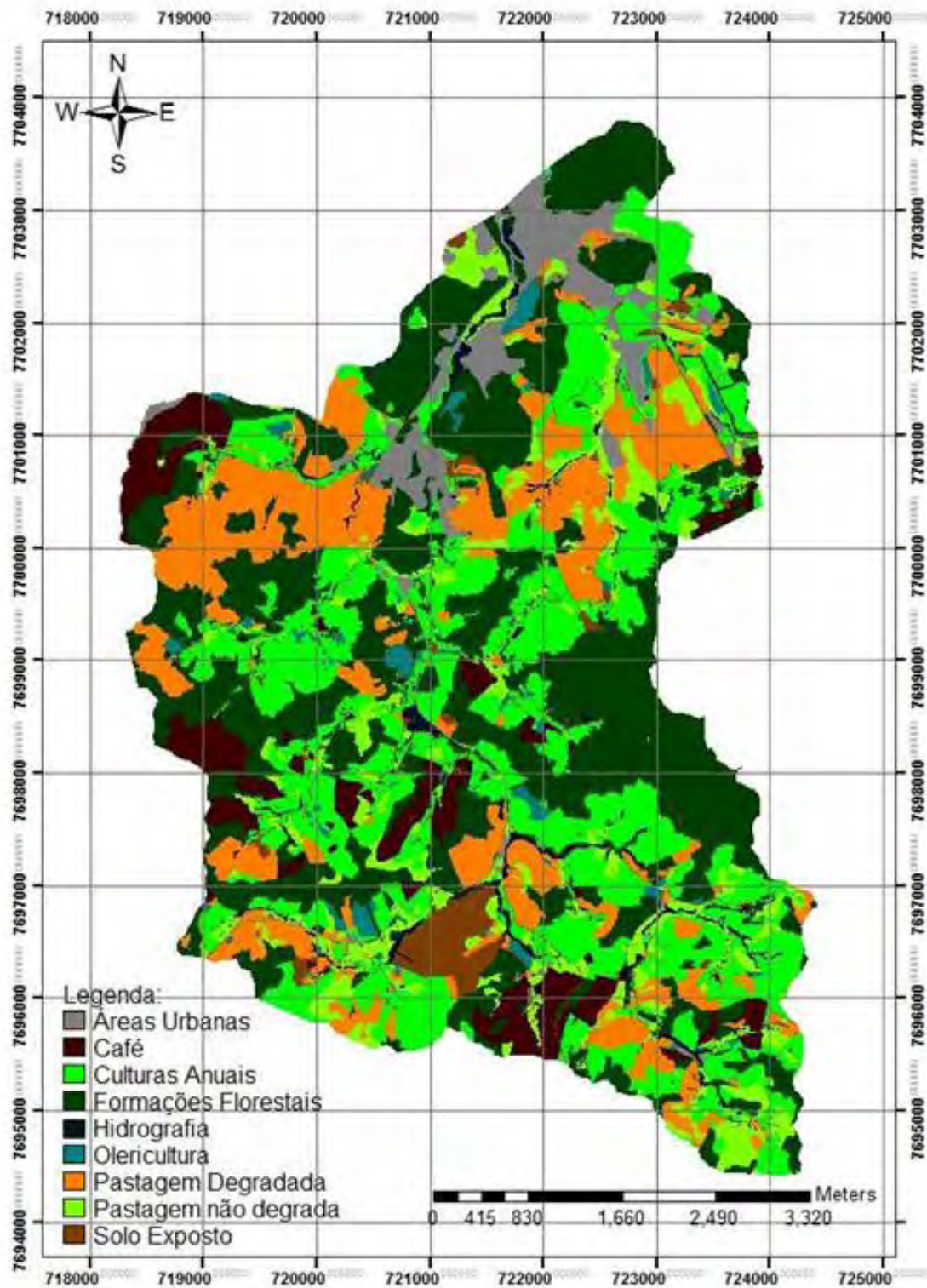


Figura 15. Mapa de uso e ocupação do solo gerado pela vetorização da ortoimagem, bacia hidrográfica do Ribeirão São Bartolomeu contribuinte à zona de captação, Viçosa –MG

Fonte: Silva (2010).

A Figura 16 mostra as diferentes faixas de declividade encontradas na bacia do SB. O mapa mostra que 45% da área de estudo (1.586,3 / 3.523,6 ha) apresentou declividade na faixa de 20% a 45%, e, segundo os resultados da Consulta *Delphi*, declividade acima de 45% foi classificada de impacto alto. Souza *et al.* (2005) discorrem sobre a importância dessa variável na avaliação de eventos perigosos em bacias hidrográficas, visto que áreas com declividade elevada, juntamente com outros fatores como uso inadequado do solo, tendem a acentuar problemas de erosão e hidrossedimentação. A resposta da variável declividade na rede Bayesiana recebeu resposta “*sim*” por permanecer entre 20% a 45% na maior parte da bacia hidrográfica.

O mapa de solos apresenta a predominância de Latossolo Vermelho Amarelo, seguido por Argissolos, Cambissolos, Gleissolos e Neossolos Flúvicos (aluviais) (Figura 17). De acordo com o peso atribuído pelos especialistas, Tabela 4, ao tipo predominante de solo, a rede não levou em consideração essa variável como impacto significativo. A resposta da variável tipo de solo na rede Bayesiana recebeu resposta “*não*”.

Mapa de Declividades

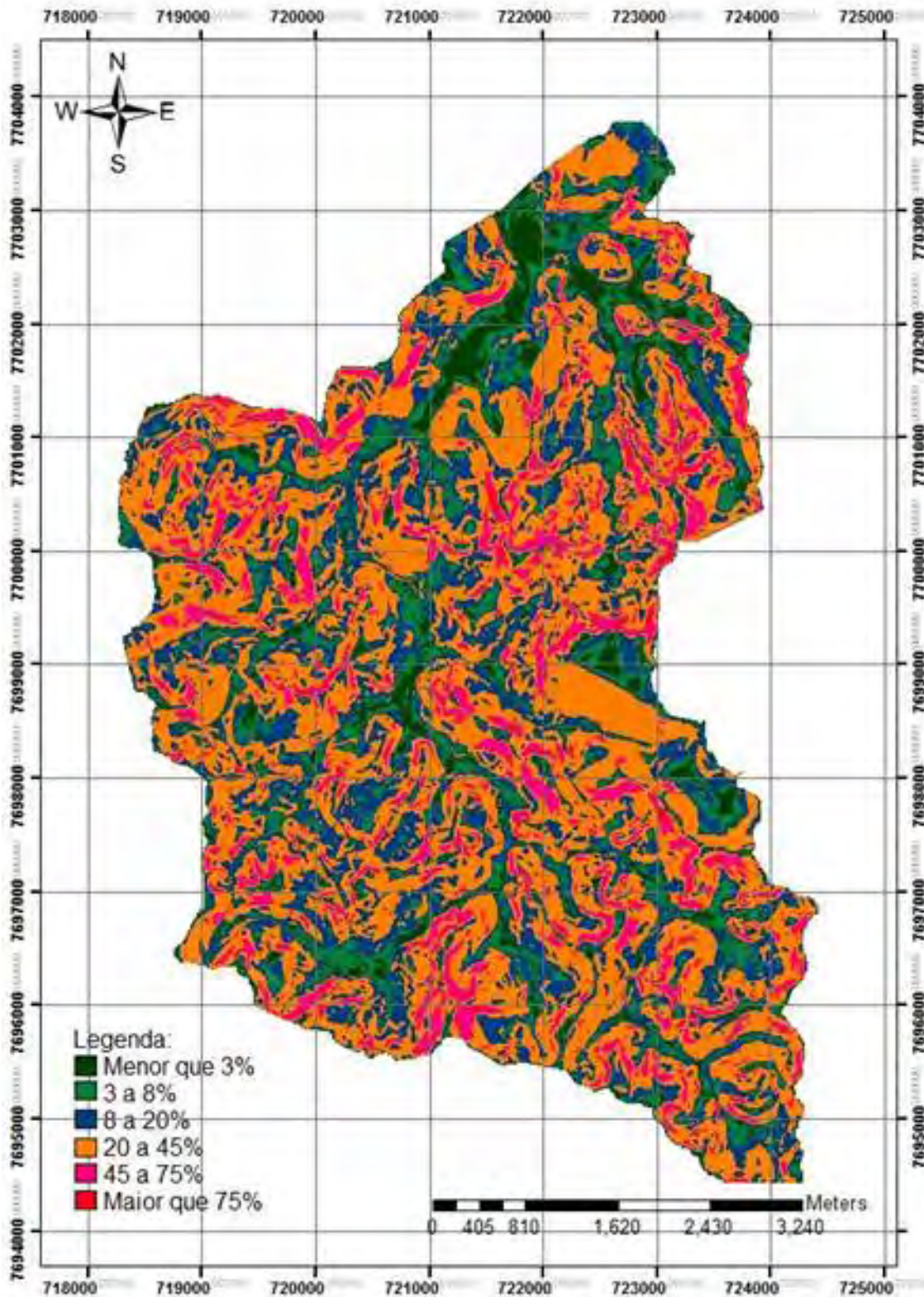


Figura 16. Mapa de declividades, bacia hidrográfica contribuinte à zona de captação, Ribeirão São Bartolomeu, Viçosa – MG

Fonte: Silva (2010).

Mapa de Solos

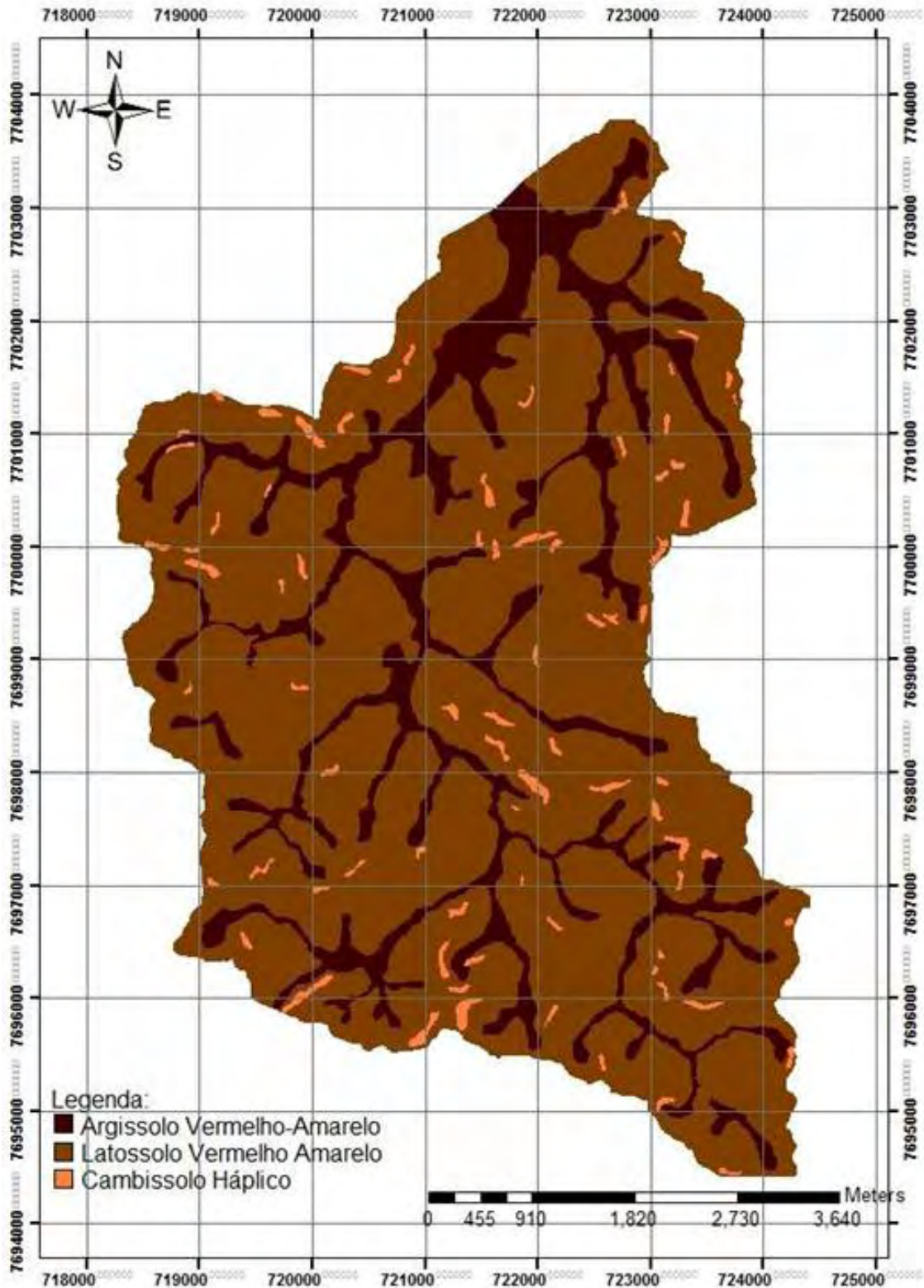


Figura 17. Mapa de tipos de solos, bacia hidrográfica contribuinte à zona de captação, Ribeirão São Bartolomeu, Viçosa – MG

Fonte: Silva (2010).

4.1.2. Rede Bayesiana na bacia hidrográfica

A construção da rede seguiu os passos preconizados no item 3.3.1. As distribuições de probabilidades *a priori* foram obtidas das informações e opiniões consultadas por meio dos especialistas para as diferentes variáveis (eventos perigosos) (Tabela 5).

Para criar a rede Bayesiana na bacia hidrográfica, utilizou-se o *Software UnBBayes*. No passo seguinte definiram-se os arcos da rede. O modelo gráfico representa a relação causal direta entre os nós conectados de entrada e o nó de saída. Na Figura 18 é apresentado o arco da rede construída com 13 nós, conforme o objetivo estabelecido na Tabela 1. O nó NÍVEIS DE IMPACTOS NA BACIA HIDROGRÁFICA, em que a orientação se processa no sentido contrário à flecha, representa o efeito sob a existência da causalidade (INDÚSTRIAS) e os demais nós (12). Assim, mediante a relação causal do nó NÍVEIS DE IMPACTOS NA BACIA HIDROGRÁFICA com INDÚSTRIAS e os demais nós (variáveis), lê-se que a partir das observações realizadas pelo evento perigoso INDÚSTRIAS é gerado o nó NÍVEIS DE IMPACTOS NA BACIA HIDROGRÁFICA, classificado como alto, moderado e baixo.

Após a construção do gráfico dos arcos e nós que compõem a rede, foi feito o preenchimento das tabelas de distribuição de probabilidade *a priori*, conforme definição dos objetivos e informações dos especialistas. No Anexo 3, encontram-se as tabelas de probabilidades utilizadas na construção da rede na bacia hidrográfica contribuinte à zona de captação.

Por exemplo, a variável ÁREAS URBANAS recebeu peso 100 para a importância da interferência dos eventos perigosos na alteração da qualidade da água. Esse peso (conhecimento *a priori*, pressupostos e juízos de valor) será utilizado na construção da tabela de probabilidade condicional.

Com a rede criada, o passo seguinte foi a verificação da consistência da rede Bayesiana, ou seja, a distribuição de probabilidade *a priori* para cada variável deve ser igual a 1. Em seguida, foram feitas a compilação da árvore de junção e a propagação das evidências da rede Bayesiana a partir das informações obtidas junto aos especialistas (4.3.1) (Figura 19).

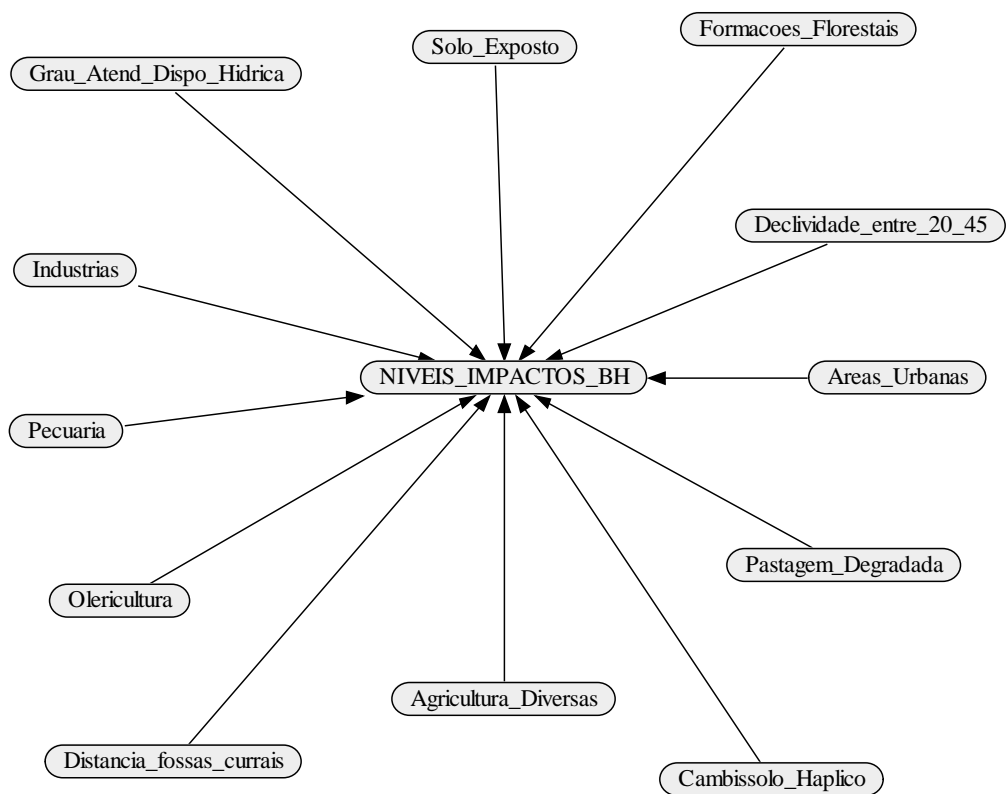


Figura 18. Representação gráfica dos nós e arcos que compõem uma rede Bayesiana em bacia hidrográfica contribuinte à zona de captação

Fonte: software UnBBayes.

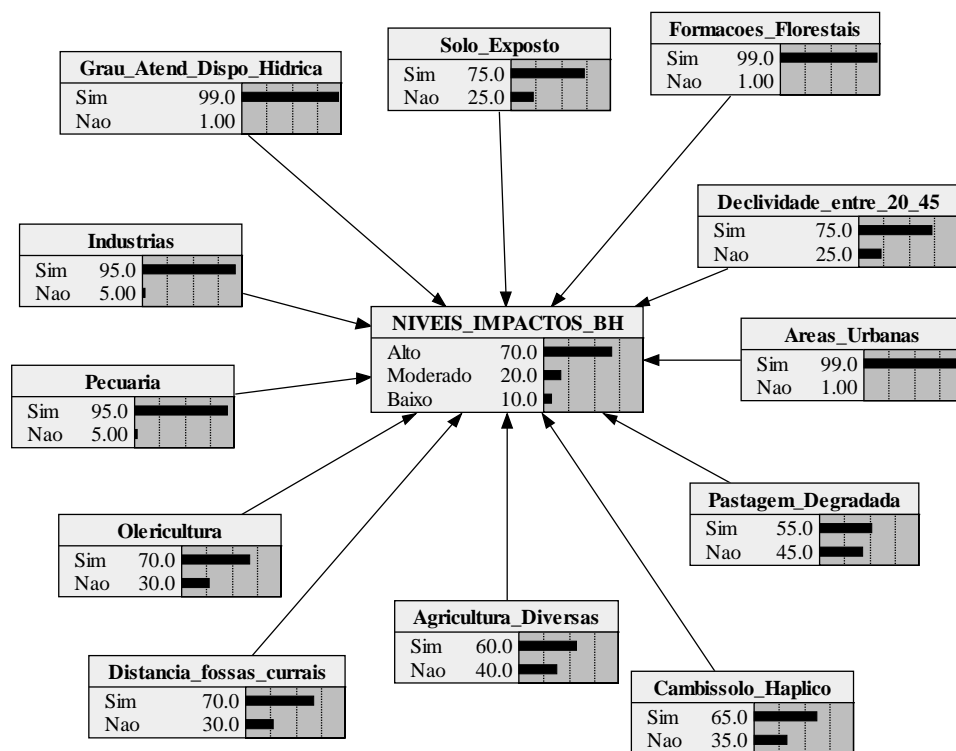


Figura 19. Propagação das evidências da rede Bayesiana a partir das informações obtidas no diagnóstico

O passo final foi o cálculo das distribuições de probabilidades *a posteriori*. A determinação da probabilidade *a posteriori* foi obtida a partir das informações coletadas no campo, conforme diagnóstico / avaliação da bacia hidrográfica elaborado no item 4.1.1. Os resultados obtidos no levantamento de campo estão expressos na Tabela 12.

Tabela 12. Resultados obtidos a partir do levantamento realizado na bacia hidrográfica do Ribeirão São Bartolomeu, Viçosa-MG

Variáveis (Eventos perigosos)		Respostas
1	Grau de atendimento da disponibilidade hídrica é insatisfatório	<u>Sim</u> Não
2	Predominância de uso e ocupação por indústrias	Sim <u>Não</u>
3	Predominância de uso e ocupação por pecuária	<u>Sim</u> Não
4	Predominância de uso e ocupação por olericultura	Sim <u>Não</u>
5	Predominância de uso e ocupação por agriculturas diversas	Sim <u>Não</u>
6	Predominância de uso e ocupação por solo exposto	Sim <u>Não</u>
7	Predominância de uso e ocupação por áreas urbanas	<u>Sim</u> Não
8	Predominância de uso e ocupação por pastagem degradada	<u>Sim</u> Não
9	Predominância de uso e ocupação por formações florestais	<u>Sim</u> Não
10	Declividade encontre-se acima 45%	<u>Sim</u> Não
11	Tipo de solo predominante Cambissolo Háplico	Sim <u>Não</u>
12	Distâncias dos currais e fossa próximas ao manancial	<u>Sim</u> Não

A Figura 20 apresenta o resultado da aplicação da rede criada com o *software* UnBBayes. A aplicação do modelo de classificação Bayesiana na bacia hidrográfica do Ribeirão São Bartolomeu apresentou uma probabilidade *a posteriori* de 78,53% de ocorrência de os eventos perigosos na bacia hidrográfica contribuírem para alteração da qualidade da água na zona de captação. Esse nível de perigo foi classificado como alto, resultando em manancial com eventos perigosos potencialmente significativos que interferem diretamente na qualidade da água e, conseqüentemente, no tratamento.

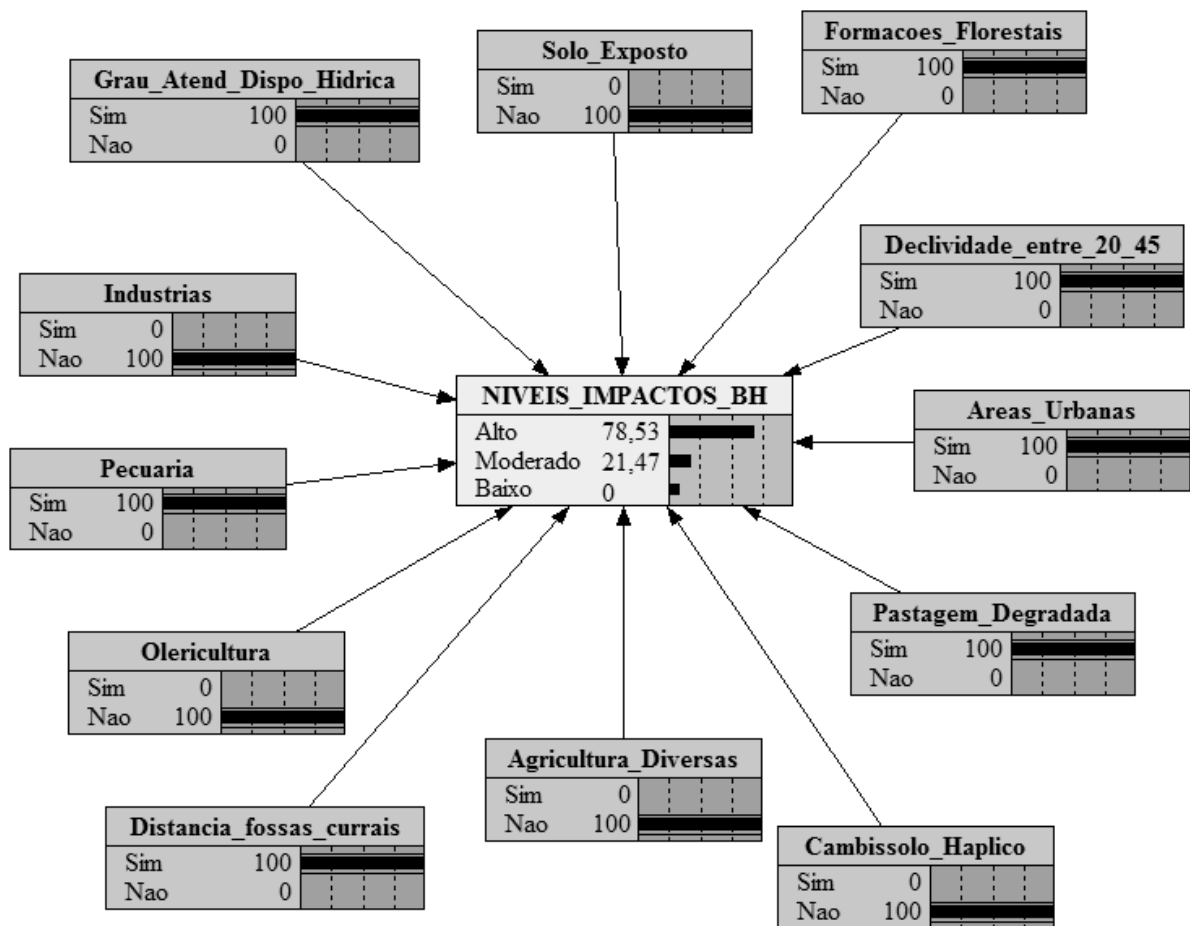


Figura 20: Resultado da aplicação da rede Bayesiana na bacia hidrográfica do Ribeirão São Bartolomeu

Silva (2010), utilizando análise multicritério, que estabelece relação de preferências entre avariáveis pré-analisadas, e a mesma base de dados do presente trabalho, gerou mapa de fragilidade ambiental associado à qualidade da água na bacia do Ribeirão São Bartolomeu (Figura 21).

Os resultados de Silva (2010) indicaram predominância de grau de risco alto (51 a 70%) e concentração em pequenas áreas (3% do total da área de estudo) de risco muito alto (71 a 100%) (Figura 21). Apesar de a fundamentação metodológica e o tipo de resposta dos dois estudos (este e o de Silva) serem distintos (por exemplo, o estudo de Silva fornece informações espacializadas), é interessante notar que os resultados de ambos parecem guardar consistência em relação aos resultados.

O resultado da aplicação da rede Bayesiana neste trabalho permitiu estimar a probabilidade dos impactos dos eventos perigosos na bacia hidrográfica para tomada de decisão.

Mapa de Fragilidade aplicando MAH-2 e WLC

Coordenadas: UTM, Datum: SAD69

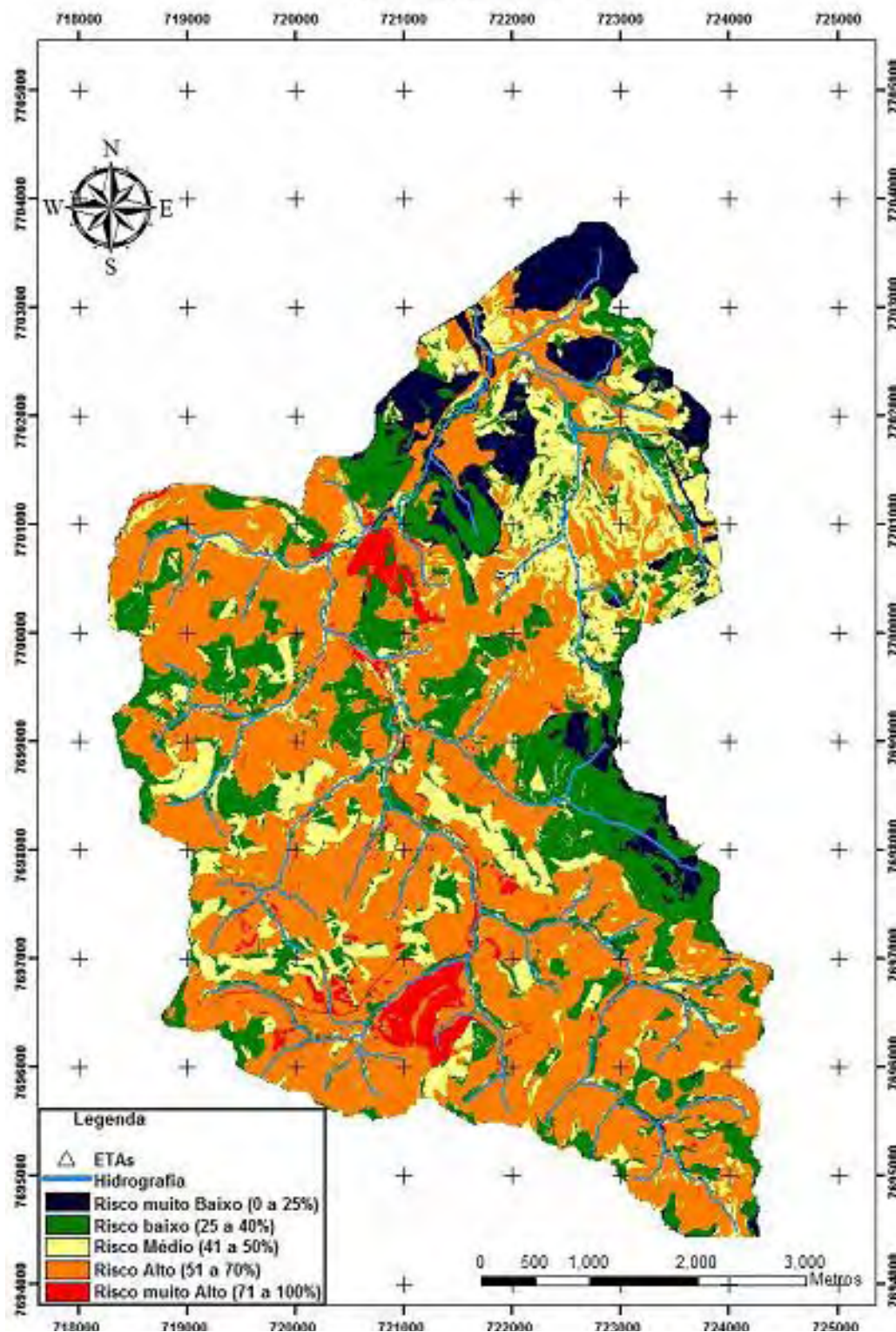


Figura 21. Mapa de fragilidades ambientais da bacia de captação do Ribeirão São Bartolomeu, Viçosa-MG gerado com o emprego análise multicritério.

Fonte: Silva (2010).

Estudo semelhante foi desenvolvido por Lanini, (2006) com o objetivo de avaliar o impacto da qualidade ecológica da bacia hidrográfica no Vale Hérault na França, por meio do uso de rede Bayesiana. A rede foi constituída a partir da definição de três indicadores ecológicos (qualidade da paisagem, o valor ecológico e satisfação dos pescadores). As tabelas foram elaboradas baseadas em avaliações e opiniões de especialistas. As simulações consistiram em mudar os valores dos nós de entrada de acordo com diferentes cenários apresentados na gestão da bacia hidrográfica a fim de serem observadas as variações a *posteriori* dos indicadores ecológicos.

Merritta *et al.* (2010) aplicaram as redes Bayesianas na Austrália visando a auxiliar os gestores na tomada de decisão em sistemas altamente complexos e incertos como são os sistemas ambientais. Os autores concluem que a utilização de rede Bayesiana constitui uma abordagem que pode adicionar rigor e transparência aos processos decisórios. Tal abordagem tem ganho considerável interesse de pesquisadores na Austrália, bem como chamado a atenção do governo e de outras organizações envolvidas na gestão dos recursos hídricos.

4.2. Determinação da probabilidade de ocorrência do nível de contaminação dos perigos associados à zona de captação

4.2.1. Diagnóstico / avaliação da zona de captação

A zona de captação recebe o aporte hídrico de sete sub-bacias monitoradas durante 12 meses, conforme descrito no Item 3.2. O diagnóstico da bacia será feito por sub-bacias, incluindo a zona de captação.

Para determinação da probabilidade de ocorrência do nível de contaminação dos perigos associados à zona de captação, as variáveis (perigos) analisadas foram: i) Concentração de *Escherichia coli*; ii) Concentração de protozoários *Cryptosporidium* spp.; iii) Concentração de cianobactérias; iv) Cianotoxinas; v) Agrotóxicos; vi substâncias químicas orgânicas; vii) Substâncias químicas inorgânicas; e viii) Índice de qualidade de água (IQA).

Quanto à contaminação microbiológica, nas 12 amostras analisadas para *Escherichia coli* (Tabela 13) foram detectados valores abaixo de 1.000 NMP/100 mL.

Assim, a resposta a essa variável *Escherichia coli* foi “não”.

Tabela 13. Concentração de *Escherichia coli* na bacia do Ribeirão São Bartolomeu, novembro de 2007 a outubro de 2008, Viçosa – MG.

Sub-bacias	<i>E. coli</i> (NMP/100 mL) ⁽¹⁾			
	Média	Mínimo	Máximo	Desvio Padrão
Córrego São Lucas (SB 1)	1,22	0,00	6,00	2,44
Córrego dos Machados (SB 2)	0,00	0,00	0,00	0,00
Córrego Santa Catarina (SB 3)	0,78	0,00	7,00	2,33
Córrego Paraíso (SB 4)	0,00	0,00	0,00	0,00
Córrego Palmital (SB 5)	0,00	0,00	0,00	0,00
Córrego Antuérpia (SB 6)	0,67	0,00	6,00	2,00
Córrego do Engenho (SB 7)	3,72	0,00	30,00	9,92
Ribeirão São Bartolomeu (SB 8)	0,89	0,00	6,00	2,03
Zona de captação	6,2 x10 ¹	0,1 x10 ⁻¹	2,42 x10 ³	6,91 x10 ³

NOTA: (1) Média geométrica.

O Córrego Antuérpia apresentou maior valor de oocistos *Cryptosporidium* spp. (24,94), seguido do Córrego Palmital (16,0). Essas sub-bacias apresentam um aporte alto de nutrientes (Tabelas 14 e 15).

O valor encontrado para oocistos *Cryptosporidium* spp. foi de 1,96 cistos L⁻¹ na zona de captação, sendo o valor máximo (12 oocistos L⁻¹) encontrado em período de chuvas, no mês de janeiro (Tabela 14). Dessa forma, apenas a sub-bacia do Córrego Santa Catarina apresentou concentração oocistos *Cryptosporidium* spp abaixo de 3,0 oocistos L⁻¹.

Tabela 14. Estatística descritiva da concentração de *Cryptosporidium* spp. na bacia do Ribeirão São Bartolomeu, novembro de 2007 a outubro de 2008, Viçosa – MG.

Sub-bacias	<i>Cryptosporidium</i> spp. (oocistos L ⁻¹) ⁽¹⁾			
	Média	Mínimo	Máximo	Desvio Padrão
Córrego São Lucas (SB 1)	7,44	0,00	30,00	11,54
Córrego dos Machados (SB 2)	15,67	0,00	58,50	21,58
Córrego Santa Catarina (SB 3)	1,50	0,00	6,00	2,42
Córrego Paraíso (SB 4)	4,72	0,00	22,50	8,20
Córrego Palmital (SB 5)	16,00	0,00	135,00	44,72
Córrego Antuérpia (SB 6)	24,94	0,00	132,00	43,09
Córrego do Engenho (SB 7)	6,67	0,00	60,00	20,00
Ribeirão São Bartolomeu (SB 8)	3,78	0,00	20,00	7,24
Zona de captação	2	0,0	12,0	3,9

NOTA: (1) Média aritmética.

As concentrações encontradas no ponto de captação foram, em geral, mais baixas que nos pontos de amostragem das sub-bacias do Ribeirão São Bartolomeu,

revelando a importante barreira de proteção das represas. Em outros estudos, oocistos *Cryptosporidium* spp. e cistos *Giardia* spp. vêm sendo detectados em toda a bacia do Ribeirão São Bartolomeu, incluindo o ponto de captação em estudo, em densidades relativamente elevadas (BASTOS *et al.*, 2004; BEVILACQUA *et al.*, 2006; BRAGA, 2007; DIAS *et al.*, 2007).

A resposta dessa variável *Cryptosporidium* spp na rede Bayesiana recebeu resposta “sim” para todas as sub-bacias com exceção para as sub-bacias do Córrego Santa Catarina e Ponto de captação.

O resultado do monitoramento de cianobactérias na zona de captação resultou na identificação de 23 gêneros distribuídos entre 11 classes (Tabela 15).

Tabela 15. Caracterização da comunidade fitoplanctônica no ponto de captação para abastecimento da ETA, Viçosa-MG, novembro de 2007 a outubro de 2008

Classe / Gênero	cel. mL ⁻¹											
	2007		2008									
	Nov	Dez	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out
Cyanophyceae												
<i>Phormidium</i>	ND	152	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND
<i>Geitlerinema</i>	ND	153	11	80	ND	ND	ND	ND	78	ND	14	24
<i>Pseudanabaena</i>	ND	ND	248	62	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND
<i>Arthrospira</i>	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	27
Total classe	ND	305	259	142	ND	ND	ND	ND	78	ND	14	51
Chlamydomphyceae												
<i>Chlamydomonas</i>	ND	ND	5	15	6	ND	ND	ND	ND	27	ND	ND
Bacillariophyceae												
<i>Navicula</i>	33	17	4	13	0	2	3	22	ND	118	3	ND
<i>Pinularia</i>	7	21	5	ND	13	2	3	3	ND	24	ND	2
<i>Eunotia</i>	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	11	ND	ND
Total classe	40	38	9	13	13	4	6	25	ND	153	3	2
Chlorophyceae												
<i>Monoraphidium</i>	34	32	36	6	8	5	6	21	9	38	22	2
<i>Scenedesmus</i>	2	5	0	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND
<i>Chlorella</i>	23	30	17	ND	ND	ND	2	28	ND	218	56	ND
<i>Eutetramorus</i>	39	10	9	ND	ND	ND	25	ND	122	24	152	ND
<i>Actinastrum</i>	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND
Total classe	98	77	62	6	8	5	33	49	131	280	230	2
Crysophyceae												
<i>Dinobryon</i>	4	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND
Coccinodiscophyceae												
<i>Cyclotella</i>	12	ND	1	ND	ND	ND	ND	ND	ND	13	5	ND
Cryptophyceae												
<i>Cryptomonas</i>	0	26	70	40	4	0	0	16	0	0	41	4
Euglenophyceae												
<i>Trachelomonas</i>	24	7	10	8	10	ND	1	19	ND	11	3	42
<i>Euglena</i>	11	ND	3	25	11	ND	ND	9	6	3	ND	4
<i>Phacus</i>	15	ND	ND	ND	4	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND
Total classe	50	7	13	33	25	ND	1	28	6	14	3	46
Total fitoplâncton	204	453	419	249	56	9	40	118	215	487	296	105

NOTAS: ND: Não Detectado

Observou-se predomínio da classe *Cyanophyceae* nos meses de temperaturas mais elevadas, notadamente em dezembro, janeiro e fevereiro. Por outro lado, esses organismos praticamente desapareceram nos meses mais frios. Ao todo, foram encontrados quatro gêneros de cianobactérias filamentosas: *Phormidium*, *Pseudanabaena*, *Geitlerinema* e *Arthrospira*, sendo que os dois primeiros apresentam registros de espécies tóxicas. Foram encontrados organismos reconhecidamente responsáveis por problemas de gosto e odor na água (por exemplo, os gêneros *Phormidium*, *Pseudanabaena*, *Chlamydomonas*, *Dinobryon*, *Cyclotella*, *Fragilaria*, *Cryptomonas*, *Euglena* e *Cosmarium*) e pela colmatação de filtros (por exemplo, organismos do gênero *Geitlerinema* e da classe *Bacillariophyceae*). Em resumo, foram encontradas baixas densidades de microalgas e de cianobactérias, no caso destas abaixo do limite crítico (ou de alerta) estabelecido na norma brasileira de potabilidade da água.

A baixa densidade de cianobactérias naturalmente se fez refletir na não detecção de cianotoxinas, sendo comprovada por meio das análises a ausência das cianotoxinas dos gêneros (microcistina e cilindrospermopsina). Dessa forma, as variáveis cianobactérias e cianotoxinas apresentaram concentração e valores, respectivamente, abaixo do limite estabelecido. Assim, na rede Bayesiana a resposta foi “*não*” para essas variáveis.

No monitoramento realizado nas sub-bacias do Ribeirão São Bartolomeu, não foram identificados perigos decorrentes da presença de agrotóxicos, já que essas substâncias permaneceram abaixo dos limites detectáveis, ou presentes apenas em concentrações-traço durante todo o período de monitoramento. Na rede, a variável agrotóxico recebeu a resposta “*não*”.

Durante o monitoramento não, foi detectada presença de substâncias químicas orgânicas. Quanto às substâncias orgânicas, o parâmetro chumbo foi detectado em concentrações acima dos valores máximos permitidos ($0,01 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$) pelo padrão de potabilidade e pela Resolução CONAMA n.º 357/2005. Entretanto, com base no conhecimento do uso e ocupação do solo na bacia do São Bartolomeu, questionou-se a presença de fontes de chumbo. Levantada a hipótese de eventuais erros analíticos, novas amostras foram coletadas e os resultados não mais revelaram a presença de chumbo. A variável substâncias químicas orgânicas recebeu a resposta “*não*”.

Em três amostras, em diferentes sub-bacias, foram detectados teores de ferro de 0,33 - 0,65 mg L⁻¹, acima, portanto, do limite do padrão de potabilidade (0,3 mg L⁻¹), porém a concentração média de Fe, considerando todos os eventos e pontos de amostragem, foi de 0,087 ± 0,1 mg L⁻¹. Assim como para o Fe, os dados de Mn revelaram amplas variações, mas os valores médios gerais foram inferiores ou próximos ao limite do padrão de potabilidade (0,1 mg L⁻¹). Essa variável não foi avaliada na rede, pois não é considerada substância de risco à saúde.

Para a determinação do Índice de Qualidade de Água Bruta (IQA), foram utilizados os nove parâmetros incorporados ao método (DBO, OD, coliformes termotolerante, nitrogênio total, fósforo total, resíduo total, pH, temperatura e turbidez). De acordo com o IQA, a qualidade da água foi classificada, no geral, como boa. A Tabela 16 apresenta os valores encontrados por sub-bacia.

Tabela 16. Índice de qualidade da água na bacia do Ribeirão São Bartolomeu, novembro de 2007 a outubro de 2008, Viçosa – MG.

Sub-bacias	Índice de Qualidade da Água (IQA)	
	Valor	Classificação
Córrego São Lucas (SB 1)	48,33	RAZOÁVEL
Córrego dos Machados (SB 2)	57,29	BOA
Córrego Santa Catarina (SB 3)	47,34	RAZOÁVEL
Córrego Paraíso (SB 4)	57,48	BOA
Córrego Palmital (SB 5)	36,25	RAZOÁVEL
Córrego Antuérpia (SB 6)	63,94	BOA
Córrego do Engenho (SB 7)	39,12	RAZOÁVEL
Ribeirão São Bartolomeu (SB 8)	56,51	BOA
Zona de captação	59,0	BOA

De acordo com os dados expressos na Tabela 16, as sub-bacias Machado, Paraíso, Antuérpia, Ribeirão São Bartolomeu e Captação abrigam as menores fontes de poluentes (cargas orgânicas e de nutrientes) da bacia, sendo classificadas como “boas”; em contrapartida, as demais sub-bacias foram classificadas como regulares. Essas sub-bacias contribuem com cargas mais elevadas, devidas, principalmente, à existência de lançamento de esgoto e presença de suinoculturas e caprinoculturas.

4.2.2. Rede Bayesiana nas sub-bacias do Ribeirão São Bartolomeu e zona de captação

A construção da rede Bayesiana para determinar a probabilidade de ocorrência do nível de contaminação dos perigos associados às sub-bacias do Ribeirão São Bartolomeu e à zona de captação seguiu os passos preconizados no item 3.3.1. As distribuições de probabilidades *a priori* foram obtidas a partir das informações estabelecidas em estudos técnico-científicos e legislações. No Anexo 4, encontram-se as tabelas de probabilidades utilizadas na construção da rede nas sub-bacias e zona de captação.

Por exemplo, para variável *Escherichia coli*, foi estabelecido, para concentração acima de 1.000/100mL, valor da probabilidade condicional 1 e 0 para valores abaixo de 1.000/100mL. Os passos para criação da rede Bayesiana nas sub-bacias e zona de captação seguiram os mesmos procedimentos adotados no Item 4.1.2. A determinação da probabilidade *a posteriori* foi obtida a partir das informações coletadas no campo, conforme diagnóstico / avaliação da bacia hidrográfica e zona de captação realizado no item 4.2.1. Os resultados obtidos por meio do monitoramento nas sub-bacias e zona de captação, Tabelas 17 e 18, respectivamente, permitiram responder às variáveis estabelecidas na rede Bayesiana.

Tabela 17. Resultados obtidos a partir do monitoramento realizado nas sub-bacias do Ribeirão São Bartolomeu, Viçosa-MG

Sub-bacias	Variáveis (perigos)	Atributos
Córrego São Lucas (SB 1)	Concentração de <i>E. coli</i> acima de 1.000/100mL	Sim Não
	Concentração de protozoários <i>Cryptosporidium</i> spp. acima de 3 oocistos/L	Sim Não
	Agrotóxicos ⁽¹⁾ acima do Valor Máximo Permitido (VMP)	Sim Não
	Substâncias químicas orgânicas ⁽²⁾ acima do Valor Máximo Permitido (VMP)	Sim Não
	Substâncias químicas inorgânicas ⁽³⁾ acima do Valor Máximo Permitido (VMP)	Sim Não
	Índice de qualidade de água (IQA)	Ótima a Boa (52 < IQA ≤ 100) Razoável = (37 < IQA ≤ 51) Ruim a Péssima (≤ 36)
	Córrego dos Machados (SB 2)	Concentração de <i>E. coli</i> acima de 1.000/100mL
Concentração de protozoários <i>Cryptosporidium</i> spp. acima de 3 oocistos/L		Sim Não
Agrotóxicos ⁽¹⁾ acima do Valor Máximo Permitido (VMP)		Sim Não
Substâncias químicas orgânicas ⁽²⁾ acima do Valor Máximo Permitido (VMP)		Sim Não
Substâncias químicas inorgânicas ⁽³⁾ acima do Valor Máximo Permitido (VMP)		Sim Não
Índice de qualidade de água (IQA)		Ótima a Boa (52 < IQA ≤ 100) Razoável = (37 < IQA ≤ 51) Ruim a Péssima (≤ 36)
Córrego Santa Catarina (SB 3)		Concentração de <i>E. coli</i> acima de 1.000/100mL
	Concentração de protozoários <i>Cryptosporidium</i> spp. acima de 3 oocistos/L	Sim Não
	Agrotóxicos ⁽¹⁾ acima do Valor Máximo Permitido (VMP)	Sim Não
	Substâncias químicas orgânicas ⁽²⁾ acima do Valor Máximo Permitido (VMP)	Sim Não
	Substâncias químicas inorgânicas ⁽³⁾ acima do Valor Máximo Permitido (VMP)	Sim Não
	Índice de qualidade de água (IQA)	Ótima a Boa (52 < IQA ≤ 100) Razoável = (37 < IQA ≤ 51) Ruim a Péssima (≤ 36)
	Córrego Paraíso (SB 4)	Concentração de <i>E. coli</i> acima de 1.000/100mL
Concentração de protozoários <i>Cryptosporidium</i> spp. acima de 3 oocistos/L		Sim Não
Agrotóxicos ⁽¹⁾ acima do Valor Máximo Permitido (VMP)		Sim Não
Substâncias químicas orgânicas ⁽²⁾ acima do Valor Máximo Permitido (VMP)		Sim Não
Substâncias químicas inorgânicas ⁽³⁾ acima do Valor Máximo Permitido (VMP)		Sim Não
Índice de qualidade de água (IQA)		Ótima a Boa (52 < IQA ≤ 100) Razoável = (37 < IQA ≤ 51) Ruim a Péssima (≤ 36)
Córrego Palmital (SB 5)		Concentração de <i>E. coli</i> acima de 1.000/100mL

Sub-bacias	Variáveis (perigos)	Atributos
	Concentração de protozoários <i>Cryptosporidium</i> spp. acima de 3 oocistos/L	Sim Não
	Agrotóxicos ⁽¹⁾ acima do Valor Máximo Permitido (VMP)	Sim Não
	Substâncias químicas orgânicas ⁽²⁾ acima do VMP	Sim Não
	Substâncias químicas inorgânicas ⁽³⁾ acima do VMP	Sim Não
	Índice de qualidade de água (IQA)	Ótima a Boa (52 < IQA ≤ 100) Razoável = (37 < IQA ≤ 51) Ruim a Péssima (≤ 36)
	Córrego Antuérpia (SB 6)	Concentração de <i>E. coli</i> acima de 1.000/100mL
Concentração de protozoários <i>Cryptosporidium</i> spp. acima de 3 oocistos/L		Sim Não
Agrotóxicos ⁽¹⁾ acima do Valor Máximo Permitido (VMP)		Sim Não
Substâncias químicas orgânicas ⁽²⁾ acima do VMP		Sim Não
Substâncias químicas inorgânicas ⁽³⁾ acima do VMP		Sim Não
Índice de qualidade de água (IQA)		Ótima a Boa (52 < IQA ≤ 100) Razoável = (37 < IQA ≤ 51) Ruim a Péssima (≤ 36)
Córrego do Engenho (SB 7)	Concentração de <i>E. coli</i> acima de 1.000/100mL	Sim Não
	Concentração de protozoários <i>Cryptosporidium</i> spp. acima de 3 oocistos/L	Sim Não
	Agrotóxicos ⁽¹⁾ acima do VMP	Sim Não
	Substâncias químicas orgânicas ⁽²⁾ acima do VMP	Sim Não
	Substâncias químicas inorgânicas ⁽³⁾ acima do VMP	Sim Não
	Índice de qualidade de água (IQA)	Ótima a Boa (52 < IQA ≤ 100) Razoável = (37 < IQA ≤ 51) Ruim a Péssima (≤ 36)
Ribeirão São Bartolomeu (SB 8)	Concentração de <i>E. coli</i> acima de 1.000/100mL	Sim Não
	Concentração de protozoários <i>Cryptosporidium</i> spp. acima de 3 oocistos/L	Sim Não
	Agrotóxicos ⁽¹⁾ acima do VMP	Sim Não
	Substâncias químicas orgânicas ⁽²⁾ acima do VMP	Sim Não
	Substâncias químicas inorgânicas ⁽³⁾ acima do VMP	Sim Não
	Índice de qualidade de água (IQA)	Ótima a Boa (52 < IQA ≤ 100) Razoável = (37 < IQA ≤ 51) Ruim a Péssima (≤ 36)

NOTAS: (1) Listas dos agrotóxicos estabelecidas pela Portaria de Potabilidade do Ministério da Saúde
(2 e 3) Listas das substâncias químicas orgânicas e inorgânicas estabelecidas pela Portaria de Potabilidade do Ministério da Saúde.

Tabela 18. Resultados obtidos a partir do monitoramento realizado na zona de captação do Ribeirão São Bartolomeu, Viçosa-MG

Sub-bacias	Variáveis (perigos)	Atributos
Córrego São Lucas (SB 1)	Concentração de <i>E. coli</i> acima de 1.000/100mL	Sim Não
	Concentração de protozoários <i>Cryptosporidium</i> spp. acima de 3 oocistos/L	Sim Não
	Concentração de cianobactérias acima de 20.00 células/mL	Sim Não
	Cianotoxinas acima do VMP	Sim Não
	Agrotóxicos ⁽¹⁾ acima do VMP	Sim Não
	Substâncias químicas orgânicas ⁽²⁾ acima VMP	Sim Não
	Substâncias químicas inorgânicas ⁽³⁾ acima do VMP	Sim Não
	Índice de qualidade de água (IQA)	Ótima a Boa (52 < IQA ≤ 100) Razoável = (37 < IQA ≤ 51) Ruim a Péssima (≤ 36)

NOTAS: (1) Listas dos agrotóxicos estabelecidas pela Portaria de Potabilidade do Ministério da Saúde (2 e 3) Listas das substâncias químicas orgânicas e inorgânicas estabelecidas pela Portaria de Potabilidade do Ministério da Saúde.

Na aplicação da rede Bayesiana às sub-bacias, foram considerados apenas o Índice da Qualidade da Água (IQA) e os parâmetros microbiológicos, uma vez que os resultados dos parâmetros referentes às substâncias químicas orgânicas e inorgânicas e ao grupo dos agrotóxicos não foram detectados no período do monitoramento.

O resultado da aplicação do modelo de classificação Bayesiana nas sub-bacias do Ribeirão São Bartolomeu apresentou nível de contaminação “alto” para todas as sub-bacias, exceto para a sub-bacia do Córrego Santa Catarina (Tabela 19).

Tabela 19. Resultado da aplicação da rede Bayesiana nas sub-bacias do Ribeirão São Bartolomeu, Viçosa – MG

Sub-bacias	Probabilidade do nível de contaminação da qualidade da água	
	Valor (%)	Nível de classificação do perigo
Córrego São Lucas (SB 1)	90	Alto
Córrego dos Machados (SB 2)	90	Alto
Córrego Santa Catarina (SB 3)	70	Baixo
Córrego Paraíso (SB 4)	90	Alto
Córrego Palmital (SB 5)	90	Alto
Córrego Antuérpia (SB 6)	90	Alto
Córrego do Engenho (SB 7)	90	Alto
Ribeirão São Bartolomeu (SB 8)	90	Alto

Os resultados obtidos na rede Bayesiana são coerentes com a pesquisa de oocistos de *Cryptosporidium* nas amostras segundo as sub-bacias (Tabela 14). As sub-bacias pesquisadas, em alguma época do ano, apresentaram contaminação com (oo)cistos de protozoários, confirmando sua contribuição para a contaminação da água do Ribeirão São Bartolomeu, que recebe todo o aporte hídrico desses cursos d'água. Constata-se uma maior densidade de suínos na bacia hidrográfica em estudo, embora a maior proporção de propriedades localizadas nessa área apresente animais da espécie bovina.

A sub-bacia referente ao Córrego Antuérpia apresentou altas concentrações de protozoários (24,94 oocistos/L) quando comparada às demais sub-bacias (Tabela 19). É relevante salientar que, embora apenas 7,5% das propriedades estejam localizadas nessa área, estão presentes uma caprinocultura e uma suinocultura, caracterizando a sub-bacia com a maior densidade de animais (bovinos, suínos e caprinos). Ambas as propriedades citadas não promovem tratamento dos dejetos animais. Esse fato indica as propriedades citadas como potenciais fontes de contaminação da água.

A sub-bacia referente ao Córrego Santa Catarina foi a que apresentou menor nível de contaminação (Tabela 19). Nessa sub-bacia, existe uma área de preservação ambiental de responsabilidade da Universidade Federal de Viçosa, o que justifica o reduzido percentual de propriedades com exploração animal na área (2,5%) e confirma a necessidade de medidas de preservação das áreas de bacias hidrográficas utilizadas como mananciais de abastecimento de forma a garantir a qualidade parasitológica da água.

Estudo de Dias (2007) sobre a dinâmica de (oo)cistos de *Giardia* spp. e de *Cryptosporidium* spp. na bacia hidrográfica do Ribeirão São Bartolomeu também obteve resultados com elevadas concentrações de protozoários na água bruta em todos os períodos estudados (médias aritméticas de 20,2 e 15,3 (oo)cistos/L para *Giardia* e *Cryptosporidium*, respectivamente).

As sub-bacias com nível de contaminação alto se destacaram por apresentar maior contaminação ao longo do período estudado, decorrente do uso intenso por pecuária, expansão urbana, pastagem degradada, acesso de animal nos mananciais e declividade acima de 45% ser intensa, conforme resultado do nível de impacto alto (78,53%) obtido pela rede Bayesiana expresso na Figura 20. Esse fato permite

inferir que a exploração animal na área da bacia hidrográfica em estudo sem tratamento adequado dos dejetos bem como a ausência de tratamento de esgoto contribuem para a deterioração da qualidade do manancial superficial de abastecimento de água para consumo humano.

Nesse sentido, a ausência de cuidados específicos que visem à proteção da bacia do manancial de abastecimento de água para consumo humano pode implicar risco de transmissão de doenças às populações consumidoras.

A rede Bayesiana na zona de captação de água foi construída de forma separada para os parâmetros *E. Coli*, *Cryptosporidium* spp. e Índice da Qualidade da Água - IQA, cianobactérias, cianotoxinas e substâncias químicas orgânicas e inorgânicas e agrotóxicos, conforme mostra a representação gráfica dos nós e arcos (Figura 22).

A Figura 23 apresenta os resultados da distribuição de probabilidade *a priori* determinada com base nas normas e diretrizes da qualidade da água para consumo humano e, a partir do resultado obtido com o monitoramento realizado na zona de captação, obteve-se a probabilidade *a posteriori*.

O resultado da aplicação do modelo de classificação Bayesiana na zona de captação apresentou probabilidade “alta” (90%) para o nível de contaminação microbiológico e baixa para (70% e 99%) para os níveis de contaminações biológicos e químicos, respectivamente.

Apesar de os resultados apresentarem contaminação acima de 3 *oocistos*/L de *Cryptosporidium* spp. nas sub-bacias do Ribeirão São Bartolomeu contribuinte à zona de captação, o mesma situação não ocorreu de forma contínua em todos os meses monitorados.

O resultado obtido da contaminação microbiológica nas 12 amostras analisadas mostrou que as médias de *oocistos* de *Cryptosporidium* spp. e de cistos *Giardia* spp. foram, respectivamente, de 2 *oocistos* L⁻¹ e de 0,3 cistos L⁻¹, sendo o valores máximos de 12 *oocistos* L⁻¹ e de 2,5 cistos L⁻¹ encontrados em período de chuvas, no mês de janeiro de 2008 (Tabela 14). As concentrações encontradas no ponto de captação foram, em geral, mais baixas que nos pontos de amostragem das sub-bacias do Ribeirão São Bartolomeu, revelando a importante barreira de proteção das represas. Em outros estudos, *oocistos* de *Cryptosporidium* ssp. e cistos de *Giardia* ssp. vêm sendo detectados em toda a bacia do SB, incluindo o ponto de captação em estudo, em densidades relativamente elevadas (BASTOS *et al.*, 2004;

BEVILACQUA *et al.*, 2006; BRAGA, 2007; DIAS *et al.*, 2007).

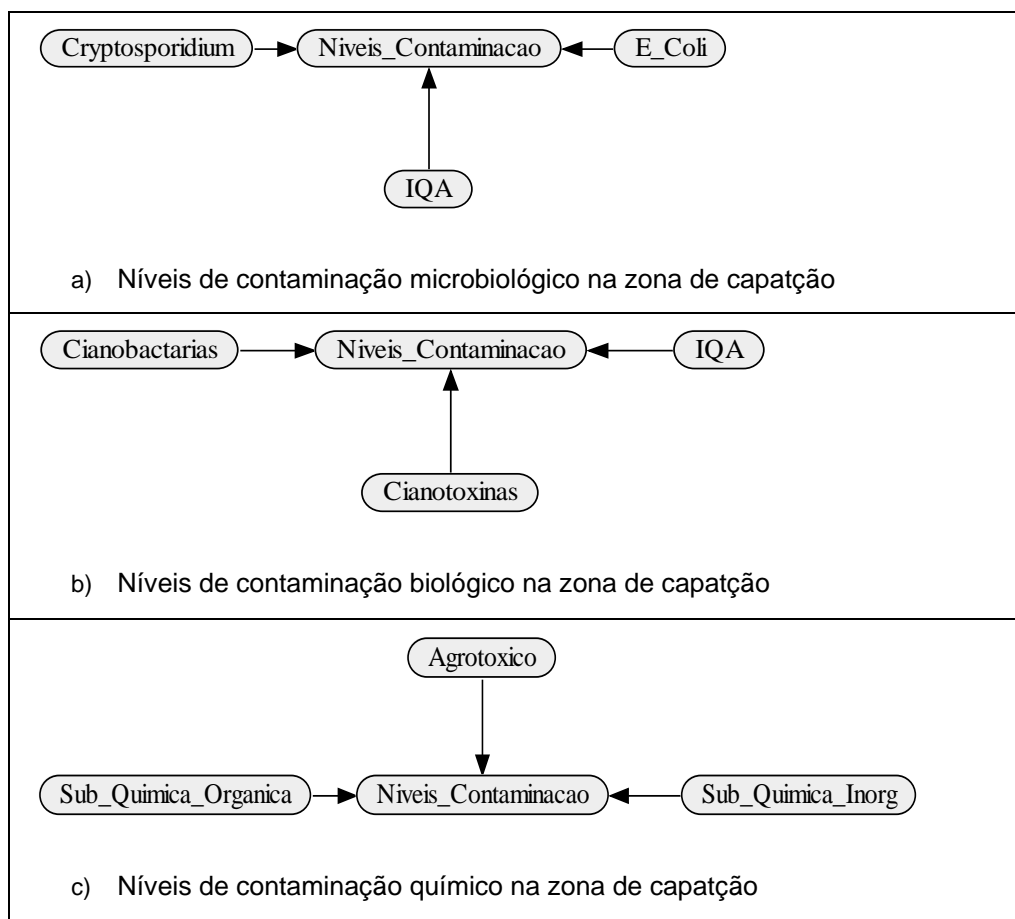
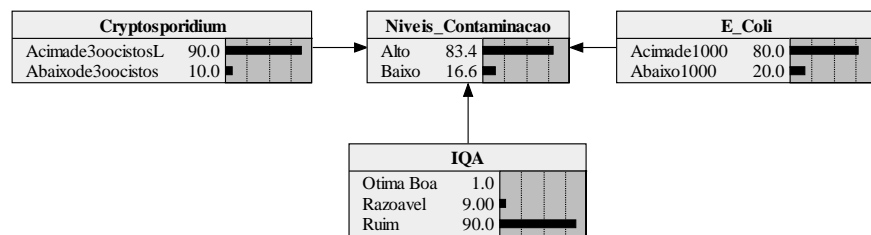
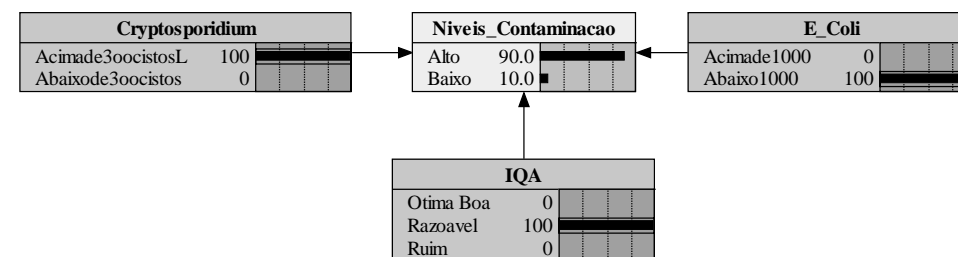


Figura 22. Representação gráfica dos nós e arcs que compõem uma rede Bayesiana para a zona de captação

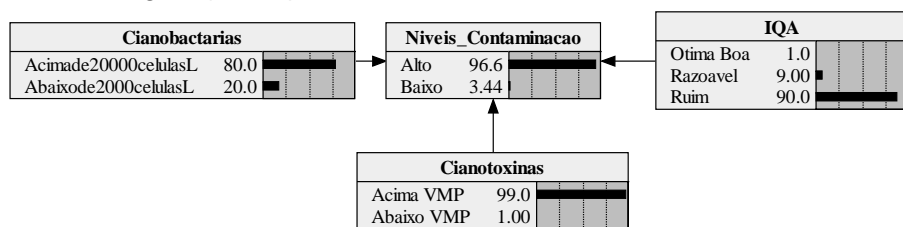
Fonte: *software* UnBBayes.



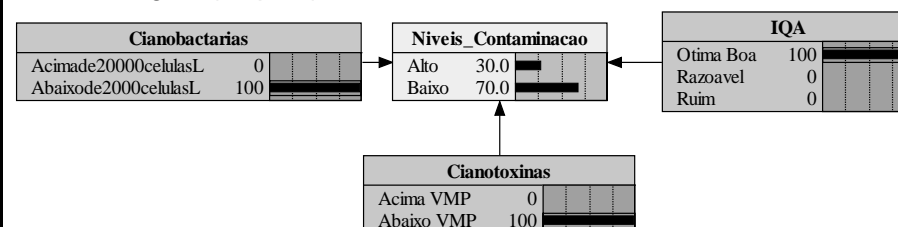
a. Probabilidade a priori para os níveis de contaminação microbiológica (Antes)



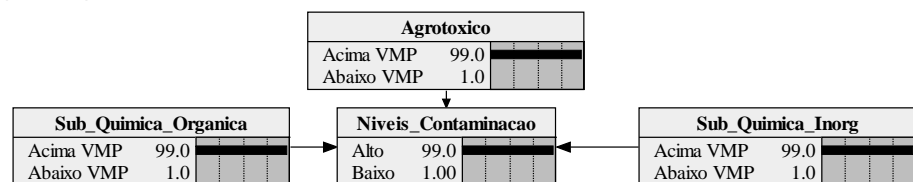
b. Probabilidade a posteriori para os níveis de contaminação microbiológica (Depois)



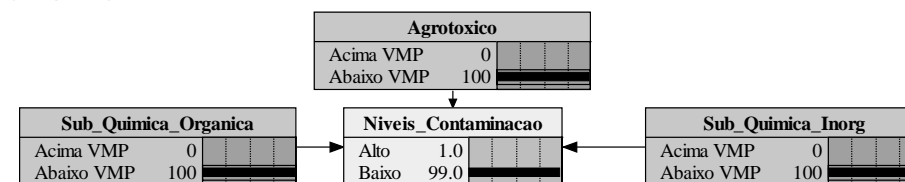
c. Probabilidade a priori para os níveis de contaminação biológica (Antes)



d. Probabilidade a posteriori para os níveis de contaminação biológica (Depois)



e. Probabilidade a priori para os níveis de contaminação química (Antes)



f. Probabilidade a posteriori para os níveis de contaminação química (Depois)

Figura 23: Resultado da aplicação da rede Bayesiana na zona de captação do Ribeirão São Bartolomeu

Fonte: software UnBBayes.

De acordo com a concentração média anual de 2 oocistos L⁻¹ na água bruta, Tabela 16, e a técnica de filtração (filtração direta), seria necessária a remoção de 2,5 log de oocistos na ETAI / SAAE para fins de atendimento de nível de risco de 1,00 x 10⁻⁴, o que é plenamente possível, mas requer cuidados operacionais.

No entanto, se considerarmos a qualidade da água na zona de captação no pior mês de monitoramento para *Cryptosporidium* spp. (12 oocisto/L), a eficiência de remoção máxima para o tratamento em ciclo completo é de 3,0 log. Considerando um consumo diário de água de 2,0 L, esse valor corresponde a um risco de infecção anual de 1,75 x 10⁻², acima do recomendado pela OMS, que é de 1,00 x 10⁻⁴.

Quanto ao nível de contaminação por cianobactérias, o resultado foi coerente com o monitoramento que detectou baixas densidades de microalgas e de cianobactérias, ou seja, abaixo de 20.000 células/mL, estabelecido nas normas brasileiras e, conseqüentemente, não detecção de cianotoxinas (microcistina e cilindrospermopsina).

Conforme dados monitorados no período de um ano, os resultados apontaram que as sub-bacias recebem um grande aporte significativo de carga orgânica (Tabela 20), o que pode se elevar, principalmente, no período de estiagem.

Tabela 20. Aporte de cargas poluente, bacia do Ribeirão São Bartolomeu, novembro de 2007 a outubro de 2008, Viçosa – MG

Sub-bacias	Carga (kg.d)			
	DQO	SST	Fósforo	N-NTK
Córrego São Lucas (SB 1)	145,5	0,29	1,71	25,0
Córrego dos Machados (SB 2)	7,5	0,01	0,07	0,7
Córrego Santa Catarina (SB 3)	6,4	0,01	0,03	0,4
Córrego Paraíso (SB 4)	4,2	0,01	0,03	0,4
Córrego Palmital (SB 5)	10,8	0,02	0,05	0,5
Córrego Antuérpia (SB 6)	23,7	0,05	0,11	2,3
Córrego do Engenho (SB 7)	10,5	0,04	0,17	0,6
Ribeirão São Bartolomeu (SB 8)	13,7	0,04	0,26	1,8

De forma análoga, não foram identificados perigos decorrentes da presença de substâncias químicas (orgânicas e inorgânicas) e agrotóxicos, já que essas substâncias permaneceram abaixo dos valores máximos permitidos durante todo o período de monitoramento. Os resultados encontrados na zona de captação foram classificados de perigosos não significativos, sem interferência direta na qualidade da água e do tratamento.

4.3. Descrição e identificação dos pontos críticos de controle na estação de tratamento de água

4.3.1. Diagnóstico / avaliação da estação de tratamento de água (ETAI/SAAE)

Conforme descrito na metodologia, a determinação de Pontos Críticos de Controle (PCC) na ETA foi realizada mediante o emprego da Árvore de Decisão do sistema APPCC, Figura 13, adaptada de WHO (1997) e Vieira e Moraes (2005). A Estação de Tratamento de Água ETAI / SAAE opera em ciclo completo, incluindo-se as etapas de mistura rápida (*calha Parshall*), floculação (hidráulica), decantação, filtração, desinfecção.

Para responder às questões apresentadas na árvore de decisão foi realizado um diagnóstico da avaliação da capacidade real de remoção e, ou redução dos perigos encontrados na zona de captação. Dessa forma, para a identificação dos eventos perigosos, foi feito um levantamento das informações no sistema, Anexo 5, em cada etapa do tratamento (Adução, Mistura Rápida, Coagulação, Floculação, Decantação, Filtração e Fluoretação).

(ii) Mistura rápida e coagulação

A água bruta é inicialmente introduzida na calha Parshall onde se dá a medição de vazão e na saída da qual se adiciona sulfato de alumínio líquido como coagulante (em local de intensa agitação da água para a melhor homogeneização do coagulante). A dose de coagulante deve ser ajustada às variações de qualidade da água bruta e ser determinada por ensaios de jarros (*jar test*). De acordo com as medidas, o gradiente de velocidade na saída da calha Parshall é de 150 s^{-1} , bem abaixo do recomendado.

Quanto ao ponto e à forma de aplicação do coagulante, ela é feita de forma adequada, ou seja, no ponto de “maior gradiente de velocidade” e com dispositivo para a melhor distribuição do coagulante na massa líquida. A dosagem é feita por meio de uma bomba dosadora.

(ii) Floculação

O ensaio com traçador, feito após a limpeza do floculador e sob a vazão de 100 L.s^{-1} , demonstrou o predomínio de fluxo em pistão, no entanto, com diferença

considerável entre os tempos de detenção hidráulica teórico e o real (Tabela 21).

Tabela 21. Características hidráulicas do floculador

Q(L.s ⁻¹)	TDH (min.)	teórico	TDH real (min.)	Fluxo	
				Pistão	Mistura completa
100	30		24,5	69%	31%

O levantamento do perfil hidráulico do floculador e, por conseguinte, o cômputo das perdas de carga, permitiu a determinação dos gradientes de velocidade em cada câmara, à exceção da primeira, por dificuldades práticas (Tabela 22).

Tabela 22. Gradientes de velocidade nas câmaras de floculação

Câmara	Gradientes de velocidade (s ⁻¹)	
	80 L.s ⁻¹	100 L.s ⁻¹
2	38.51	46.89
3	38.51	49.68
4	35.30	46.06
5	26.12	40.25
6	28.30	37.26
7	27.85	36.48
8	24.91	34.19
9	25.52	35.92
10	17.74	31.97
11	25.70	36.74
12	14.84	36.74
13	31.23	37.29

Os levantamentos de campo revelaram que os gradientes de velocidade nas câmaras de floculação variam de forma decrescente, entre 53 a 35 s⁻¹; revelaram também que os gradientes das passagens estão abaixo dos valores encontrados na câmara anterior, o que é recomendado.

A norma brasileira de projetos de estações de tratamento de água (NBR 12216) preconiza que não deve ocorrer elevação do gradiente de velocidade entre duas câmaras consecutivas e que os gradientes devem ser decrescentes, na faixa de 70-10 s⁻¹. A aferição dos gradientes nas câmaras de floculação não revelou valores excessivos, mas, em contrapartida, valores aparentemente baixos nas primeiras câmaras. Em geral, os gradientes de velocidade decrescem ao longo do floculador, mas voltam a crescer mais ao final da unidade. Presume-se que haja falhas construtivas em algumas câmaras da unidade.

(iii) Decantação

Segundo a NBR 122116, estações de tratamento com vazão entre 1.000 e 10.000 $\text{m}^3.\text{d}^{-1}$ não devem apresentar taxa de aplicação superficial superior a $35 \text{ m}^3.\text{m}^{-2}.\text{dia}^{-1}$. Isso limitaria a operação do decantador da ETA em questão a $8.075 \text{ m}^3.\text{m}^{-2}.\text{d}^{-1}$, ou $93,5 \text{ L.s}^{-1}$. Porém, a ETA opera por vezes com $93,5 \text{ L.s}^{-1}$. De toda forma, a discrepância não é tão larga a ponto de caracterizar grande sobrecarga.

O ensaio com traçador, feito após a limpeza do floculador e sob a vazão de 100 L.s^{-1} , revelou grande proximidade entre as frações de fluxo em pistão e em mistura completa, o que pode indicar deficiência na distribuição da água floculada ou na coleta da água decantada. Percebeu-se ainda que o tempo de detenção real da unidade esteve muito abaixo do tempo de detenção teórico, o que favorece a ocorrência de zonas mortas em uma fração de 10% (Tabela 23).

Tabela 23. Características hidráulicas do decantador

Q(L.s ⁻¹)	TDH (min.)	teórico	TDH real (min.)	Fluxo	
				Pistão	M. C.
100	30		24,5	57%	43%

Em que pesem algumas deficiências de funcionamento hidráulico, a decantação promove remoção eficiente de turbidez. Em 75 % dos dados horários medidos entre 2006 e 2008, a turbidez da água decantada esteve abaixo de 7,6 uT, em muito devido à já baixa turbidez da água bruta, mas também ao bom desempenho da unidade de decantação (Figura 24).

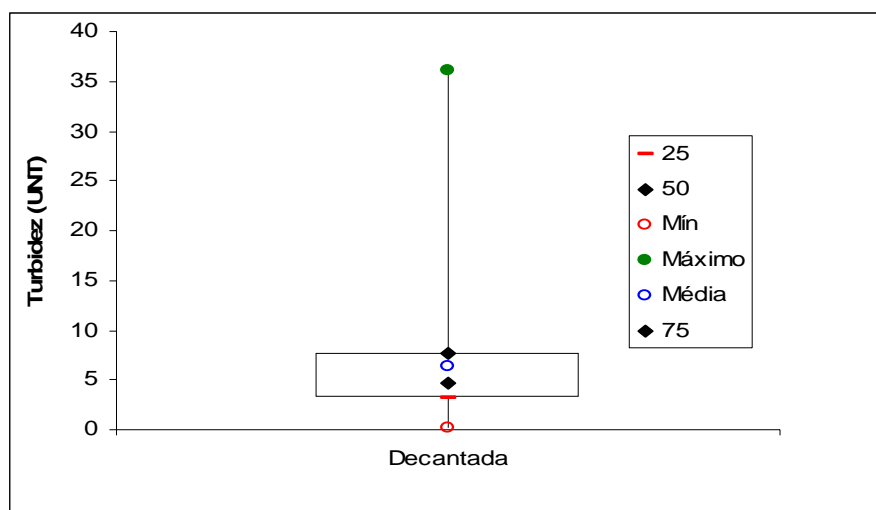


Figura 24. Distribuição de frequência dos dados horários de turbidez da água

decantada, 2006 a 2008

Analisando o desempenho dos filtros em relação à qualidade da água decantada, nota-se que, em pelo menos 75% dos dados para os quais a turbidez filtrada se manteve abaixo de 0,5 uT, padrão de potabilidade brasileiro vigente, a turbidez da água decantada esteve abaixo de 7,6 uT (Figura 25). Sugere-se adotar 8 uT, turbidez da água decantada, como valor limite para o desempenho dos filtros.

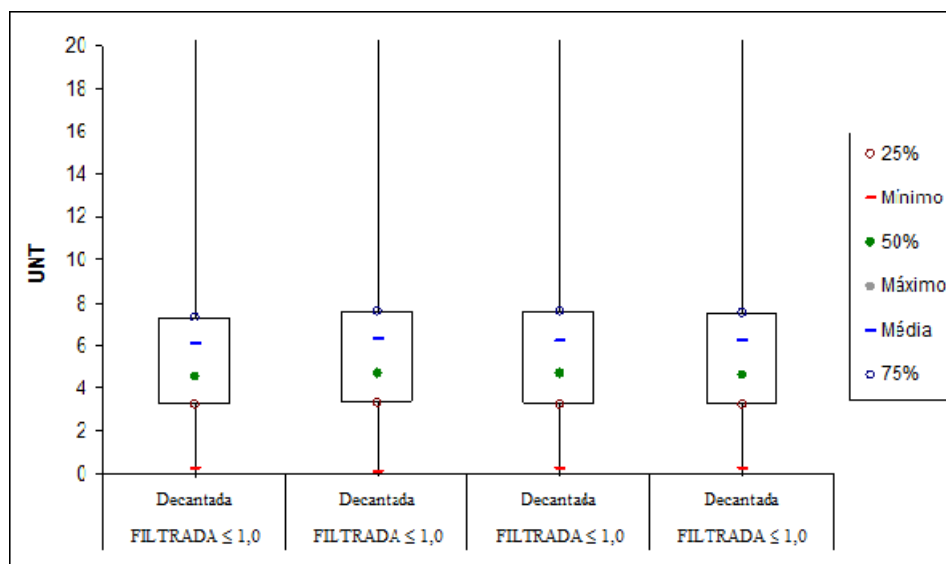


Figura 25. Distribuição de frequência dos dados horários de turbidez das águas decantada e filtrada, 2006 a 2008

(iv) Filtração

A NBR 12216 recomenda taxa de filtração de $120 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$ para filtros ascendentes, o que limitaria a operação da ETA em questão, com vazão de $81 \text{ L} \cdot \text{s}^{-1}$. Não obstante, o histórico dos dados de monitoramento da ETA de 2004 a 2008 aponta, em geral, bom desempenho dos filtros: em 90% dos dados analisados a turbidez esteve abaixo de 0,5 uT, indicador de remoção efetiva de cistos de *Giardia*; em 75%, abaixo de 0,3 uT, indicador de remoção efetiva de oocistos de *Cryptosporidium*; e em 99% do tempo a turbidez filtrada não ultrapassou o valor de 1 uT, padrão de potabilidade brasileiro vigente (Figuras 26 e 27).

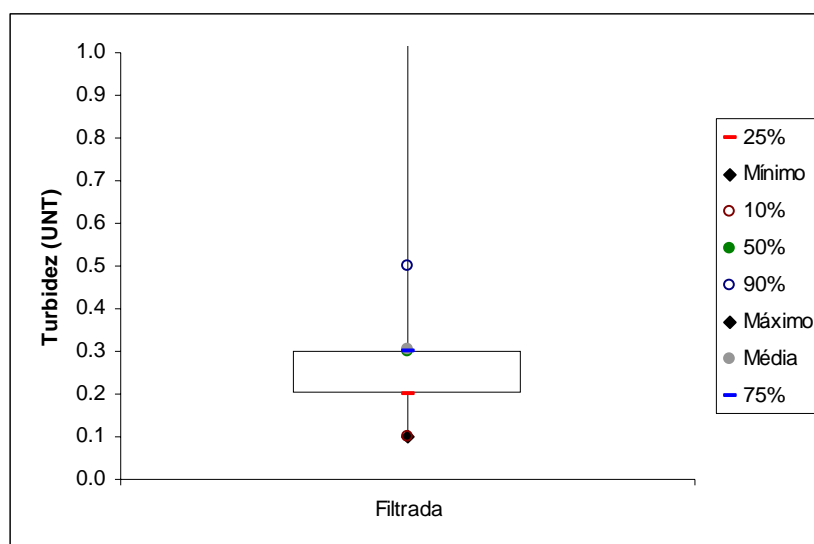


Figura 26. Distribuição de frequência dos dados horários de turbidez da água filtrada, 2004 a 2008

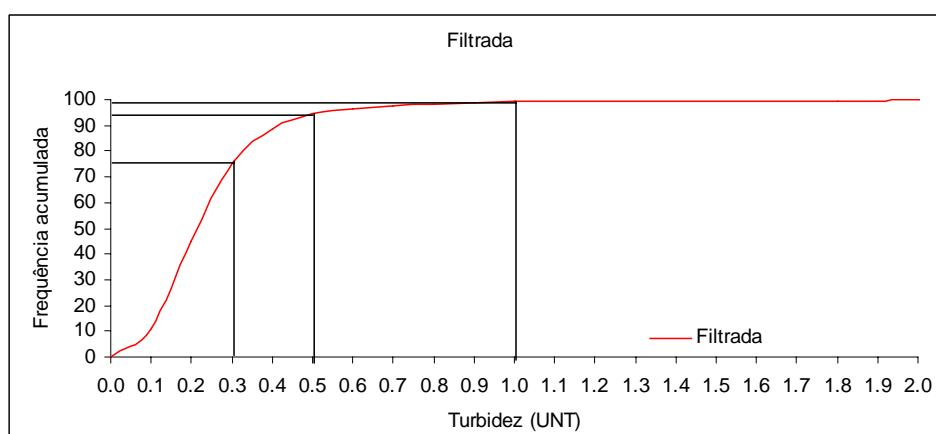


Figura 27. Frequência acumulada dos dados horários de turbidez da água filtrada, 2004 a 2008

A Figura 28 apresenta a distribuição de frequência dos dados horários de água bruta para os quais a turbidez da filtrada foi inferior e superior a 0,3 0,5; e 1,0 uT. Apenas quando se considera o limite de 1 uT se consegue notar relação mais nítida entre o incremento da turbidez da água bruta e o da água filtrada. Em 75% dos dados em que se alcançou turbidez da água filtrada inferior a 1 uT, a água bruta apresentava turbidez abaixo de 18,9 uT.

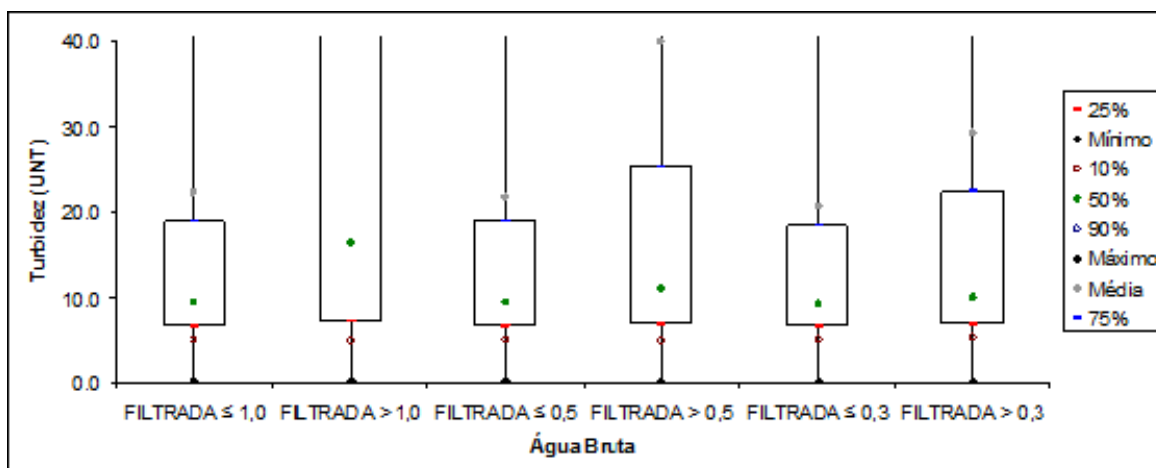


Figura 28. Distribuição de frequência dos dados horários de turbidez da água bruta para os eventos nos quais a água filtrada apresentou turbidez inferior e superior a 1,0; 0,5; e 0,3 UT, 2004 a 2008

A análise em separado do efluente de cada filtro indicou variações importantes, sendo que o Filtro 1 apresentou o pior desempenho, Figura 29, não tendo sido raros os eventos em que a turbidez superou o padrão de 1 uT, superior a 15% dos dados, enquanto nos demais filtros essa frequência foi inferior a 10%.

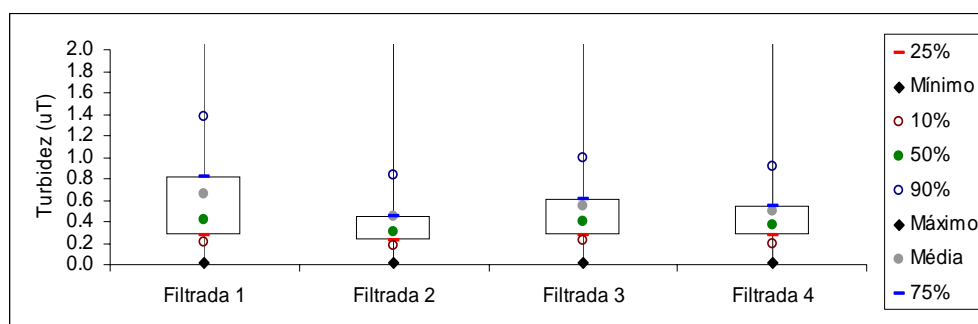


Figura 29. Distribuição de frequência dos dados horários de turbidez medidos em cada filtro separadamente, 2004 a 2008.

A Tabela 24 apresenta a avaliação dos filtros 1, 2 3 e 4, sendo que o filtro 1 apresentou alteração no valor de *Cryptosporidium* spp.

Quanto à avaliação microbiológica na água tratada, pode-se observar apenas no mês de junho a concentração de 2,5 oocistos/L de *Cryptosporidium* ssp. na ETA I/SAAE. Nota-se que na maioria dos eventos de amostragem positiva na água filtrada, oocistos ocorreram simultaneamente em mais de um filtro, operando em paralelo, o que pode ser indício de perigo em decorrência de descuidos

operacionais.

Tabela 24. Valores de turbidez e caracterização microbiológica da água no efluente dos filtros, novembro de 2007 a outubro de 2008

Parâmetro	Filtro	N ⁽¹⁾	Média	Máximo	Mínimo	Desvio Padrão	Remoção (%) ⁽³⁾	Log Remoção ⁽³⁾
Turbidez ⁽⁴⁾	1	12	0,16	0,22	0,39	0,2	97,9	1,67
	2	12	0,47	0,47	1,31	1,0	93,8	1,21
	3	12	0,71	0,67	7,80	6,4	90,7	1,03
	4	12	0,17	0,11	2,07	1,7	97,7	1,64
Coliformes totais ⁽⁵⁾	1	12	907,52	2420	3	1048,4	81,2	0,72
	2	12	648,30	2420	2	880,2	86,5	0,87
	3	12	900,39	2420	3	988,8	81,3	0,73
	4	12	795,07	2420	1,7	1000,2	83,5	0,78
<i>Escherichia coli</i> ⁽⁵⁾	1	12	9,31	34	ND	12,5	97,1	1,54
	2	12	2,42	17	1	4,6	99,3	2,13
	3	12	11,01	120	ND	34,3	96,6	1,47
	4	12	89,08	920	1	264,6	72,5	0,56
<i>Cryptosporidium spp.</i> ⁽⁶⁾	1	12	2,78	14	0	4,9	SR	SR
	2	12	0,08	1	0	0,3	95,7	1,37
	3	12	2,15	12,3	0	4,1	SR	SR
	4	12	0,38	1,5	0	0,7	80,4	0,71
<i>Giardia spp.</i> ⁽⁷⁾	1	12	0,292	3,5	0	1,0	SR	SR
	2	12	0,025	0,3	0	0,1	91,4	1,07
	3	12	0,425	4,1	0	1,2	SR	SR
	4	12	ND	ND	0	NA	NA	NA

NOTAS: (1) número de amostras; (3) em relação à água bruta (4) uT; (5) NMP/100 mL, média geométrica; (6) oocistos/L, média aritmética; (7) cistos/L, média aritmética; ND:não detectado; NA: não se aplica; SR: sem remoção (valor na água filtrada maior que o da água bruta).

O Filtro 1 apresentou também o pior desempenho em termos de funcionamento hidráulico (Tabela 25).

Tabela 25. Parâmetros operacionais dos filtros da ETA

Parâmetros	Filtro 1	Filtro 2	Filtro 3	Filtro 4
Profundidade média (m)	1.20	1.71	1.37	1.28
Duração média da carreira (h)	26	56	68	77
Perda de carga crítica (m)	0.52	1.22	0.92	1.21
Perda de carga máxima (m)	2.00	2.00	2.00	2.00

(v) Desinfecção e reservatórios

No período de 2004 a 2008, o cloro livre residual medido na saída do tanque de contato esteve, em 80% dos dados, entre 0,8 e 1 mg.L⁻¹, Figura 30, sendo 0,5 mg.L⁻¹ o mínimo estabelecido na norma brasileira de potabilidade da água.

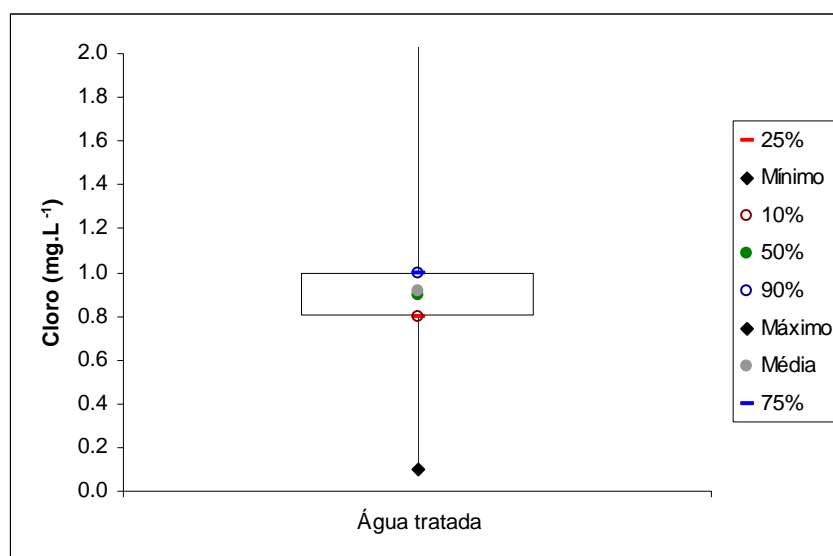


Figura 30. Distribuição de frequência da concentração de cloro residual na saída do tanque de contato, 2004 a 2008

O tanque de contato tem forma circular, sem chicanas, sendo que a entrada de água e a saída se encontram próximas uma da outra. Essa conformação pode favorecer a ocorrência de curtos-circuitos e zonas mortas, o que não é desejável. A água tratada é armazenada em um reservatório, sendo distribuída conforme a demanda. Isso pode levar ao aumento do tempo de contato, ao se computar o período em que a água fica armazenada.

4.3.2. Identificação de Pontos Críticos de Controle na estação de tratamento de água (ETAI / SAAE)

Antes de iniciar a identificação dos Pontos Críticos de Controle (PCC), foi feita a identificação dos principais eventos perigosos/perigos em cada etapa do tratamento (Adução Mistura Rápida, Coagulação, Floculação, Decantação, Filtração e Fluoretação), conforme lista de verificação (*check list*) (Anexo 5).

A identificação dos PCCs foi realizada a partir das sequências de perguntas e respostas previstas na árvore de decisão (Figura 13). A metodologia utilizada na indústria de alimentos utiliza apenas as terminologias PC (Ponto Controle) e PCC (Ponto Crítico de Controle). Neste trabalho, foi incluída mais uma categoria denominada de Ponto de Atenção (PA), sendo adotadas as terminologias definidas

no item 2.3.1.

- a) Ponto Crítico de Controle (PCC): ponto ao longo do sistema de abastecimento de água onde há um ou mais perigos que ofereçam risco à saúde, que possam ser monitorados de forma sistemática e contínua. Todo PCC deve ser estabelecido limites críticos e, ou operacionais e as respectivas medidas de controle e que não exista barreira subsequente, de modo a prevenir, de modo a prevenir, reduzir ou eliminar o perigo a um nível aceitável.
- b) Ponto Controle (PC): ponto ao longo do sistema de abastecimento de água onde há um ou mais perigos, que podem ser monitorados de forma sistemática e contínua, sendo possível estabelecer limites críticos, no entanto as medidas de controle não são suficientes para prevenir, reduzir ou eliminar o perigo a um nível aceitável.
- c) Ponto Crítico de Atenção (PCA): ponto ao longo do sistema de abastecimento de água onde há um ou mais perigos que ofereçam risco à saúde, que não são passíveis de monitoramento por meio de limites críticos, mas é possível estabelecer intervenções físicas e medidas de controle direcionadas a prevenir, reduzir ou eliminar o perigo a um nível tolerável.
- d) Pontos de Atenção (PA): pontos ao longo do sistema de abastecimento de água onde há um ou mais perigos que ofereçam risco à saúde, onde as medidas de controle não podem ser realizadas de imediato ou serem de difícil implementação (como, por exemplo, a ampliação de estações de tratamento de esgoto ou o controle de fontes difusas de contaminação).

A identificação dos PCC, PC e PA foi baseada na constatação de perigos (protozoários e vírus/bactérias), uma vez que esses perigos foram identificados na bacia hidrográfica e zona de captação. Dessa forma, procurou-se dar um maior detalhamento nas etapas de tratamento de água em ciclo completo, etapa por etapa. A sequência de respostas SIM ou NÃO (por exemplo.: S, N, S, N) deve ser documentada em tabelas de avaliação do sistema, de modo a facilitar, tanto a percepção do caminho percorrido na árvore de decisão, como auxiliar na definição dos procedimentos de monitoramento. O Quadro 11 detalha o procedimento de aplicação da metodologia para cada evento perigoso e, ou perigo.

Quadro 11. Procedimento de aplicação da árvore de decisão

Questões	Perguntas	Procedimentos de uso
Q. 1:	Existem medidas de controle para o perigo identificado?	Para responder a esta questão, deve-se analisar se ao longo do processo de produção se existem medidas que auxiliam a remoção ou redução do perigo e principalmente se há barreira(s) efetiva(s) que garantam a produção de água segura. Assim, se a resposta for SIM, deve-se passar à questão 2. Se a resposta for NÃO, passa-se à questão suplementar 1.1
Q 1.1.	Nesta etapa é necessária uma mudança para garantir a segurança da água?	Essa questão verifica a necessidade de uma mudança ou controle para garantir a segurança da água. Se NÃO for necessário um controle dessa etapa, então não é um PCC, PARE. Se SIM, passa-se à questão suplementar 1.2
Q 1.2.	A mudança pode ser realizada de imediato?	Essa etapa verifica a existência e, ou possibilidade de mudança nessa etapa. Se NÃO, então não é um PCC. Se houver possibilidade (SIM) é um PA que deve ser providenciado todo o planejamento e o tempo e recursos necessários para mudança. Após a modificação, deve-se proceder à avaliação dessa etapa e passa-se à questão 2 para verificar se elimina ou reduz o perigo a um nível aceitável.
Q 2.	As medidas de controle eliminam ou reduzem o perigo a um nível aceitável?	Na questão 2, a pergunta é feita para verificar se as medidas de controle eliminam ou reduzem o perigo a um nível aceitável. Se a resposta for SIM, então é PCC. Se a resposta for NÃO, passa-se à questão 3.
Q 3.	Existe alguma barreira que pode eliminar ou reduzir o perigo a níveis aceitáveis?	Esta questão permite avaliar se, apesar da existência de um perigo nessa fase do processo, ele consegue ser eliminado em outra barreira seguinte. Se a resposta for SIM, então Não é PCC, PARE. Se a resposta for NÃO, então é um PCC.

Após a avaliação das etapas da estação de tratamento de água (ETAI/SAAE), foi feita a identificação de Pontos Críticos de Controle por meio da aplicação da árvore de decisão (Figura 13 e Quadros 11). Os resultados para os perigos (bactérias / vírus e protozoários) em cada etapa do tratamento estão nas Tabelas 26 e 27.

Tabela 26. Identificação dos pontos críticos de controle e as medidas de controle na ETAI/SAAE, Viçosa, Brasil, 2008

Possíveis Perigos: Bactérias e Vírus								
Etapas	Principais Eventos Perigosos	Árvore de Decisão (Respostas)				Conclusão	Base/Fundamento	Medidas de controle
		Q1	Q2	Q3	Q4			
Mistura rápida / Coagulação	<p>Ausência de ensaios para estabelecimento de concentração, pH e dose ótimos;</p> <p>Reduzida frequência de realização do teste de jarros</p> <p>Tempo excessivo de mistura do coagulante, baixa agitação (gradiente de velocidade insuficiente)</p>	Sim	Não	Sim	Sim	PC	<p>Comprometimento da coagulação e, por conseguinte, dos processos unitários subsequentes. As falhas encontradas nessa etapa foram: dispersão inadequada do coagulante e operação do processo sem o controle adequado dos mecanismos de coagulação mais apropriados à qualidade da água e à tecnologia de tratamento. A coagulação favorece condições para remover as bactérias e vírus. No entanto, como não há remoção de bactérias e vírus na coagulação, o perigo permanece.</p>	<p>Confecção do diagrama de coagulação para aferir o melhor para dose de coagulante - pH a ser adotado.</p> <p>Realização de ensaio sistemático de Jar Test.</p> <p>Adequação do ponto do coagulante; A aplicação dos produtos químicos deve ser feita por meio de difusores.</p> <p>Os locais e as sequências de aplicação devem ser determinados mediante ensaios feitos localmente.</p> <p>Garantir que a dosagem dos produtos químicos seja capaz de dar resposta imediata sempre que ocorram alterações significativas na qualidade da água bruta.</p>

Possíveis Perigos: Bactérias e Vírus								
Etapas	Principais Eventos Perigosos	Árvore de Decisão (Respostas)				Conclusão	Base/Fundamento	Medidas de controle
		Q1	Q2	Q3	Q4			
Floculação	Falhas construtivas em algumas câmaras da unidade	Sim	Não	Sim	Sim	PC	<p>Os levantamentos de campo revelaram que os gradientes de velocidade nas câmaras de floculação variam de forma decrescente, entre 53 a 35 s⁻¹; revelaram também que os gradientes das passagens estão abaixo dos valores encontrados na câmara anterior, o que é recomendado.</p> <p>No entanto, a aferição dos gradientes permitiu presumir pequenas falhas construtivas em algumas câmaras da instalação devidas à elevação dos gradientes em algumas destas ao se comparar com a anterior. Essas falhas resultam em sedimentação de flocos no floculador ou em sua ruptura.</p> <p>A floculação favorece condições para remover as bactérias e vírus. No entanto, como não há remoção de bactérias e vírus na floculação, o perigo permanece.</p>	Manutenção das características hidráulicas por meio da manutenção e limpeza dos floculadores.

Possíveis Perigos: Bactérias e Vírus								
Etapas	Principais Eventos Perigosos	Árvore de Decisão (Respostas)				Conclusão	Base/Fundamento	Medidas de controle
		Q1	Q2	Q3	Q4			
Decantação	Ausência de tratamento do lodo	Sim	Não	Sim	Sim	PC	<p>O tempo de detenção real da unidade esteve muito abaixo do tempo de detenção teórico e a ocorrência de zonas mortas em uma fração de 10%, comprovado pelo prolongamento do tempo requerido durante o ensaio com traçador. O nivelamento da borda vertedoura revelou resultado satisfatório. A água efluente ao decantador apresenta, geralmente, reduzida turbidez (75% do tempo inferior a seis em períodos de estiagem e menor que 156 em 75% dos dados referentes a períodos de chuva). O lodo apresenta grande concentração de sólidos e, conseqüentemente, presença de protozoários. Segundo a WHO (2004), a remoção de bactérias e vírus nas etapas de coagulação, floculação e decantação chega a 90% e 70%, respectivamente (em função do coagulante, pH, temperatura, alcalinidade e turbidez). A decantação favorece condições para remover as bactérias e vírus. No entanto, como não há remoção de bactérias e vírus na decantação, o perigo permanece.</p>	<p>Manutenção das características hidráulicas através de manutenção e limpeza dos decantadores. Tratamento adequado dos resíduos da ETA.</p>

Possíveis Perigos: Bactérias e Vírus								
Etapas	Principais Eventos Perigosos	Árvore de Decisão (Respostas)				Conclusão	Base/Fundamento	Medidas de controle
		Q1	Q2	Q3	Q4			
Filtração	Falha no controle da carreira de filtração; Leito filtrante deteriorado; Ausência de lavagem superficial do leito; Ausência de controle da expansão do leito filtrante; Ausência de monitoramento da qualidade microbiológica da água de lavagem; Presença de curtos-circuitos e zonas mortas; Ausência de tratamento da água de lavagem.	Sim	Não	Sim	Sim	PC	<p>O desempenho da filtração é satisfatório para remoção de vírus e bactérias, obtendo, em mais de 70% do tempo, valores de turbidez residual inferiores a 0,3 uT, em cerca de 94% do tempo turbidez inferior a 0,5 uT e em mais de 99% do tempo, a turbidez filtrada não ultrapassa o valor de 1 uT.</p> <p>Bactérias e vírus são bem menores que os (oo)cistos de protozoários, as primeiras de dimensões em torno de 1 µm e os segundos em ordem de grandeza de nanômetros. Portanto, a remoção destes organismos por filtração é muito limitada. Segundo a WHO (2004), a remoção de bactérias e vírus nas etapas do tratamento da água em ciclo completo chega a 99% (em condições ótimas de coagulação). No entanto, como a remoção de bactérias e vírus na filtração é baixa, o perigo permanece.</p>	<p>Garantir a existência de um plano geral de manutenção da operação dos filtros.</p> <p>Controle rigoroso das carreiras de filtração por meio do controle da perda de carga durante a filtração e da qualidade da água filtrada em cada unidade de filtração. Manutenção da turbidez da água filtrada inferior a 1,0 uT; idealmente menor do que 0,5 uT.</p>

Possíveis Perigos: Bactérias e Vírus								
Etapas	Principais Eventos Perigosos	Arvore de Decisão (Respostas)				Conclusão	Base/Fundamento	Medidas de controle
		Q1	Q2	Q3	Q4			
Desinfecção	Estado de conservação dos equipamentos de dosagem insatisfatório Ausência de conhecimento e controle acerca do tempo de contato CT incorreto; Ausência de monitoramento dos subprodutos; Ausência e conservação e padronização dos equipamentos.	Sim	Sim	-	-	PCC	<p>Essa etapa é responsável pela inativação de vírus e bactérias. Segundo WHO (2004), para remoção de bactérias e vírus, o residual desinfetante (mg/L) e tempo de contato (min.) para eficiência de desinfecção de 99% são: CT99 (bactérias): - 0,08 mg•min/L a 1–2 °C e pH 7; - 3,3 mg•min/L a 1–2 °C e pH 8,5 CT99 (vírus): - 12 mg•min/L a 0–5 °C; - 8 mg•min/L a 10 °C; ambos em pH 7–7,5</p> <p>Para o período de 2004 a 2008, o cloro livre residual esteve, em 80% dos dados, entre 0,70 e 1,0 mg/L, o que corresponderia a um Concentração x Tempo de Contato (CT) entre 9,72 e 16,32mg.min/L, assim por grande parte do tempo os valores de CT estão abaixo dos recomendados pela legislação de potabilidade (15mg.min/L). Foram verificadas, por meio de inspeção visual, ausência de chicanas e disposição inadequada do local de entrada/saída de água no tanque de contato.</p>	<p>Para remoção de bactérias e vírus, as principais medidas de controle são o controle do cloro residual livre e a manutenção das características hidráulicas do tanque de contato.</p> <p>Garantir a existência de um programa de controle da concentração do Cloro e do tempo de contato, a fim de se manter adequado o Produto Concentração do desinfetante x Tempo de Contato. Ensaio com traçadores quando possível para verificar tempo de contato real.</p> <p>Conservação e padronização dos equipamentos de dosagem.</p> <p>Implementação de um programa de monitoramento dos subprodutos da desinfecção.</p> <p>Construção de chicanas no tanque de contato para evitar curtos circuitos, zonas mortas e garantir o controle do tempo de contato.</p>

Tabela 27. Caracterização dos pontos críticos de controle e as medidas de controle na ETAI/SAAE, Viçosa, Brasil, 2008

Possíveis Perigos: Protozoários								
Etapas	Principais Eventos Perigosos	Árvore de Decisão (Respostas)				Conclusão	Base/Fundamento	Medidas de controle
		Q1	Q2	Q3	Q4			
Mistura rápida / Coagulação	<p>Ausência de ensaios para estabelecimento de concentração, pH e dose ótimos;</p> <p>Reduzida frequência de realização do teste de jarros</p> <p>Tempo excessivo de mistura do coagulante, baixa agitação (gradiente de velocidade insuficiente)</p>	Sim	Não	Sim	Não	PCC	<p>Comprometimento da coagulação e, por conseguinte, dos processos unitários subsequentes.</p> <p>As falhas encontradas nessa etapa foram: dispersão inadequada do coagulante e operação do processo sem o controle adequado dos mecanismos de coagulação mais apropriados à qualidade da água e à tecnologia de tratamento.</p> <p>A coagulação favorece condições para remover os protozoários, cerca de 30% a 90% (em função do coagulante, pH, temperatura, alcalinidade e turbidez) (WHO, 2004).</p> <p>No entanto, como não há remoção de bactérias e vírus na coagulação, o perigo permanece.</p> <p>As etapas subsequentes floculação, decantação e principalmente filtração não reduzem o perigo a um nível aceitável.</p>	<p>Confecção do diagrama de coagulação para aferir o melhor para dose de coagulante - pH a ser adotado.</p> <p>Realização de ensaio sistemático de Jar Test.</p> <p>Adequação do ponto do coagulante; A aplicação dos produtos químicos deve ser feita por meio de difusores.</p> <p>Os locais e as sequências de aplicação devem ser determinados mediante ensaios feitos localmente.</p> <p>Garantir que a dosagem dos produtos químicos seja capaz de dar resposta imediata sempre que ocorram alterações significativas na qualidade da água bruta.</p>

Possíveis Perigos: Protozoários								
Etapas	Principais Eventos Perigosos	Arvore de Decisão (Respostas)				Conclusão	Base/Fundamento	Medidas de controle
		Q1	Q2	Q3	Q4			
Floculação	Falhas construtivas em algumas câmaras da unidade	Sim	Não	Sim	Não	PCC	<p>Os levantamentos de campo revelaram que os gradientes de velocidade nas câmaras de floculação variam de forma decrescente, entre 53 a 35 s⁻¹; revelaram também que os gradientes das passagens estão abaixo dos valores encontrados na câmara anterior, o que é recomendado.</p> <p>No entanto, a aferição dos gradientes permitiu presumir pequenas falhas construtivas em algumas câmaras da instalação devidas à elevação dos gradientes em algumas destas ao se comparar com a anterior. Essas falhas resultam em sedimentação de flocos no floculador ou ruptura dos mesmos.</p> <p>Os (oo)cistos de protozoários tendem a se comportar como partícula e ser removidos pelos mesmos mecanismos que outras partículas em suspensão em processos de clarificação da água. Nessa etapa, pode-se alcançar elevada remoção de (oo)cistos de <i>Giardia</i> e <i>Cryptosporidium</i>, mais que isso depende de rigoroso controle operacional.</p> <p>A floculação favorece condições para remover os protozoários. No entanto, como a etapa da decantação e filtração não reduz o perigo a um nível aceitável, o perigo permanece.</p>	Manutenção das características hidráulicas por meio da manutenção e limpeza dos floculadores.

Possíveis Perigos: Protozoários								
Etapas	Principais Eventos Perigosos	Arvore de Decisão (Respostas)				Conclusão	Base/Fundamento	Medidas de controle
		Q1	Q2	Q3	Q4			
Decantação	Ausência de tratamento do lodo	Sim	Não	Sim	Não	PCC	<p>O tempo de detenção real da unidade esteve muito abaixo do tempo de detenção teórico e a ocorrência de zonas mortas em uma fração de 10%, comprovado pelo prolongamento do tempo requerido durante o ensaio com traçador. O nivelamento da borda vertedoura revelou resultado satisfatório. A água efluente ao decantador apresenta, geralmente, reduzida turbidez (75% do tempo inferior a seis em períodos de estiagem e menor que 156 em 75% dos dados referentes a períodos de chuva). O lodo apresenta grande concentração de sólidos e, conseqüentemente, presença de protozoários. A floculação favorece condições para remover os protozoários. No entanto, como a etapa filtração não foi apresentada eficiência na reduz do perigo a um nível aceitável, o perigo permanece.</p>	<p>Manutenção das características hidráulicas através de manutenção e limpeza dos decantadores.</p> <p>Tratamento adequado dos resíduos da ETA.</p>

Possíveis Perigos: Protozoários								
Etapas	Principais Eventos Perigosos	Arvore de Decisão (Respostas)				Conclusão	Base/Fundamento	Medidas de controle
		Q1	Q2	Q3	Q4			
Filtração	Falha no controle da carreira de filtração; Leito filtrante deteriorado; Ausência de lavagem superficial do leito; Ausência de controle da expansão do leito filtrante; Ausência de monitoramento da qualidade microbiológica da água de lavagem; Presença de curtos-circuitos e zonas mortas; Ausência de tratamento da água de lavagem.	Sim	Não	Sim	Não	PCC	<p>A filtração é a principal etapa responsável pela remoção de protozoários. O desempenho da filtração é baixo, obtendo, em mais de 70% do tempo, valores de turbidez residual inferiores a 0,3 uT, em cerca de 94% do tempo turbidez inferior a 0,5 uT e em mais de 99% do tempo a turbidez filtrada não ultrapassa o valor de 1 uT.</p> <p>De acordo com o monitoramento, vem sendo detectada presença de <i>ocistos/L</i> (0,33 a 0,57) e <i>oocistos/L</i> (0,11 a 22,3) de protozoários. No entanto, pela análise dos protozoários e pela análise do indicador “turbidez”, pode-se concluir que a etapa de filtração não consegue eliminar ou reduzir o perigo a um nível aceitável.</p> <p>Verifica-se que o desempenho da filtração é satisfatório, entretanto tem limitações para alcançar os valores mais rigorosos de turbidez tidos como indicadores da remoção de protozoários.</p> <p>Segundo a WHO (2004), a remoção de protozoários nas etapas do tratamento da água em ciclo completo chega a 70% a 99% (em condições ótimas de coagulação).</p>	<p>Garantir a existência de um plano geral de manutenção da operação dos filtros.</p> <p>Garantir a existência de um plano geral de manutenção da operação dos filtros. Controle rigoroso das carreiras de filtração por meio do controle da perda de carga durante a filtração e da qualidade da água filtrada em cada unidade de filtração. Manutenção da turbidez da água filtrada inferior a 1,0 uT; idealmente menor do que 0,5 UNT.</p> <p>Adequação da camada filtrante para evitar fluxo preferencial de partículas e patógenos para a água filtrada.</p> <p>Implantação de monitoramento sistemático e de tratamento da água de lavagem de filtros.</p>

Possíveis Perigos: Protozoários								
Etapas	Principais Eventos Perigosos	Arvore de Decisão (Respostas)				Conclusão	Base/Fundamento	Medidas de controle
		Q1	Q2	Q3	Q4			
Desinfecção	Estado de conservação dos equipamentos de dosagem insatisfatório Ausência de conhecimento e controle acerca do tempo de contato CT incorreto; Ausência de monitoramento dos subprodutos; Ausência e conservação e padronização dos equipamentos.	Não	Sim	Sim	Não	PA	<p>Foram verificadas, por meio de inspeção visual, ausência de chicanas e disposição inadequada do local de entrada/saída de água no tanque de contato.</p> <p>Para o período de 2004 a 2008, o cloro livre residual esteve, em 80% dos dados, entre 0,70 e 1,0 mg/L, o que corresponderia a um Concentração x Tempo de Contato (CT) entre 9,72 e 16,32mg.min/L, assim por grande parte do tempo os valores de CT estão abaixo dos recomendados pela legislação de potabilidade (15mg.min/L).</p> <p>O desinfetante utilizado (cloro) apresenta baixa eficiência na inativação de protozoários. Segundo WHO (2004), o residual desinfetante (mg/L) e o tempo de contato (min.) para eficiência de desinfecção de 99% não inativam oocistos de <i>Cryptosporidium</i> spp.</p>	<p>Para remoção de bactérias e vírus, as principais medidas de controle são o controle do cloro residual livre e a manutenção das características hidráulicas do tanque de contato.</p> <p>Garantir a existência de um programa de controle da concentração do Cloro e do tempo de contato, a fim de se manter adequado o Produto Concentração do desinfetante x Tempo de Contato. Ensaio com traçadores quando possível para verificar tempo de contato real.</p> <p>Conservação e padronização dos equipamentos de dosagem.</p> <p>Implementação de um programa de monitoramento dos subprodutos da desinfecção.</p> <p>Construção de chicanas no tanque de contato, para evitar curtos circuitos, zonas mortas e garantir o controle do tempo de contato.</p> <p>Utilização de outro desinfetante</p>

O resumo do resultado obtido com a aplicação do modelo de árvore de decisão proposto neste trabalho para identificação dos pontos críticos de controle e a atenção no tratamento de água em ciclo completo estão expressos na Tabela 28.

Tabela 28. Resumo dos resultados da aplicação do modelo de árvore de decisão para determinação do Ponto Crítico de Controle, Ponto de Controle e Ponto de Atenção, na ETAI/SAAE, Viçosa, Brasil, 2008

Etapa	Resultado da aplicação da árvore de decisão	
	Vírus e Bactérias	Protozoários
Mistura rápida / Coagulação	PC	PCC
Floculação	PC	PCC
Decantação	PC	PCC
Filtração	PC	PCC
Desinfecção	PCC ⁽¹⁾	PA ⁽²⁾

NOTAS: (1) Ponto Crítico de Controle requer definição de limites críticos e monitoramento para reduzir ou eliminar o perigo a um nível aceitável
(2) Ponto de Atenção requer alteração da etapa.

O resultado obtido pela aplicação da árvore de decisão para o perigo protozoário mostrou-se coerente com os resultados obtidos no monitoramento de *Giardia* spp. e *Cryptosporidium* spp. Na ETA SAAE I, foi detectada presença de (oo)cistos no efluente dos filtros 1 e 3, o que pode servir, neste caso, como indicador de problemas estruturais nestes filtros e, ou reflexo da operação inadequada de lavagem, visto que, após a limpeza do filtro, o efluente filtrado permanece com valores elevados de turbidez por 60 minutos.

O indicador turbidez revelou que apenas o Filtro 2 – ETAI/SAAE apresentou turbidez abaixo de 0,5 uT, valor recomendado como meta pela Portaria MS n.º 2914/2012 para assegurar a adequada eficiência de remoção de enterovírus, cistos de *Giardia* spp. e oocistos de *Cryptosporidium* spp. (Figura 29).

A análise em separado do efluente de cada filtro indicou variações importantes, sendo que Filtro 1 apresentou o pior desempenho, Figura 29, não tendo sido raros os eventos em que a turbidez superou o padrão de 1 uT (superior a 15% dos dados), enquanto nos demais filtros, essa frequência foi inferior a 10%.

A presença de protozoários no efluente filtrado confirma o nível de contaminação detectado na zona de contaminação “alto”. Cabe destacar a importância da consideração dos picos de concentração de cistos de *Giardia* spp. e oocistos de *Cryptosporidium* spp. Neste trabalho, foram considerados os valores máximos (12 oocistos L⁻¹ e 2,5 cistos L⁻¹) encontrados em período de chuvas, no mês de janeiro de 2008. Conforme descrito no trabalho de Altherholt et al. (1998), os períodos

chuvosos aumentaram as concentrações de *Giardia* spp. e *Cryptosporidium* spp. na água bruta, primariamente por afetarem a turbidez através da ressuspensão dos sedimentos ou suspensão de solo e matéria fecal antiga.

A associação entre o parâmetro pluviosidade e a ocorrência de protozoários na água é destacada em diversos trabalhos (ATHERHOLT *et al.*, 1998; DAVIES *et al.*, 2004, DIAS, 2007). Altherholt *et al.* (1998) ainda destacam que a pluviosidade, além de ser altamente correlacionada à ocorrência de *Giardia* spp. e *Cryptosporidium* spp. na água, é um parâmetro capaz de influenciar outros aspectos como a vazão e a turbidez.

Como os oocistos de *Cryptosporidium* spp. são resistentes à desinfecção por cloro, medidas de controle na bacia devem ser tomadas de forma imediata ou a estação de tratamento em estudo deverá aumentar o rigor no controle operacional dos filtros, além da adoção de outro desinfetante, caso o processo de filtração não remova os protozoários de forma eficiente e segura.

Ainda vale ressaltar que a maioria dos casos de surtos de criptosporidiose nos EUA esteve acompanhada de picos de turbidez na água filtrada (SOLO-GABRIELE; NEUMEISTER, 1996).

4.4. Determinação da probabilidade de ocorrência dos perigosos na rede de distribuição

4.4.1. Diagnóstico / avaliação da rede de distribuição

A identificação dos perigos na rede de distribuição foi baseada no conceito de integridade da rede de distribuição e levou em consideração as seguintes variáveis:

(i) Variável Física

A rede de distribuição do município de Viçosa – Minas Gerais tem, aproximadamente, 213 km de extensão, sendo abastecida por duas estações: ETAI/SAAE e ETAlI/SAAE. Segundo dados obtidos no SAAE, a composição da rede, quanto às variáveis (tipos de materiais, idade e comprimento da tubulação), está especificadas na Tabela 29.

Tabela 29. Características físicas da rede de distribuição em função dos materiais das tubulações e idade, Viçosa, Minas Gerais.

Tipo de material da canalização	Idade	Comprimento da tubulação (km)	da Percentual (%)
PVC	≥ 20 anos	198/213	93
Cimento amianto	≥ 20 anos	6,39/213	3
Ferro dúctil	≥ 35 anos	6,39/213	3
Ferro galvanizado	≥ 15 anos	2,3/213	1

Quanto à variável física “diâmetro da tubulação”, a rede de distribuição apresenta as seguintes distribuições: 99,7 km com 60 mm, 49 km com 50 mm, 35,4 km com 32 mm, 33 km com 40 mm, 23,3 km com 200 mm, 19,8 km com 100 mm, 13,2 km com 85 mm, 9 km com 25 mm, 8 km com 125 mm, 6,6 km com 300 mm, 6,4 km com 250 mm, 6,3 km com 75 mm, 2,8 km com 150 mm e 1,3 km com 20 mm.

A partir da base de conhecimento para identificação dos perigos na rede distribuição (Item 3.3.4), foi possível estabelecer o nível de perigo físico quanto ao tipo de material, idade, comprimento e diâmetro da tubulação (Quadro 12).

Quadro 12. Nível de perigo físico da rede de distribuição em função da composição da rede de distribuição de Viçosa, Minas Gerais

Tipo de variável	Tipo de tubulação	Idade	Nível de perigo físico
Idade da Tubulação	PVC	> 20 anos	Alto
	Cimento amianto	≥ 20 anos	Alto
	Ferro fundido	≥ 35 anos	Alto
	Ferro galvanizado	≥ 15 anos	Alto
Diâmetro da tubulação (mm)	Extensão (km)	Diâmetro (mm)	Nível de perigo físico
	173,9	≤ 50 a 125	Alto
	32,5	150 a 250	Moderado
	6,6	> 250	Baixo
Comprimento da tubulação (m)	Extensão (km)	Comprimento (m)	Nível de perigo físico
	213	≤ 120	
		120 < L ≤ 240	Médio
		L > 240	

(ii) Variável hidráulica

Na avaliação da variável hidráulica da rede, as seguintes informações foram levadas em consideração: (a) pressões, (b) perdas de água (c) vazamentos e (d) históricos das reclamações.

(a) **Pressões:** Os valores de pressão na rede foram obtidos do trabalho Soares (2009)¹⁵, a partir de simulação de distribuições de vazão na rede com recursos do *software* EPANET. Esse estudo teve como finalidade propor a aplicação de uma metodologia para a identificação de perigos e mapeamento de riscos em redes de distribuição de água para consumo humano com a aplicação de técnicas de Sistema de Informações Geográficas e análise multicritério.

A ocorrência de pressões negativas pode favorecer infiltrações na rede e contaminação da água. Assim, quanto menores os valores de pressão, maiores os perigos potenciais. A simulação hidráulica da rede de abastecimento gerou resultados horários de pressão. Foram considerados os valores relativos ao horário de maior consumo, considerado crítico e correspondente às menores pressões na rede (Figura 31).

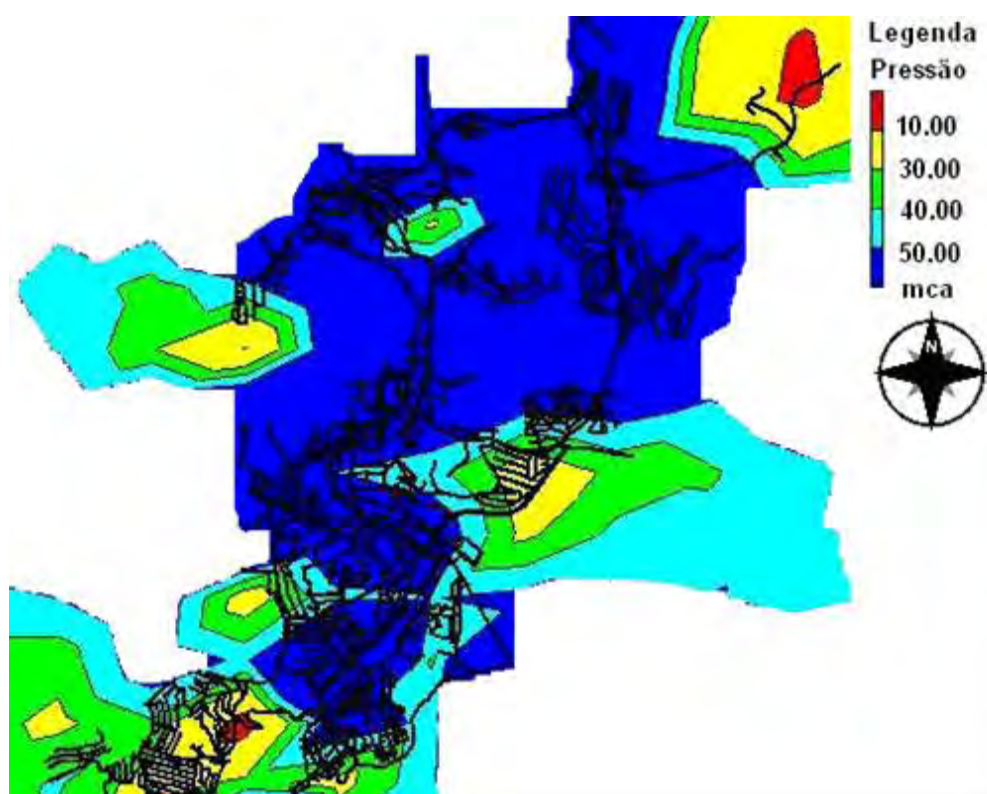


Figura 31. Mapa da variável hidráulica da rede de distribuição associada à pressão.

Fonte: Soares (2009).

¹⁵ O trabalho de Soares (2009) também foi desenvolvido no âmbito do projeto Plano de Segurança da Água e contou com acompanhamento da autora do presente trabalho, também desenvolvido no escopo do referido projeto.

(b) Perdas de água: De acordo com informações obtidas no SAAE, o índice de perdas de água no sistema de distribuição se encontra na faixa de 20 a 27%, sendo caracterizado na construção da rede Bayesiana como fator de baixo perigo.

(d) Vazamentos: As informações sobre vazamentos na rede foram obtidas de registros do cadastro do SAAE. Os dados revelam a ocorrência de “um a dois” vazamentos por trecho de rede, o que também foi caracterizado como fator de baixo perigo.

(e) Reclamações dos consumidores: As reclamações são cadastradas pelo SAAE por meio do serviço de atendimento ao público. O banco de dados utilizado corresponde ao período de janeiro de 2006 a dezembro de 2008. Foram selecionados os tipos de reclamações com potencial de interferência na qualidade da água, tais como: reclamações diretas e explícitas sobre a qualidade da água, vazamento de esgotos na rua, vazamentos na rede de água ou nos ramais prediais, problemas de pressão na rede ou de interrupção do abastecimento de água, No total, foram detectados 3.355 registros por reclamação por pressão, qualidade da água e intermitência de abastecimento (Figura 32). As reclamações por alteração da qualidade da água e de pressão foram consideradas de impacto alto, enquanto as relativas à intermitência, de impacto moderado. Entre os tipos de serviços de interesse, pode ser observado que a maior parte das reclamações estava relacionada a vazamentos da rede e reparos nas ligações de água.

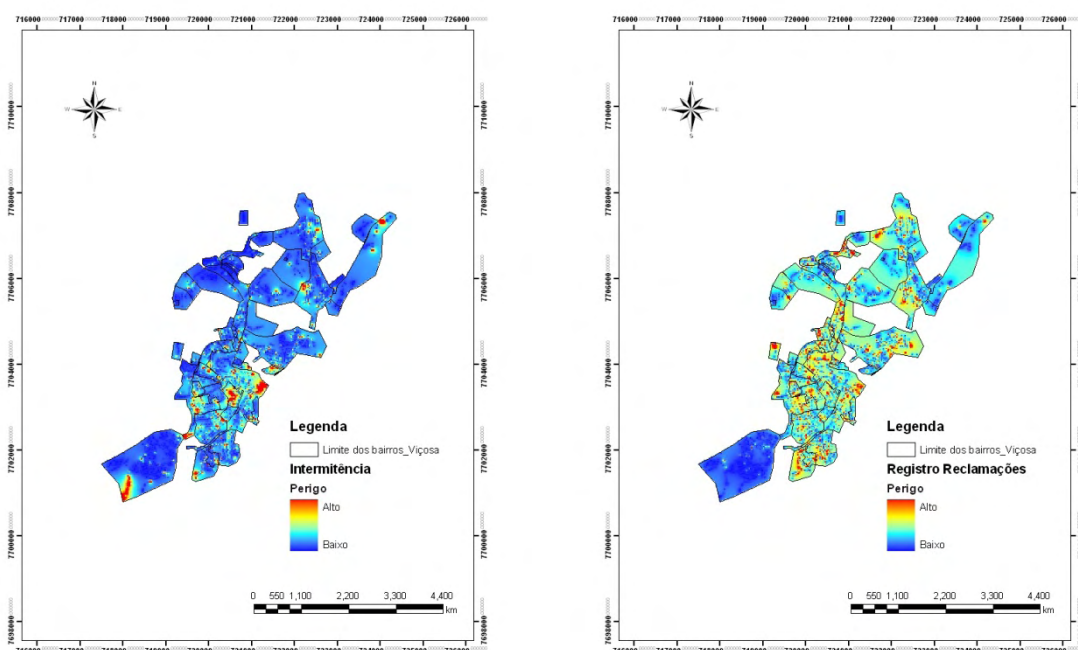
(iii) Variável da qualidade da água

A avaliação da qualidade da água distribuída foi baseada nos dados fornecidos pelo SAAE Viçosa no período de janeiro de 2006 a dezembro de 2008, totalizando 192 amostras analisadas. De forma resumida, a avaliação da qualidade da água na rede de distribuição apresentou as seguintes conclusões:

(i) Praticamente, não foram encontrados valores de cloro residual abaixo do limite mínimo estabelecido na norma brasileira de potabilidade da água ($0,2 \text{ mg L}^{-1}$).

(ii) os valores de turbidez mantiveram-se, em geral, baixos e inferiores ao limite estabelecido na norma brasileira de potabilidade da água (5 uT).

(iii) coliformes totais foram detectados em apenas três amostras. No entanto, não foram encontrados valores positivos para *Escherichia coli*. Também não foram detectadas variações bruscas nas contagens de bactérias heterotróficas, nem substâncias químicas.



a) Registro de Intermitência

b) Registro de Reclamações por qualidade e pressão

Figura 32. Mapas dos registros de reclamações sobre o abastecimento de água, Viçosa - MG janeiro de 2006 a dezembro de 2008.

Fonte: Soares (2009).

4.4.2. Criação da rede Bayesiana na rede de distribuição

A construção da rede Bayesiana para determinar a probabilidade de ocorrência do nível de perigos associados às variáveis físicas, hidráulica e qualidade da água seguiu os passos preconizados no item 3.3.1.

Assim, para definição das informações *a priori* sobre as variáveis físicas, hidráulica e qualidade da água na rede de distribuição, foram levados em consideração evidências da literatura técnica e estudos e pesquisas sobre o tema (Item 3.3.4). No Anexo 6, encontram-se as tabelas de probabilidades utilizadas na construção da rede Bayesiana para as variáveis física, hidráulica e qualidade da água.

A partir do resultado do diagnóstico / avaliação da rede de distribuição realizada com base em levantamentos de campo e em registros de cadastro do SAAE, foi possível responder às variáveis da Tabela 30.

Tabela 30. Variáveis para determinação da probabilidade de ocorrência dos perigos na rede de distribuição de Viçosa, Minas Gerais

Variáveis	Atributos
Física	
A tubulação de PVC tem idade acima de 20 anos?	Sim Não
A tubulação de cimento amianto tem idade acima de 20 anos?	Sim Não
A tubulação de ferro dúctil tem idade acima de 35 anos?	Sim Não
A tubulação de ferro galvanizado tem idade acima de 15 anos?	Sim Não
Comprimento da tubulação é acima de 240 metros?	Sim Não
Diâmetro da tubulação é abaixo de 125 mm?	Sim Não
Hidráulica	Atributos
Pressão acima do valor recomendado?	Sim Não
Existem vazamentos acima de 3 ou mais?	Sim Não
Índice de Perdas (IP) é acima de 27%?	Sim Não
Qualidade da Água	Atributos
Cloro residual livre acima do limite permitido	Sim Não
Bactérias heterotróficas acima do limite permitido	Sim Não
Coliformes Totais acima do limite permitido	Sim Não
<i>Escherichia coli</i> acima do limite permitido	Sim Não
Substâncias organolépticas acima do limite permitido	Sim Não
Substâncias químicas acima do limite permitido	Sim Não
Substâncias químicas (subprodutos da desinfecção) acima do limite permitido	Sim Não
Turbidez acima do limite permitido	Sim Não

Os passos para criação da rede Bayesiana na rede de distribuição para variáveis (física, hidráulica e qualidade da água) seguiram os mesmos procedimentos adotados no Item 4.1.2. A determinação da probabilidade *a posteriori* foi obtida a partir das informações coletadas no campo, conforme diagnóstico / avaliação da rede de distribuição. O resultado obtido se encontra na Figura 33.

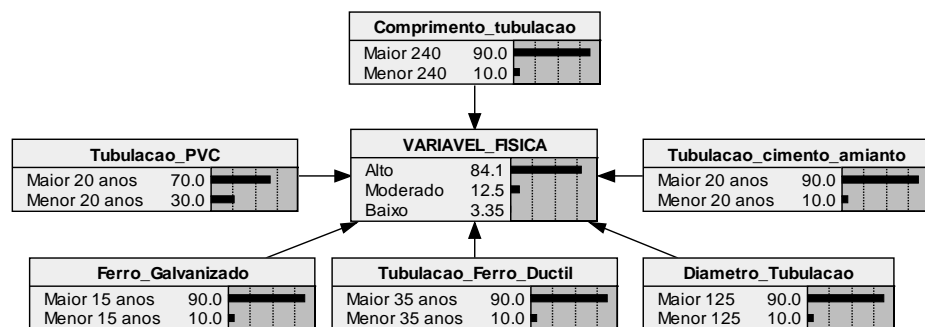
De acordo com a Figura 33b, quanto à possibilidade de alteração da qualidade associada ao tipo de material, a rede de distribuição apresentou perigo alto em função da idade da rede e dos trechos de menores diâmetros (maior parte da rede).

O tratamento das informações relativas à variável hidráulica da rede no modelo desenvolvido com o *software* UnBBayes revelou perigo alto de 60%, Figura 33d, sendo este valor determinado, principalmente, pelas ocorrências de valores de pressão baixas na rede (entre 0,01 e 9,98 mca), o que inclusive respalda reclamações por insuficiência de pressão e por intermitência de abastecimento, além do elevado índice de perdas.

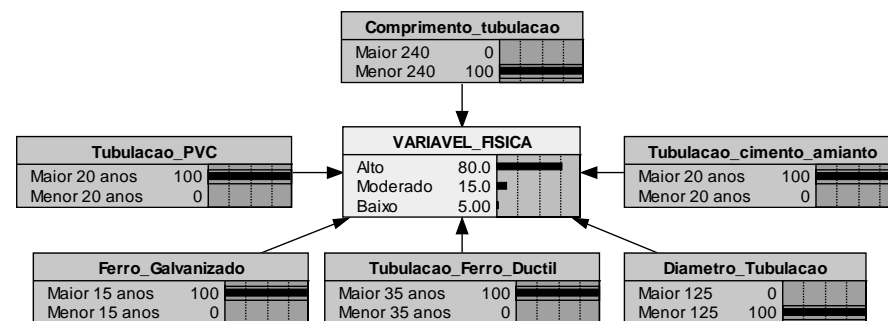
A qualidade da água apresentou nível de perigo baixo 78% (Figura 33f). A análise dos parâmetros coliformes totais encontrou três amostras com diagnóstico 'presença', em contrapartida, a 'presença' é que prevaleceu como valor obtido junto à rede Bayesiana.

A identificação de perigos na rede de abastecimento de água apresentou resultados semelhantes, caracterizando graus de perigos potenciais baixos para a variável qualidade da água.

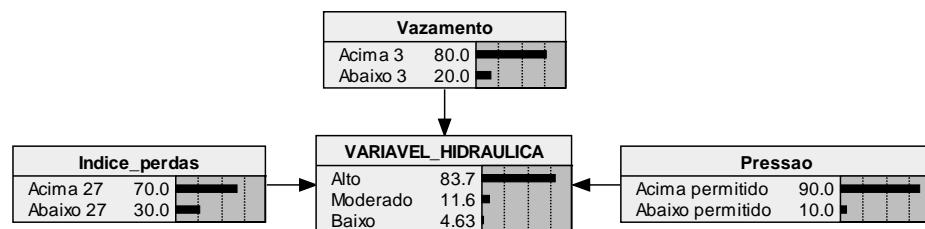
Soares (2009) utilizou o programa EPANET, as ferramentas de SIG, incluindo as técnicas de análise multicritério para a geração dos mapas de perigos na rede de distribuição Município de Viçosa - MG. Nesse trabalho, foi possível testar procedimentos metodológicos capazes de abordar, de forma integrada, vários parâmetros e situações de possível influência na qualidade da água. É interessante notar que o trabalho de Soares (2009) também indicou a predominância de grau de risco intermediário na rede de distribuição de Viçosa (Figura 34).



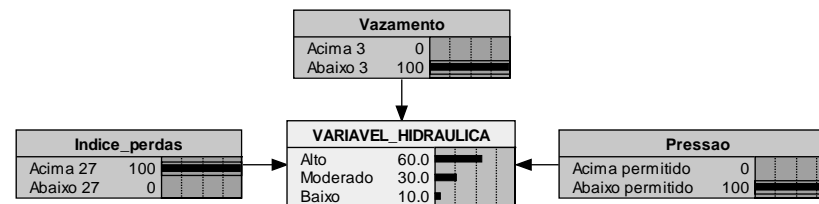
a. Probabilidade a priori para os níveis de perigo da variável física (Antes)



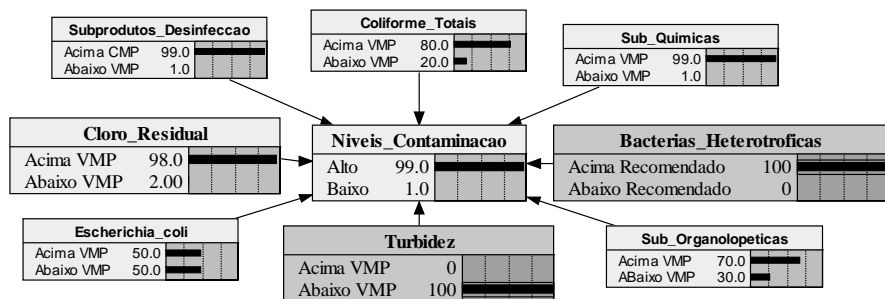
b. Probabilidade a posteriori para os níveis de perigo da variável física (Depois)



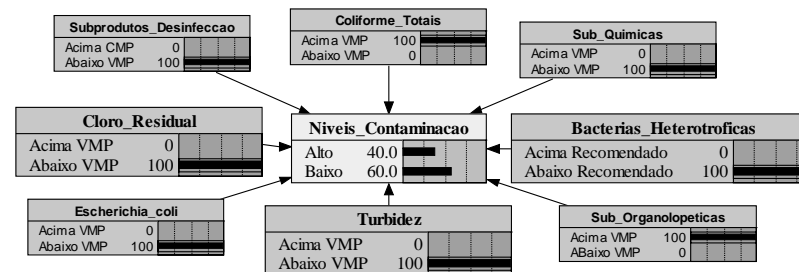
c. Probabilidade a priori para os níveis de perigo da variável hidráulica (Antes)



d. Probabilidade a posteriori para os níveis de perigo da variável hidráulica (Depois)

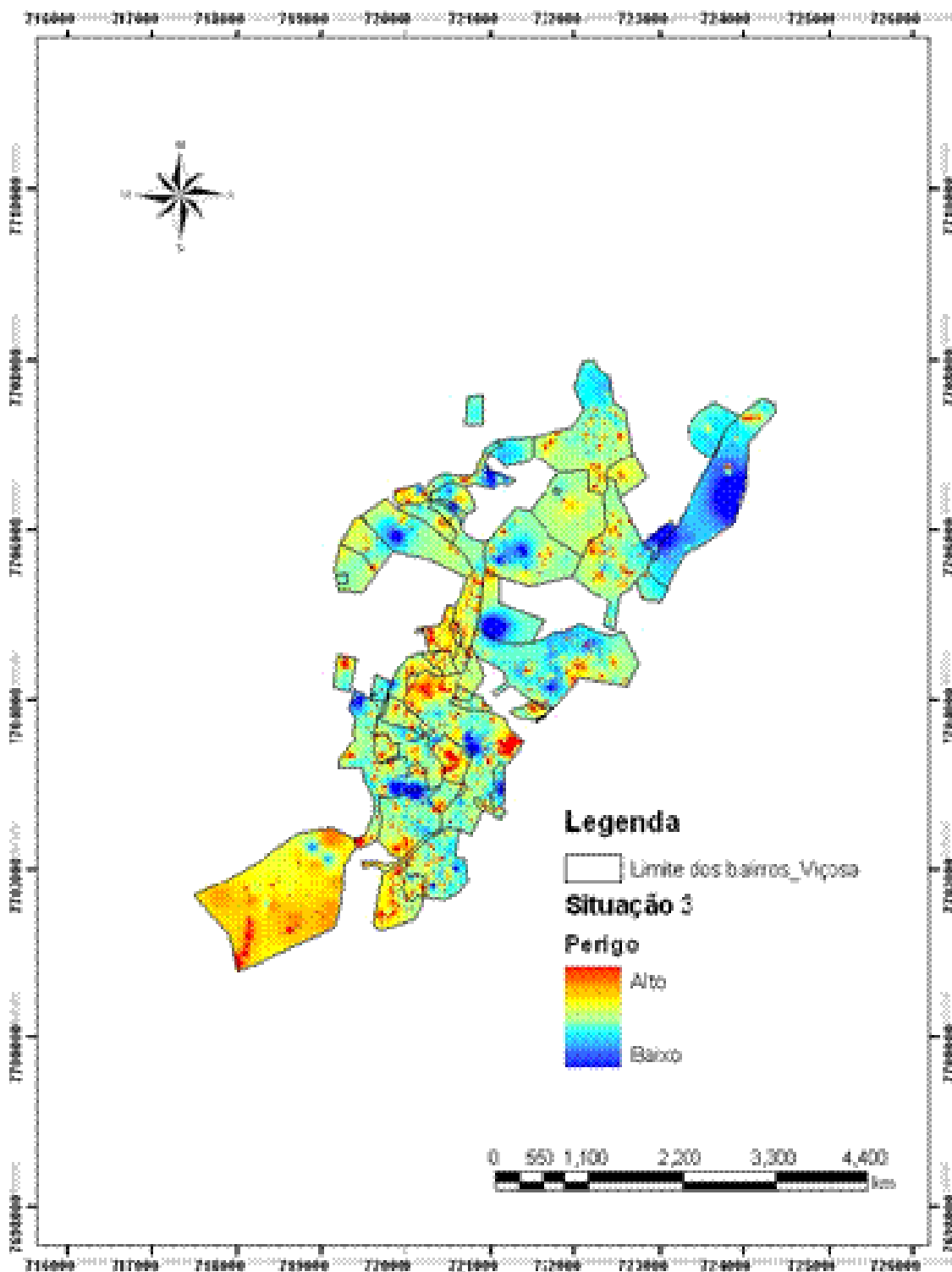


e. Probabilidade a priori para os níveis de perigo da variável qualidade da água (Antes)



f. Probabilidade a posteriori para os níveis de perigo da variável qualidade da água (Depois)

Figura 33: Resultado da aplicação da rede Bayesiana na rede de distribuição do Município de Viçosa, Minas Gerais, 2008



Fi

gura 34: Mapa de perigo na rede de distribuição de Viçosa gerado com emprego técnicas de SIG e análise multicritério.

Fonte: Soares (2009).

O Quadro 13 apresenta um resumo dos principais resultados obtidos na bacia hidrográfica do Ribeirão São Bartolomeu, zona de captação, estação de tratamento (ETA/SAAE) e rede de distribuição do Município de Viçosa, Minas Gerais.

Quadro 13. Síntese dos principais resultados obtidos na bacia hidrográfica do Ribeirão São Bartolomeu, zona de captação, estação de tratamento (ETA/SAAE) e rede de distribuição do Município de Viçosa, Minas Gerais, 2008

Etapa	Objetivo	Resultado
Bacia Hidrográfica	Determinar a probabilidade de ocorrência dos eventos perigosos na bacia hidrográfica contribuinte à zona de captação de água para consumo humano	A aplicação do modelo de classificação Bayesiana na bacia hidrográfica do ribeirão São Bartolomeu apresentou uma probabilidade a <i>posteriori</i> de 78,53% de ocorrência de os eventos perigosos na bacia hidrográfica contribuírem para alteração da qualidade da água na zona de captação.
Zona de Captação	Determinar a probabilidade de ocorrência do nível de contaminação dos perigos associados à zona de captação	O resultado da aplicação do modelo de classificação Bayesiana na zona de captação apresentou probabilidade “alta” (90%) para o nível microbiológico de contaminação e baixa para (70% e 99%) os níveis de contaminações biológicos e químicos, respectivamente. O resultado da aplicação do modelo de classificação Bayesiana nas sub-bacias do Ribeirão São Bartolomeu apresentou nível de contaminação “alto” para todas as sub-bacias, exceto para a sub-bacia do Córrego Santa Catarina.
Estação de Tratamento	Identificar os pontos críticos de controle na estação de tratamento de água	A aplicação da ferramenta “árvore de decisão” para identificação dos Pontos Críticos de Controle (PCC) e atenção na ETAI/SAAE, para os perigos vírus, bactérias e protozoários identificou, apenas PCC para o perigo protozoário em todas as etapas do tratamento, exceto na desinfecção, que foi identificada com Ponto de Atenção (PA). Já para os perigos bactérias e vírus, foram identificados PCC apenas para filtração.
Rede de Distribuição	Determinar a probabilidade de ocorrência dos perigos na rede de distribuição	Os níveis de perigo para as variáveis física (80%) e hidráulica foram (60%) altos. Já a variável qualidade da água obteve valor baixo (60%).

5. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

Os Planos de Segurança da Água (PSA) têm como base os princípios (preventivos) da avaliação e gestão de risco. Ainda que alicerçados em conceitos e instrumentos consolidados em outras áreas do conhecimento e do setor produtivo, a aplicação deles ao abastecimento de água para consumo humano é tema relativamente recente e novo paradigma, superando, em última instância, a dependência do controle laboratorial (moroso, caro e insuficiente) da qualidade da água.

Os PSA apresentam três componentes principais, que subsidiam a avaliação, controle operacional / monitoramento e gestão do sistema de forma a prevenir / eliminar perigos, reduzir / controlar riscos. Etapas fundamentais nesse processo são as de identificação e priorização de perigos, caracterização de riscos e o estabelecimento de medidas de controle, preventivas.

A caracterização dos riscos é usualmente realizada por meio da matriz de priorização de riscos e sua aplicação envolve incertezas. Uma forma de lidar com incertezas é utilizar evidências disponíveis (informações sobre o estado atual de uma variável aleatória) para refinar estimativas de probabilidades associadas às demais variáveis de interesse (LADEIRA *et al.* 1999) e, nesse sentido, as redes Bayesianas refletem um comportamento dinâmico e fornecem um arcabouço teórico apropriado para tomar decisões.

Dessa forma, acredita-se que os objetivos delineados para este trabalho tenham sido cumpridos, quais sejam, determinar a probabilidade de ocorrência de eventos perigosos na bacia hidrográfica contribuinte à zona de captação de água para consumo humano, nível de contaminação dos perigos associados à zona de captação e os perigos na rede de distribuição, além de identificar os pontos críticos de controle na estação de tratamento de água.

A construção da rede Bayesiana em uma bacia hidrográfica para fins de abastecimento permite fazer a combinação de observações de especialistas com o comportamento histórico da bacia hidrográfica.

A aplicação da abordagem probabilística da rede Bayesiana na bacia hidrográfica contribuinte à zona de captação e na zona de captação se mostrou uma ferramenta

política e interdisciplinar para avaliar os níveis de impactos dos eventos perigosos na qualidade da água, bem como simular cenários de perigos futuros.

Outros estudos desenvolvidos no âmbito do mesmo projeto, que deram sustentação ao presente trabalho (Plano de Segurança da Água), propuseram e testaram diferentes ferramentas de avaliação de perigo em bacias hidrográficas contribuinte à captação e em redes de distribuição de água, envolvendo técnicas de análise multicritério e de geoprocessamento (SOARES, 2009; SILVA, 2010). Acredita-se, assim, que este trabalho venha disponibilizar recursos adicionais com o mesmo fim, embora com abordagens e respostas distintas.

Como procedimento metodológico típico de trabalho acadêmico, optou-se pela árvore de decisão (com adaptação para produção de água) do sistema Análise de Perigo e Pontos Críticos de Controle (APPCC) para identificar os pontos críticos de controle na estação de tratamento da água, a partir da análise dos eventos perigosos / perigos na bacia hidrográfica e zona de captação.

O resultado da aplicação da árvore de decisão em cada etapa da estação de tratamento de água foi coerente com o resultado histórico do monitoramento da ETAI/SAAE. Assim, o sistema APPCC apresentou-se como ferramenta preventiva, sendo adequada para identificar os perigos inerentes ao abastecimento de água, fornecendo indicações importantes do ponto de vista de definição de prioridades e de adoção de medidas preventivas ou mesmo corretivas, ao invés de remeter à avaliação da qualidade final do produto.

Na rede de distribuição também foram obtidos resultados satisfatórios, uma vez que a operação e manutenção da rede de distribuição de água é uma atividade complexa em função de vários fatores.

Pelos resultados obtidos, é possível também vislumbrar o potencial da aplicação das redes Bayesianas em combinar a experiência dos operadores, dados históricos do sistema de distribuição de água, além de outras ferramentas, como, por exemplo, a utilização do programa EPANET, das ferramentas de SIG, incluindo as técnicas de análise multicritério, de forma a auxiliar os operadores na tomada de decisão para garantir a segurança da água.

Por conseguinte, para que os objetivos delineados fossem alcançados, fez-se necessária a disponibilidade de um extenso banco de dados, o que, aparentemente, traz à tona a seguinte 'contradição': o que se quer evitar com a abordagem

preventiva é o monitoramento em detalhe da qualidade da água, que se torna indispensável em trabalho de investigação para exatamente superar essa 'obrigação'. Não obstante, o estudo cumpriu também esse objetivo ao identificar perigos que devem ser priorizados para controle, no caso em questão, a ocorrência de protozoários, com origem em bacia de captação desprotegida, submetida a atividades agropecuárias e a vetores de crescimento urbano. Confirma-se, assim, uma preocupação disseminada e crescente no que diz respeito a riscos associados ao abastecimento de água para consumo humano.

Uma crítica comum da abordagem Bayesiana é que a escolha da distribuição *a priori* pode ser questionada se não for baseada em dados confiáveis. Esse questionamento está relacionado com o fato de, em alguns casos, a distribuição *a posteriori* ser muito sensível à escolha da distribuição *a priori*. Nesse caso, dois pesquisadores, usando o mesmo conjunto de dados, podem chegar a diferentes conclusões se usarem diferentes distribuições *a priori*.

A inferência Bayesiana vem sendo utilizada em inúmeros trabalhos para tomada de decisão na bacia hidrográfica, bem como no sistema de abastecimento de água. Por fim, mesmo com algumas limitações deste estudo, conclui-se que a aplicação de técnicas de inferências Bayesianas pode ser utilizada como ferramenta de identificação de perigos em sistemas de abastecimento de água para consumo humano, com base nos preceitos dos Planos de Segurança da Água.

Nesse sentido, cabe também destacar que o presente estudo foi desenvolvido com uso de software de domínio público. Espera-se que esta contribuição estimule novas incursões no tema, refinando o modelo aqui testado.

Assim, para estudos futuros, recomenda-se a aplicação da rede Bayesiana considerando variáveis, tanto qualitativas como quantitativas, tais como qualidade da água, registros de reclamações, intermitência, os dados de agravos, variáveis operacionais, as experiências dos operadores e os dados históricos do monitoramento da qualidade da água.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AINSWORTH, R. Safe piped water: managing microbial water quality. In piped distribution systems. Geneva: World Health Organization, 2004.
- ALMEIDA, C. R. O sistema HACCP como instrumento para garantir a inocuidade dos alimentos. *Higiene Alimentar*. v. 12, n. 53, p. 12-20, 1998.
- AMERICAN PUBLIC HEALTH ASSOCIATION (APHA). Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater. 21^a Ed. Washington: APHA, AWWA, WEF, 2005.
- AS/NZ – AUSTRALIA, NEW ZEALAND. AS / NZS 4360:2004 *Risk Management Standard*. 3. ed. Standard Australia and Standard New Zealand, 2004.
- ATHERHOLT, T.B.; Le CHEVALLIER, M.W.; NORTON, W.D.; ROSEN, J. Effect of rainfall on Giardia and Crypto. *Journal of the American Water Works Association*, v.90, n.9, p.66-80, 1998.
- AZEVEDO, S. M. F. O.; BRANDÃO, C. C. S.; AZEVEDO, L. O., MARINHO, M. M.; MAGALHÃES, V. F.; HUSZAR, V. L. de M.; OLIVEIRA A. C. P. de O.; GOMES, A. M. da A. **Efeitos de fatores físicos e químicos no crescimento de cianobactérias e proposição de técnicas de tratamento de água para remoção de cianobactérias e cianotoxinas**. Brasília: Fundação Nacional de Saúde, 2005.
- BALLANTYNE, D.; MORE D. Relative earthquake vulnerability of water pipes. In: ANNUAL CONFERENCE ENGINEERING AND OPERATION, 1995.
- BARTRAM, J., FEWTRELL, L.; STENSTRÖM, T. A. Harmonised assessment of risk and risk management for water-related infectious disease: an overview. In: **Water Quality: Guidelines, Standards and Health – Assessment of risk and risk management for water-related infectious disease**. (eds L. Fewtrell and J. Bartram). World Health Organization, IWA Publishing. London, UK. 2001. p. 1-16.
- BARTRAM, J.; CORRALES, L.; DAVISON, A.; DEERE, D.; DRURY, D.; GORDON B.; HOWARD, G.; RINEHOLD, A.; STEVENS, M.. *Water safety plan manual: step-by-step management for drinking-water suppliers*. Geneva, World Health Organization, 2009. 102p.
- BASTOS, R. K. X.; BEVILACQUA, P. D.; HELLER, L.; MARTINS-VIEIRA, M. B. C.; BRITO, L. L. A. Abordagem sanitário-epidemiológica do tratamento e da qualidade parasitológica da água para consumo humano: entre o desejável e o possível. In: ANAIS DO CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL, 21, 2001, João Pessoa. Rio de Janeiro: Associação Brasileira de Engenharia Sanitária e Ambiental, 2001, (CD-ROM).
- BASTOS, R. K. X.; BEVILACQUA, P. D.; MIERZWA, J.C. *Análise de risco aplicada ao abastecimento de água para consumo humano*. Programa de Pesquisa em Saneamento Básico, PROSAB, 5. In: Pádua, V. L. (Coord.). Valter Lúcio de Pádua. (Org.). Remoção de micro-organismos emergentes e microcontaminantes orgânicos no tratamento de água para consumo humano. Rio de Janeiro: ABES. 2009, v. 5, p. 327-360.
- BASTOS, R. K. X.; HELLER, L. FORMAGGIA, D. M. E. *Comentários sobre a Portaria MS. Nº. 518 / 2004: subsídios para implementação*. Brasília: Ministério da Saúde, 2005. 92 p.
- BASTOS, R.K.X.; BEZERRA, N. R.; BEVILACQUA, P.D. *Planos de segurança da água: novos paradigmas em controle de qualidade da água para consumo humano em nítida consonância com a legislação brasileira*. In: ANAIS DO CONGRESSO BRASILEIRO DE

- ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL, 24, 2007, Belo Horizonte. Rio de Janeiro: Associação Brasileira de Engenharia Sanitária e Ambiental, 2007, (CD-ROM).
- BLUMENTHAL UJ, FLEISHER JM, STEVE A. ESREY SA, PEASEY A. Epidemiology: a tool for the assessment of risk. In: Fewtrell L, Bartram J (eds.) Water Quality. Guidelines, standards and health: assessment of risk and risk management for water-related infectious disease. London: WHO, IWA Publishing, 2001. p. 135-160.
- BLUMENTHAL, U. J.; PEASEY, A.; RUIZ-PALACIOS, G.; MARA, D.D. Guidelines for wastewater reuse in agriculture and aquaculture: recommended revisions based on new research evidence. London: WELL, 2001 (WELL Study, Task No 68). Disponível em <<http://www.lboro.ac.uk/well>> Acesso em: 22 jan. 2008.
- BRAGA, M. D. **Análise de perigos e pontos críticos de controle – APPCC: estudo de caso no sistema de abastecimento de água da Universidade Federal de Viçosa.** 2007. 132f. Dissertação (Mestrado em Medicina Veterinária) - Universidade Federal de Viçosa. Minas Gerais.
- BRASIL. Conselho Nacional do Meio Ambiente. **Resolução CONAMA n.º 357**, de 17 de março de 2005, Publicada no DOU n 53, de 18 de março de 2005, Seção 1, páginas 58-63. Dispõe sobre a classificação dos corpos de água e diretrizes ambientais para o seu enquadramento, bem como estabelece as condições e padrões de lançamento de efluentes, e dá outras providências Brasília, DF: Ministério do Meio Ambiente, 2005b. Disponível em < www.mma.gov.br/port/conama/res/res05/res35705.pdf />. Acesso em: 15 de novembro de abril de 2008.
- BRASIL. Ministério da Saúde. **Portaria MS nº 518**, de 25 de março de 2004. Estabelece os procedimentos e responsabilidades relativos ao controle e vigilância da qualidade da água para consumo humano e seu padrão de potabilidade, e dá outras providências. Brasília, DF: Ministério da Saúde, 2005a. (Série E, Legislação em Saúde). Disponível em <<http://portal.saude.gov.br/saude/>>. Acesso em: 10 de abril de 2008.
- BRASIL. Ministério da Saúde. **Portaria MS nº 2.914**, de 12 de dezembro de 2011. Estabelece os procedimentos e responsabilidades relativos ao controle e vigilância da qualidade da água para consumo humano e seu padrão de potabilidade, e dá outras providências. Brasília, DF: Ministério da Saúde, 2011. (Série E, Legislação em Saúde).
- BRASIL. **Surto de toxoplasmose no município de Santa Isabel do Ivaí – Paraná.** Edição: Ministério da Saúde: Secretaria de Vigilância em Saúde. Local: Brasília, 2002. Série: Boletim Eletrônico, p 13. Disponível em: <<http://www.saude.gov.br/portal>>. Acesso em: 12 de março de 2010.
- BUSCHINELLI, C. C. A.; SILVA, A. S.; RODRIGUES, I. A.; MACHADO, R.E. **Índice de Sustentabilidade Ambiental do Uso da Água (ISA_ÁGUA): municípios da região do entorno do Rio Poxim, SE.** In: Boletim de Pesquisa e Desenvolvimento 22 – EMBRAPA. Jaguariúna, 2004.
- CARNEIRO, A. L.; SILVA, W. T. Introdução a Redes Bayesianas. Brasília: Universidade de Brasília, Departamento de Ciência da Computação, 1999. (Relatório de Pesquisa CIC/UnB – 09/99).
- CATALDI, M., Machado, B. G. F., SILVA, S. B., GUILHON, L. G. F., ACHÃO, C. C. **Aplicação das Técnicas de Mineração de Dados como Complemento às Previsões Estocásticas Univariadas de Vazão Natural: Estudo de Caso para a Bacia do Rio Iguaçu.** Revista Brasileira de Recursos Hídricos- RBRH. Vol. 12, nº 3, p. 83-92. 2007.
- CDC (2000). *Safe water systems for the developing world: a handbook for implementing household-based water treatment and safe storage projects.* Atlanta, 2000. 218p.
- CEPIS - CENTRO PANAMERICANO DE INGENIERÍA SANITARIA Y CIENCIAS DEL AMBIENTE. Ciclo: Tratamiento, Serie: Filtración rápida. Evaluación. (Programa Regional

- HPE/OPS/CEPIS de Mejoramiento de La Calidad del Agua para Consumo Humano, Manual IV). Lima, Peru: CEPIS, 1992.
- CERQUEIRA, D. A. **Remoção de oocistos de *cryptosporidium* e indicadores no tratamento de água por ciclo completo, filtração dupla e filtração direta descendente, em escala piloto**. 2008. 199f. Tese (Doutorado em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos) - Escola de Engenharia, Universidade Federal de Minas Gerais, Minas Gerais.
- CHARNIAK, E. "Bayesian Network without Tears". IA Magazine, USA. 1991. *ciency in achieving safe drinking-water*. Geneva, World Health Organization and IWA. 2004
- CODEX ALIMENTARIUS COMMISSION. Guidelines for the application of the hazard analysis critical control point (HACCP) **system**. Rome: Food and Agriculture Organization/ World Health Organization, 1993. [Alinorm 93/13A. Appendix B].
- COELHO, A. S. G. Abordagem Bayesiana na análise genética de populações utilizando dados de marcadores moleculares. 2002. Tese (Doutorado em Agronomia) – USP. Escola Superior de Agricultura, Piracicaba.
- COMPANHIA DE TECNOLOGIA AMBIENTAL (CETESB). Índice de Estado Trófico - IET Secretaria de Meio Ambiente do Estado de São Paulo. 2006. Disponível em: <<http://www.cetesb.sp.gov.br>>. Acesso em: 18 de outubro de 2008.
- COMPANHIA DE TECNOLOGIA AMBIENTAL (CETESB). Relatório de Qualidade das Águas Interiores no Estado de São Paulo: 2009. São Paulo: CETESB, 2009. (Série Relatórios).
- DAVIES, C.M.; FERGUSON, C.M.; KAUCNER, C.; KROGH, M.; ALTAVILLA, N.; DEERE D.A.; ASHBOLT, N.J. Dispersion and Transport of *Cryptosporidium* Oocysts from Fecal Pat under Simulated Rainfall Events. *Applied And Environmental Microbiology*. v.70, n.2, p. 1151–1159, 2004.
- DAVISON, A., and J. BARTRAM. HACCP and WHO Water Safety Plans. In Proc. of the NSF Conference on Risk Management Strategies for Drinking Water Utilities. 2004. Disponível em: <www.nsf.org/cphe/cphe_rms_presentations.html> Acesso em 12 de dezembro de 2009.
- DAVISON, A., HOWARD, G., STEVENS, M., CALLAN, P., KIRBY, R., DEERE, D. e BARTRAM, J. *Water safety plans. Protection of the human environment. Water, sanitation and health*. Geneva: World Health Organization. (WHO/SDE/WSH/02.09), 2002. 50p.
- DAVISON, A.; HOWARD, G.; STEVENS, M.; FEWTRELL, L.; DEERE., D.; CALLAN, P.; BARTRAM, J. (2004). *Water safety plans*. Geneva: World Health Organization.
- De CICCIO, Francesco e FANTAZZINI, Mario Luiz; "Tecnologias Consagradas de Gestão de Riscos"; Série Risk Management; São Paulo; 2003.
- DEWETTINCK, T., VAN HOUTTE, E., GEENENS, D., VAN HEGE, K., VERSTRAETE, W. Hazard Analysis and Critical Control Point (HACCP) to guarantee microbial safe water reuse and drinking water production: a case study. **Water Science and Technology**. Vol. 43, nº 12, p.31-38. 2001.
- DHA - Department of Health and Ageing. Environmental health risk assessment. Guidelines for assessing human health risks from environmental hazards. Canberra: Department of Health and Ageing and Health Council, 2002, 258p. Disponível em: <www.dhs.vic.gov.au/nphp/enhealth/council/pubs/pdf/envhazards.pdf>. Acesso em 12 de dezembro de 2009.
- DI BERNARDO, L; DI BERNARDO, A; CENTURIONE FILHO, P. L. Ensaios de tratabilidade de água e de resíduos gerados em estações de tratamento de água. São Carlos-SP: Rima, 2002. 236p.

- DIAS, G. M. F., M.S. **Estudo integrado da qualidade microbiológica da água da bacia do Ribeirão São Bartolomeu: análise epidemiológica, ambiental e espacial.** Universidade Federal de Viçosa, 2007. 132f. Dissertação (Mestrado em Medicina Veterinária) - Universidade Federal de Viçosa, Minas Gerais.
- FEWTRELL, L.; BARTRAM, J. (eds). *Water Quality: guidelines, standards and health. Assessment of risk and risk management for water-related infectious disease.* London, UK.: World Health Organization, IWA Publishing, 2001, 24p.
- Fok, N. and K.Emde. *HACCP in Water Treatment – What It Is and What It Isn't.* In Proc. of the NSF Conference on Risk Management Strategies for Drinking Water Utilities. 2004. Disponível em: www.nsf.org/cphe/cphe_rms_presentations.html. Acesso em: 27 de setembro de 2009.
- FOX, K. R.; DUGAN, N.; MILTNER, R.; LYTLE, D. A.; WILLIAM D.; PARRETT, C.; FELD, C.; OWENS, J.; RICE, E.; JOHNSON, C. H. Comparative removal of *Cryptosporidium* ssp. and surrogates in a low flow pilot plant system. In: WATER QUALITY TECHNOLOGY CONFERENCE, 1998, San Diego, USA: AWWA, 1998.
- FRIEDMAN, N.; GOLDSZMIDT, M.; LEE, T. J. Bayesian network classification with continuous attributes: getting the best of both discretization and parametric fitting. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON MACHINE LEARNING, 15., 1998. Proceedings ... [S.l.]: Morgan Kaufmann, 1998. p.179-187.
- GELDREICH, E.E. **Microbial quality of water supply in distribution systems.** Boca Raton: Lewis Publishers, 1996. 504p.
- GODFREY, S. e HOWARD, G. *Water safety plans: book 2 – supporting water safety management for urban piped water supplies in developing countries.* London: **Water, Engineering and Development Centre**, Loughborough University, 2005.
- GODFREY, S.; NIWAGABA, C; HOWARD, G; TIBATEMWA, S. *Water safety plans for developing countries: a case study from Kampala, Uganda.* London: **Water, Engineering and Development Centre**, Loughborough University, 2002.
- GRISI, C.C.H. e BRITTO, R.P. Técnica de cenários e o método Delphi: uma aplicação para o ambiente brasileiro. In: SEMINÁRIOS EM ADMINISTRAÇÃO, 4, São Paulo, 2003. Anais... SEMEAD: 2003 (CD rom).
- GUNNARSDOTTIR, M.J. and L.R. GISSURARSON. *HACCP in Icelandic Water Supply – evaluating eight years of experience.* In Proc. Of the NVK 2006 Conference. 2006.
- HAAS, C.N, ROSE, J., GERBA, C.P. *Quantitative microbial risk assessment.* New York: John Wiley & Sons, 1999. 449p.
- HAVELAAR, A. H. *Application of HACCP to drinking water supply.* Food Control, v. 5, n. 3, p. 215-220, 1994.
- HEALTH CANADA. *Federal Provincial Territorial Committee on Drinking Water. Guidelines for Canadian drinking water quality. Part I: Approach to the derivation of drinking water guidelines.* Ottawa: Health Canada, 1995. Disponível em: <<http://www.hc-sc.gc.ca/hecs-sesc/water/pdf/part.1.pdf>>. Acesso em: 19 de setembro de 2009.
- HEALTH NEW ZEALAND. *A Framework on How to Prepare and Develop Public Health Risk Management Plans for Drinking-Water Supplies.* Wellington, New Zealand: Ministry of Health. 2005. Disponível em: <<http://www.moh.govt.nz>> Acesso em: 10 de setembro de 2008.
- HELLER, L.; ANTUNES, C. M. F. Associação entre condições de saneamento e de higiene e diarreia infantil em Betim-MG. In: Seminário Internacional, 1997. Saneamento e saúde nos países em desenvolvimento. Rio de Janeiro. v. 1.

- HERZ, R. e LIPKOW, A. Life cycle assessment of water mains and sewers. **Water, Science and Technology**, v.2, n.4, p.51-72, 2002.
- HERZ, R. *Exploring rehabilitation needs and strategies for water distribution networks*. **Aqua**, v.47, n.6, p.275-283, 1998.
- HOKSTAD, P., ROSTUM, J., SKLET, S., ROSÉN, L., PETTERSSON, T.J.R., LINDHE, A., STURM, S., BEUKEN, R., KIRCHNER, D. and NIEWERSCH, C. *Methods for risk analysis of drinking water systems from source to tap: Guidance report on risk analysis*. Deliverable n°. D4.2.4, TECHNEAU.
- HOWARD G. *Urban water supply surveillance — a reference manual*. Water, Engineering and Development Centre/Department for International Development, Loughborough University, UK, 2002.
- HOWARD, G. *Water safety plans for small systems: Applying HACCP principles for cost-effective monitoring in developing countries*. *Water, Sci. Technol.*, 2003, **47**(3), 215-220.
- HOWARD. G. e BARTRAM J. (2003). Domestic Water Quantity, Service Level and Health. WHO/SDE/WSH/03.02. WHO. Geneva. Disponível em <http://www.who.int/entity/water_sanitation_health/diseases/WSH03.02.pdf>. Acesso em: 23 de abril de 2007.
- HRUDEY, S. E.; HRUDEY, E. J. Drinking-water risk management principles for a total quality management framework. **Journal of Toxicology and Environmental Health Part A**, v. 67,n. 12, p. 1555-1566, 2004.
- HRUSCHKA JR., E. R.; SILVA, W. T. Propagação de crenças em redes Bayesianas. Brasília: Universidade de Brasília, Departamento de Ciência da Computação, 1997. (Relatório de Pesquisa CIC/UnB – 02/97).
- HUNTER P. R.; FEWTRELL, L. *Acceptable risk*. In: FEWTRELL, L; BARTRAM J. (ed.) *Water quality guidelines, standards and health: assessment of risk and risk management for water related infectious disease*.Geneva: WHO, pg. 207-227. 2001.
- IEH. *Risk Assessment Approaches used by UK Government for Evaluating Human Health Effects of Chemicals*. Institute for Environment and Health. Leicester.1999.
- JORDAN. M. I. *Learning in Graphical Models*.1ª Edição. Springer, 1998. P. 644.
- KADIE, C. M.; HOVEL, D.; HORVITZ, E. MSBNx: a component-centric toolkit for modeling and inference with Bayesian networks. Redmond: Microsoft, 2001.
- KIENE, L.; LU, W. e LEVI, Y. Relative importance of the Phenomena Responsible for Chlorine Decay in Drinking-Water Distribution Systems. **Water, Science and Technology**. v.38, n.6, p. 216-227, 1998.
- KUSLIKIS, B. e B. WHITE. *Implementing a Sustainable, Integrated Risk Management System for Water Safety and Quality*. In Proc. of the NSF Conference on Risk Management Strategies for Drinking Water Utilities. 2004.Disponível em: <www.nsf.org/cphe/cphe_rms_presentations.html> Acesso em: 23 de maio de 2008.
- LADEIRA, M.; D.C. SILVA, VIEIRA, M.S.; ONISHI, R.N.; CARVALHO, R.N.; SILVA, W.T. Ferramenta aberta e independente de plataforma para redes probabilísticas. In: IV ENCONTRO NACIONAL DE INTELIGÊNCIA ARTIFICIAL-ENIA, XXIII Congresso da SBC, Anais do XXIII Congresso da SBC – IV, Campinas: 2003.
- LADEIRA, M.; SILVA, W. T. Mineração de dados em Redes Bayesianas. In: XXII CONGRESSO DA SOCIEDADE BRASILEIRA DE COMPUTAÇÃO. [on line], jul 2002. Disponível: <<http://www.inf.ufsc.br/sbc2002/jai6.html>> Acessado em: 18 de novembro de 2010.

- LANINI, S. Water management impact assessment using a Bayesian network model. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON HYDROINFORMATICS, 7th, HIC 2006, Nice, FRANCE, 2006.
- LARSON, H. J. Introduction to probability theory and statistical inference. 3rd ed. New York: John Wiley, 1982.
- LeCHEVALLIER M.W. The Case for Maintaining a Desinfectant Residual. **Journal of the American Water Works Association**, v.91, n.1, p.86-94, 1999a.
- LeCHEVALLIER MW, Au K-K. *Water treatment and pathogen control: Process effi-*
- LUGER, G.F. Artificial intelligence: its roots and scope. In: **Artificial intelligence: structures and strategies for complex problem solving**. 5 ed. s.l.: Addison-Wesley. 2005. p.1-34. Disponível em: <<http://www.cs.unm.edu/~luger/ai-final/chapter1.html>>. Acesso em: 29 setembro. 2010.
- MARCKA, E. Panorama dos Sistemas Públicos de Abastecimento no País. Programa Nacional de Combate ao Desperdício de Água. Presidência da República. 2004. (Documentos Técnicos de Apoio).
- MARTEL, K., G. KIRMEYER, A. HANSON, M. STEVENS, J. MULLENGER, and D. DEERE. Application of HACCP for Distribution System Protection. Denver, Colo.: AwwaRF, AWWA and IWA Publishing. 2006. Disponível em: < http://www.epa.gov/ogwdw/disinfection/tcr/pdfs/issuepaper_tcr_haccp-strategies.pdf.> Acesso em: 23 de setembro de 2010.
- MENDES, C. G. N. Tratamento de Águas para Consumo Humano - Panorama Mundial e Ações do PROSAB. In: Valter Lúcio de Pádua. (Org.). **Contribuição ao Estudo da Remoção de Cianobactérias e Microcontaminantes Orgânicos por Meio de Técnicas de Tratamento de Água para Consumo Humano**. 1 ed. Petrópolis: SERMOGRAF, 2006, v. 1, p. 1-22.
- MERRITTA. W. S., TICEHURSTA, J.L. POLLINO, C. E. FU. B. The value of using Bayesian Networks in Environmental Decision Support Systems to support natural resource management. In David A. Swayne, Wanhong Yang, A. A. Voinov, A. Rizzoli, T. Filatova (Eds.). *iEMSs 2010: International Congress on Environmental Modelling and Software, International Environmental Modelling and Software Society (iEMSs)*, 2010.
- MORTIMORE, S. e WALLACE, C. APPCC Enfoque Práctico. Edictorial Acribia S.A., 2^a. edición Zaragoza. Espana. 427p. 2001.
- MOSSEL, D. A. A.; STRIJK, C. B. Assessment of the microbial integrity, sensu G.S Wilson, of piped and bottled drinking water in the condition as ingested. *International Journal of Food Microbiology*, v. 92, p. 375-390, 2004.
- NASSAR, S. M. Tratamento de Incerteza: Sistemas Especialistas Probabilísticos. 2005. Disponível em<<http://www.inf.ufsc.br/~silvia/disciplinas/sep/MaterialDidatico.pdf>>. Acesso em 25 de novembro de 2011.
- NHMRC - National Health and Medical Research Council, NRMMC - Natural Resource Management Ministerial Council. *Australian drinking water guidelines*, 6. Canberra: NHMRC, NRMMC, 2004, 615p. (National water quality management strategy series). Disponível em: < <http://www.nhmrc.gov.au/~publications/~synopses/eh19syn.htm>> Acesso em: 05 de abril de. 2010.
- NOKES, C., TAYLOR, M. *Towards public health risk management plan implementation in New Zealand, in Umweltbundesamt*. In: Water Safety Conference Abstracts, Scholl, O. and Chorus, I. (eds), Berlin, 28–30 April, 2003.
- NRMMC, 2006. NRMMC, EPHC and AHMC. Australian guidelines for water recycling: managing health and environmental risks: phase 1, Natural Resource Management

- Ministerial Council, Environment Protection and Heritage Council, Australian Health Ministers' Conference, Australia. 2006.
- OLIVEIRA, D. C. **Aplicação da "análise de perigos e pontos críticos de controle" no tratamento de água para consumo humano**. 2011. 132f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal de Viçosa, Minas Gerais.
- PEAR, J. "Probabilistic Reasoning in Intelligent Systems: Network of Plausible Inference", Morgan Kaufmann, San Mateo, California, USA. 1988.
- PEARL, J. Probabilistic Reasoning in Expert Systems. San Mateo, CA: Morgan Kaufmann. 1988.
- PESTICIDE ACTION NETWORK (PAN). **Pesticide Database. Carcinogenicity**. Last updated 2005. Disponível em: <http://www.pesticideinfo.org/Docs/ref_toxicity3.html>. Acesso em: 07 de novembro de 2010.
- PIKE, W. A. Modeling drinking water quality: Violations with Bayesian networks. Journal of the American Water Resources Association: 40(6), 1563-1578. 2004.
- PIOLA, S. F.; VIANNA, S. M.; VIVAS-CONSUELO, D. Estudo Delphi: atores sociais e tendências do sistema de saúde brasileiro. **Caderno de Saúde Pública do Rio de Janeiro**, n.18, p.181-190, 2002.
- QUEIROZ, C. N. **Redes Bayesianas no gerenciamento e mensuração de riscos operacionais**. Universidade de São Paulo. Dissertação (Mestrado em Engenharia) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. 122 pg. 2008.
- RAMONI, M.; SEBASTIANI, P. Learning Bayesian networks from incomplete databases. In: CONFERENCE ON UNCERTAINTY IN ARTIFICIAL INTELLIGENCE, 11., 1995. Proceedings... [S.l.]: Morgan Kaufman, 1995. p.401-408.
- RAMONI, M.; SEBASTIANI, P. Learning Bayesian networks from incomplete databases. In: CONFERENCE ON UNCERTAINTY IN ARTIFICIAL INTELLIGENCE, 11., 1995. Proceeding. [S.l.]: Morgan Kaufman, 1995. p.401-408
- RENOOIJ, S., e WITTEMAN, C. (1999). Talking Probabilities: Communicating probabilistic information with words and numbers. International Journal of Approximate Reasoning 22: 169-194.
- ROSÉN, L., HOKSTAD, P., LINDHE, A., Sklet, S. and RØSTUM, J. *Generic framework and methods for integrated risk management in water safety plans*. Deliverable n°. D 4.1.3, D 4.2.1, D 4.2.2, D 4.2.3, 2007. 2009. TECHNEAU.
- ROSSMAN, L. A. EPANET 2. Users Manual. U.S. Environmental Protection Agency – EPA. 200p. 2000 Cincinnati, Ohio. Disponível em: <http://www.epa.gov/nrmrl/wswrd/epanet.html>> Acesso em ago. 2008.
- RUSSELL, S. e NORVIG, P. **Artificial Intelligence: A Modern Approach**. New Jersey: Prentice Hall, 2005, 932 p.
- SILVA, C. H. C. **Identificação de fragilidades ambientais na bacia do Ribeirão São Bartolomeu, Viçosa-MG utilizando análise multicritério**. 2010. 120f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Viçosa, Minas Gerais.
- SILVA, J.F. e RODRIGUES, S.C. Síntese Ambiental e Evolução do Uso e Ocupação do Solo da Bacia Hidrográfica do Córrego do Salto, Uberlândia (MG). In: CAMINHOS DE GEOGRAFIA - revista on line. Uberlândia, 2004. Etapas na Execução da Metodologia Delphi
- SMITH, H. V.; GRIMASON, A. *Giardia and Cryptosporidium in water and wastewater*. 2003. In: MARA, D.; HORAN, N. (eds). *The handbook of water and wastewater microbiology*. Elsevier, Amsterdam, The Netherlands, p.695-756 *apud* WORLD HEALTH

- ORGANIZATION (WHO). Guidelines for Drinking Water Quality. *Cryptosporidium*. EHC *Cryptosporidium* draft 2. 02 January 2006a.
- SOARES, E. G. S. **Mapeamento de perigos em rede de distribuição de água para consumo humano**. 2009. 92f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Viçosa, Minas Gerais.
- SOLO-GABRIELE, H.M.; LEROY AGER, A.; FITZGERALD LINDO, J.; DUBON, J.M.; NEUMEISTER, S.M.; KARAS BAUM, M.; PALMER, C.J. *Occurrence of Cryptosporidium oocysts and Giardia cysts in water supplies of San Pedro Sula, Honduras*. *Pan American Journal of Public Health*, v.4, n.6, p.398-400, 1998.
- STEVENS, M., HOWARD, G., DAVISON, A., BARTRAM, J. and DEERE, D. Risk management for distribution systems. Chapter 7 In *Safe Piped Water: Managing Microbial Water Quality in Piped Distribution Systems*. Edited by Richard Ainsworth. Published by IWA Publishing, London, UK. 2004.
- STREHER, A. e SCHÄFER, A. **Utilização do Índice Químico (BACH, 1980) no Rio Três Forquilhas, RS, como Instrumento de Avaliação da Qualidade da Água**. In: 59ª Reunião Anual da SBPC. Disponível em: <<http://www.servicos.sbpnet.org.br/sbpnet/59ra/senior/>> livroelettronico/ resumos/R7242-1.html. Acesso em: 18/09/2008.
- TARDELLI FILHO, J. Controle e Redução de Perdas. In: **Abastecimento de Água**. Tsutiya, M.T. (org.). Departamento de Engenharia Hidráulica e Sanitária da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. São Paulo, 2004.
- TECHNEAU. *Safe Drinking Water from Source to Tap - State of the Art and Perspectives*. TECHNEAU NEWSLETTER, nº 7, de 2009 17-19 June, Maastricht, The Netherlands. Disponível em< www.techneau.org/index.php?id=45>. Acesso em 28 de dezembro de 2010.
- USEPA - United States Environmental Protection Agency. *Guidelines for carcinogen risk assessment*. Washington DC: USEPA; 2005.
- USEPA - United States Environmental Protection Agency. Setting standards for safe drinking water. 2006. Disponível em: <http://www.epa.gov/safewater/standard/setting.html>. Acesso em 15 de dezembro de 2009.
- USEPA. *Risk Assessment Guidance for Superfund*. Volume 1. Human Health. Evaluation Manual (Part A).1989. Disponível em: ,http://www.epa.gov/oswer/riskassessment/ragsa/pdf/rag-sa-vol1-pta_complete.pdf>.Acesso em: 7 de dezembro de 2008.
- USEPA. *The effectiveness of Disinfectant Residuals in the Distribution System*. 2004. Disponível em: <http://www.epa.gov/safewater/disinfection/regulation_revisions.html>. Acesso em 25 de março de 2008.
- VESEY, G.; SLADE, J. S.; BYRNE, M.; SHEPHERD, K.; FRICKER, C. R. A new method for the concentration of *Cryptosporidium* oocysts from water. *Journal of Applied Bacteriology*, v. 75, p. 82-86, 1993.
- VIEIRA, J. M. P; MORAES, C. Manual para a elaboração de planos de segurança da água para consumo humano. Lisboa: Instituto Regulador de Águas e Resíduos, Universidade do Minho; 2005. 175p. (Série Guias Técnicos n.º 7).
- WESLEY J. DAWSEY, B. S. MINSKER E VICKI. L. VanBlaricum. J. Bayesian Belief Networks to Integrate Monitoring Evidence of Water Distribution System Contamination. *Journal of Water Resources Planning and Management*: 132(4):132-234, 2006.
- WESTRELL, T. *Microbial risk assessment and its implications for risk management in urban water systems*. Thesis Department of Water and Environmental Studies. Linköping University. Linköping, Sweden. 2004.

- WHO - World Health Organization. *Guidance on the regulatory assessment of HACCP*. Report of a Joint FAO/WHO. Consultation on the Role of Government Agencies in Assessing HACCP, WHO/FSF/FOS/98.5. Geneva, WHO. 1998.
- WHO - World Health Organization. *Guidelines for Drinking Water Quality*. Vol. 1, Recommendations. 3rd ed. 2004. Disponível em: <http://www.who.int/water_sanitation_health/dwq/GDWQ2004web.pdf>http://www.who.int/watersanitation_health/dwq/GDWQ2004web.pdf>. Acesso em: 18 de maio de janeiro de 2007.
- WHO - World Health Organization. *Water Safety Plans – Managing drinking-water quality from catchment to consumer*. Genebra. 244p. 2005a.
- WHO - World Health Organization. WORLD HEALTH ORGANIZATION (WHO). *Guidelines for Drinking Water Quality* [electronic resource]: incorporating first addendum. Vol. 1, Recommendations. 3rd ed. 2006. Disponível em: <http://www.who.int/water_sanitation_health/dwq/gdwq0506.pdf>. Acesso em: 10 de setembro de 2008.
- WHO - World Health Organization. WORLD HEALTH ORGANIZATION (WHO). *Guidelines for Drinking Water Quality* [electronic resource]: 4th ed. 2011.
- WILLIAM, A. P. Modelling drinking water quality violations with bayesian networks. **Journal of the American Water Resources Association (JAWRA)**: 40(6):1563–1578, 2004.
- WRIGHT, James T. C. A técnica Delphi: Uma ferramenta útil para o planejamento do Brasil?. In: Encontro Brasileiro de Planejamento Empresarial - "Como Planejar 86", III, 28-29 nov. 1985, Anais. São Paulo: SPE - Sociedade Brasileira de Planejamento Empresarial, 1986, p. 199-207.


ANEXOS

Anexo 1 - Questionário para levantamento das informações na Bacia Hidrográfica do Ribeirão São Bartolomeu, Viçosa, Minas Gerais, 2008

Questionário parte I

UNIVERSIDADE FEDERAL DE VIÇOSA DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL BOLETIM DE CADASTRO RURAL DA BACIA DO RIBEIRÃO SÃO BARTOLOMEU				Nº do GPS: _____			
I - DADOS DE IDENTIFICAÇÃO DO PROPRIETÁRIO DO IMÓVEL				III - USO E OCUPAÇÃO DA PROPRIEDADE			
Nome: _____				Cultivos/Criações/Quantidades/Fontes de água utilizada/Destino das fezes/produtos			
Apelido: _____ Sexo: M () F ()				Número do Ponto			
Tempo de moradia: _____ Número de pessoas: _____				Criação animal			
Ponto de referência da propriedade:				Quant./Animais			
Endereço: _____				Fonte de água			
Sub-bacia: _____				Quant. de água			
Ocupação do proprietário:				Dest. dejetos			
Coordenada geográfica da propriedade (porteira): _____ Nº do Ponto _____				Existe Tratamento? () Sim () Não			
Área estimada da propriedade:				Dejetos			
Situação da documentação imóvel: () Arrendatário () Dono () Outro				Criadouro			
Principais fontes da renda familiar? () cultivo () criação () Extrativismo				Outros especificar: _____			
() artesanato () empresa () INSS () Outra especificar: _____				Tipo de cultivo			
Situação de moradia: () Tijolo () Taipa () Madeira () Material aproveitado () Adobe () Pan a pique				Área cultivada			
() Outras especificar: _____				Faz irrigação? () Sim () Não			
Forma de energia elétrica: () Rede estadual () Gerador próprio () Não existe				Fonte de água			
() Outras especificar: _____				Quantidade Estimada de água			
Usos da água: () consumo doméstico () irrigação () Criação de peixes () Criação de animais				() Milho () Sim () Não			
() Outras especificar: _____				() Arroz () Sim () Não			
Fonte de água para consumo humano:				() Feijão () Sim () Não			
Número do Ponto _____				() Café () Sim () Não			
Esgotamento sanitário:				() Cana-de-açúcar () Sim () Não			
Número do Ponto _____				() Mandioca () Sim () Não			
() Naascente () Fossa -sumidouro				() Tomate () Sim () Não			
() Poço raso () Fossa -seca				() Banana () Sim () Não			
() Poço profundo () Rede pública				() Verduras () Sim () Não			
() Abast. Público () Cúa aberto				Outros especificar: _____			
() Ribeirão/Rio () Rio/Ribeirão				Se faz irrigação:			
() Açude () Não existe				Qual a potência da bomba? _____			
() Outras especificar: _____ () Outras especificar: _____				Período de funcionamento? _____			
Acondicionamento da água para consumo humano:				Utiliza defensivo agrícola? () Não () Sim. Se sim: _____			
Número do Ponto _____				Quais os períodos do ano? _____			
() Caixa d'água () Larto () Queimado				Quantas horas no dia manuseia os produtos químicos? _____			
() Outras especificar: _____ () Cúa aberto				Quais os defensivos utilizados especificar ? _____			
() Enterrado				_____			
() Coletado				_____			

Questionário parte II

		UNIVERSIDADE FEDERAL DE VIÇOSA DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL BOLETIM DE CADASTRO RURAL DA BACIA DO RIBEIRÃO SÃO BARTOLOMEU		
III - USO E OCUPAÇÃO DA PROPRIEDADE (Cont.)				
ÁREA DE FLORESTA	ÁREA ESTIMADA (ha)	ÁREA CULTIVADA	ÁREA ESTIMADA (ha)	ÁREA ESPECIAIS (cemitério, escola, igreja, lazer, aeroporto, ETA, ETE, Piscicultura, Aterro sanitário, Hidroelétrica, recreação e lazer, dentre outros).
Área de Proteção Permanete (APP)		AGRICULTURA		Nº do Ponto
		Annual		
Reserva Legal (RL)		Permanente		
Outras especificar:		PASTAGEM		
		Natural		
		Plantada		
TOTAL DE FLORESTA		Outras especificar:		
ÁREA REFLORESTADA		ÁREA OCIOSA	ÁREA ESTIMADA (ha)	
Eucalipto		Permanente		
Pinus		Eventual		
Outras especificar:		Outras especificar:		
ÁREA INAPROVEITÁVEL	ÁREA ESTIMADA (ha)	ÁREA HIDROGRÁFICA		OBSERVAÇÕES:
Pedreira		NATURAL	Nº do Ponto Área (ha)	
Banhado		Lago		
Outras especificar:		Outras especificar:		
OBSERVAÇÕES:		EDIFICADA		
		Açude		
		Barragem		
		Outras especificar:		
Responsável pelo preenchimento:		Quadricula da Bacia Hidrográfica (A até U):		
Data do preenchimento:				

Anexo 2 - Questionário do método Delphi, Viçosa, Minas Gerais, 2008

Questionário método Delphi - Parte Introdutória



UNIVERSIDADE FEDERAL DE VIÇOSA – UFV
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL



FUNDAÇÃO ARTHUR BERNARDES

Apresentação

Essa consulta é parte integrante do Projeto Piloto de pesquisa sobre Plano de Segurança da Água (PSA) no município de Viçosa, a ser executado pela Universidade Federal de Viçosa (UFV) no âmbito do programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, na área de concentração de saneamento ambiental e sistema de informação geográfica, sob a orientação dos Professores Adjuntos do Departamento de Engenharia Civil – UFV (DEC/UFV) Dr. Rafael Kopschitz Xavier Bastos e Dr. Carlos Antônio Oliveira Vieira e Dr. e Departamento de Solos Dr. Elpídio Inácio Fernandes Filho.

Uma das etapas das pesquisas consiste em consultar a opinião de especialistas sobre a importância de algumas variáveis relacionadas à definição de critérios para identificação de áreas de riscos em manancial de abastecimento de água. A ponderação dessas variáveis será desenvolvida a partir da atribuição de pesos que representarão o grau de importância de cada uma, dentro do seu grupo específico. Posteriormente, através de método estatístico apropriado, essas variáveis serão agregadas para constituir os critérios que interferem na qualidade da água em manancial de abastecimento de água.

O questionário foi desenvolvido de modo que o especialista não disponibilize muito tempo para respondê-lo. As respostas serão tratadas de forma agregada, sem identificação dos respondentes, entretanto o trabalho consignará o devido crédito aos especialistas que participarem. Ressalta-se que o especialista poderá se abster de julgamento, bem como tecer comentários em campo específico.

Solicitamos que a resposta desse questionário seja enviada até o dia **30 de setembro de 2008**. Agradecemos sua colaboração e nos colocamos à disposição para quaisquer esclarecimentos que se façam necessários. Ressaltamos a importância de sua participação para a continuidade dos trabalhos e enriquecimento das pesquisas.

Carlos H. Crespo

Aluno do mestrado em Informações Geográficas da UFV/DEC
(31) 8441- 4192
carcrespo_ufv@yahoo.com.br

Carlos Antônio Oliveira Vieira
Professor do Departamento de Engenharia Civil, Engenheiro Agrimensor, PhD em Geografia Física (University of Nottingham, UK), Pós-Doutorado em Geomática (University of Melbourne, Australia).

carlos.vieira@ufv.br
(31) 38992036

Nolan Ribeiro Bezerra

Aluna do doutorado em Saneamento Ambiental da UFV/DEC
(31) 38992356/93031795
nolanbezerra@gmail.com

Rafael Kopschitz Xavier Bastos
Professor do Departamento de Engenharia Civil, Engenheiro Civil, PhD em Engenharia Sanitária (University of Leeds, UK)

rkxb@ufv.br

IR PARA INTRODUÇÃO PARA DEFINIÇÃO CRITÉRIOS

Questionário método Delphi - Parte Introdutória – definição dos critérios

A quantidade de água que escoar depende da intensidade da chuva e da capacidade de infiltração do solo. Quando a água da chuva atinge o solo e escoar sobre ele, inicia-se um processo de dissolução e arraste que transportará material retirado do solo levando-os até os corpos d'água. Estes compostos podem incluir desde ácidos húmicos até compostos orgânicos sintéticos como detergentes, pesticidas e solventes (PORTO *et al.*, 1991).

A qualidade da água superficial depende do clima, da geomorfologia da região, da vegetação, do tipo de ecossistema aquático e da influência do homem. Dessa forma, os critérios a serem adotados para elaboração do mapa de perigos na bacia são: i) Declividade, ii) Tipos de solos, iii) Fluxo acumulado, iv) uso e ocupação do solos.

Em técnicas de análise multicritérios procura-se agrupar todos os critérios em uma mesma escala, de forma que possam ser ponderados. Neste trabalho optou-se pela atribuição de valores de 0 a 100 para várias 'classes' de cada critério, sendo que 'zero' implicaria 'impacto nulo' ou 'desprezível' sobre a qualidade da água e, no outro extremo, 100 implicaria 'impacto máximo'. Cumpre destacar que, para efeito deste trabalho, 'impactos sobre a qualidade da água' referem-se a 'perigos' ('grau de risco potencial') introduzidos, tendo em vista o tratamento e abastecimento para consumo humano.

A fim de se colocar todos os critérios em uma mesma escala para que eles possam ser ponderados e desta forma realizar a análise multicritérios, e conseqüentemente gerar o mapa de perigo da bacia, pede-se para avaliar as diferentes classes estabelecidas, atribuindo valores que variam de 0 a 100, onde:

Classe	Critério
0	Implicaria 'impacto nulo' ou 'desprezível' sobre a qualidade da água para o abastecimento
100	Implicaria 'impacto máximo' sobre a qualidade da água para o abastecimento

Os critérios devem possuir classes com valores máximos em valores próximo ao mínimo, não necessariamente zero, a fim de que aquela classe não se torne ausente no processo de geração do mapa de risco.

Como orientação às respostas, o informante deve imaginar que tipo de perigo poderia ser introduzido, preponderantemente, em cada critério avaliado, por exemplo, substâncias químicas inorgânicas (ex.: ferro e manganês), agrotóxicos, microrganismos, elevação de turbidez, cor, etc..

Para melhor homogeneização das respostas, um perigo decorrente da poluição por indústrias, agropecuárias, mineração, etc é sempre pior se comparado há um perigo das atividades de assoreamento, devido à possibilidade de tratamento dado a eles nas ETAs.

VOLTAR PARA PÁGINA INICIAL

IR PARA AVALIAÇÃO DOS CRITÉRIOS

Questionário do método Delphi (Avaliação dos Critérios):

Caso você fosse atribuir grau de perigo que interfere na qualidade da água para o abastecimento, que grau de perigo você atribuiria a cada uma das seguintes classes?

CRITÉRIO 1 – Declividade

Classes de declividade (%)	Grau de perigo (0-100)
< 3	
3 a 8	
8 a 20	
20 a 45	
45 a 75	
> 75	

Você acha que o número de classes é adequado?

Caso negativo, sugira outro número de classes e respectivos intervalos?

Se julgar necessário, justifique sua resposta.

CRITÉRIO 2 – Tipos de Solos

Classes de solos	Grau de perigo (0-100)
Cambissolo Háplico	
Gleissolo Háplico	
Latossolo Vermelho-Amarelo	
Argissolo Vermelho-Amarelo	

OBS.: Procura-se avaliar qual o impacto das diferentes classes de solos existentes na paisagem na qualidade da água que chega até a estação de tratamento. Na avaliação, sugere-se levar em conta tanto a água que escorre superficialmente que pode transportar sedimentos, matéria orgânica, cátions e ânions existentes no solo, assim como a água que infiltra no perfil do solo e alimenta as nascentes de rios e córregos. Considerar ainda que condições redutoras nos solos devidas à má drenagem podem solubilizar formas de ferro e manganês que, em teores elevados, podem alterar a qualidade da água de um manancial.

Você acha que o número de classes é adequado?

Se julgar necessário, justifique sua resposta.

CRITÉRIO 3 – Uso e Ocupação do Solo

Classes de uso e ocupação do solo	Grau de perigo (0-100)
Olericulturas	
Café	
Culturas anuais (milho/feijão)	
Solo Exposto	
Áreas urbanas	
Áreas industriais	
Pastagem degradada	
Pastagem não degradada	
Formações florestais nativas (mata e capoeira)	

OBS.: Como orientações a essa questão, pode-se considerar que:

(i) a agricultura faz uso de agrotóxicos para seu desenvolvimento, os quais, em geral, não são removidos de forma efetiva em estações de tratamento de água (ETA) que empregam processos convencionais.

(ii) a agricultura faz uso de fertilizantes, os quais contribuem para processos de eutrofização dos corpos d'água.

(iii) solos expostos são mais susceptíveis a processos erosivos, elevando a turbidez da água e potencializando processos de assoreamento de corpos d'água represados.

(iv) Áreas urbanas são, em geral, fontes (pontuais) de poluentes e contaminantes tais como matéria orgânica, nutrientes (N, P), microrganismos patogênicos.

(v) Pastagens (degradadas ou não) estão associadas à produção animal, constituindo fontes (difusas) de poluentes e contaminantes tais como matéria orgânica, nutrientes (N, P), microrganismos patogênicos.

(vi) Capoeiras (mata de baixo porte) e formações florestais podem atuar no amortecimento do escoamento superficial.

Naturalmente, os comentários acima constituem apenas lembretes, os quais podem ser ignorados, refutados ou acrescidos de outros.

Você acha que o número de classes é adequado?

Se julgar necessário, justifique sua resposta.

CRITÉRIO 4 – Fluxo Acumulado

Classes de fluxo acumulado	Grau de perigo (0-100)
Acima de 25000 m ² (próprio curso d'água)	
6250 a 25000 m ² de contribuição	
1250 a 6250 m ² de contribuição	
0 a 1250 m ² de contribuição	

OBS.: No programa utilizado (ArcGIS), o fluxo acumulado representa o fluxo superficial da água a montante de um determinado ponto do terreno, sendo gerado a partir da geometria e da declividade das encostas. A partir da direção do fluxo, o fluxo acumulado é obtido somando-se a área das células (quantidade de células ou pixels) na direção do fluxo (escoamento) até o curso d'água. Para efeito dessa consulta, a questão é formulada em termos de área (m²), uma vez que cada pixel possui 25 m².

Você acha que o número de classes é adequado?

Se julgar necessário, justifique sua resposta.

CRITÉRIO 5 – Ponderação das Camadas de Informação

Classes de fluxo acumulado	Grau de perigo (0-100)
Uso e Ocupação	
Declividade	
Tipo de Solo	
Fluxo Acumulado	
Distância das Fontes Pontuais de Poluição	

OBS.: Depois de feita essa homogeneização dos valores de todos os critérios, sejam eles fatores ou restrições, é que se determinam os pesos de cada um dos fatores.

A grande dificuldade encontrada é atribuir um valor numérico aos critérios de forma direta, porém é relativamente mais simples fazer comparações através de avaliação semântica, ou seja, identificar se o critério é mais ou menos importante no processo entre todos os critérios utilizados na análise. Esse é o raciocínio adotado para a maior parte dos métodos de ponderação (UFSC, 2008).

Portanto, atribua notas de 0 a 100 de acordo com risco que você acha que cada camada de informação pode prover ao sistema de abastecimento de água.

Você acha que o número de classes é adequado?

Se julgar necessário, justifique sua resposta.

ENCERRAR

VOLTAR A PÁGINA INICIAL

PARA DEFINIÇÃO DOS CRITÉRIOS

Anexo 3 - Tabelas de probabilidades utilizadas na construção da rede Bayesiana para a bacia hidrográfica contribuinte à zona de captação

Grau de atendimento da disponibilidade hídrica é insatisfatório
(Tabela A1 – anexo 3)

	Alto	Moderado	Baixo
Sim	0,99	0,01	0
Não	0,01	0,99	1

Predominância de uso e ocupação por indústrias (Tabela A2 – anexo 3)

	Alto	Moderado	Baixo
Sim	0,95	0,05	0
Não	0,05	0,95	1

Predominância de uso e ocupação por pecuária (Tabela A3 – anexo 3)

	Alto	Moderado	Baixo
Sim	0,95	0,05	0
Não	0,05	0,95	1

Predominância de uso e ocupação por olericultura (Tabela A4 – anexo 3)

	Alto	Moderado	Baixo
Sim	0,7	0,3	0
Não	0,3	0,7	1

Predominância de uso e ocupação por agriculturas diversas (Tabela A5 – anexo 3)

	Alto	Moderado	Baixo
Sim	0,6	0,4	0
Não	0,4	0,6	1

Predominância de uso e ocupação por solo exposto (Tabela A6 – anexo 3)

	Alto	Moderado	Baixo
Sim	0,75	0,25	0
Não	0,25	0,75	1

Predominância de uso e ocupação por áreas urbanas (Tabela A7 – anexo 3)

	Alto	Moderado	Baixo
Sim	0,95	0,95	0
Não	0,05	0,05	1

Predominância de uso e ocupação por pastagem degradada
(Tabela A8 – anexo 3)

	Alto	Moderado	Baixo
Sim	0,55	0,45	0
Não	0,45	0,55	1

Predominância de uso e ocupação por formações não florestais
(Tabela A9 – anexo 1)

	Alto	Moderado	Baixo
Sim	1	0	0
Não	0	1	1

Declividade encontra-se acima de 45%
(Tabela A10 – anexo 1)

	Alto	Moderado	Baixo
Sim	0,75	0,25	0
Não	0,25	0,75	1

Tipo de solo predominante Cambissolo Háplico (Tabela A11 – anexo 3)

	Alto	Moderado	Baixo
Sim	0,65	0,35	0
Não	0,35	0,65	1

Distâncias dos currais e fossa próximas ao manancial
(Tabela A12 – anexo 3)

	Alto	Moderado	Baixo
Sim	0,7	0,3	0
Não	0,3	0,7	1

Anexo 4 - Tabelas de probabilidades utilizadas na construção da rede Bayesiana para as sub-bacias da bacia do Ribeirão São Bartolomeu e zona de captação

Escherichia coli/100mL (Tabela A1– anexo 4)

	Alto	Baixo
≥1000/100mL	0,9	0,1
<1000/100mL	0,1	0,9

Cryptosporidium spp. (Tabela A2– anexo 4)

	Alto	Baixo
C > 3 oocistos/L	0,9	0,1
C < 3 oocistos/L	0,1	0,9

Cianobactérias (Tabela A3– anexo 4)

	Alto	Baixo
≥ 20.000 células/mL	0,8	0,2
< 20.000 células/mL	0,2	0,8

Cianotoxinas (Tabela A4 anexo 4)

	Alto	Baixo
VMP ≥ Limite permitido	0,99	0,01
VMP < Limite permitido	0,01	0,99

Grupos de Agrotóxicos (Tabela A5 anexo 4)

	Alto	Baixo
VMP ≥ Limite permitido	0,99	0,01
VMP < Limite permitido	0,01	0,99

Grupos de substâncias químicas orgânicas (Tabela A6 anexo 4)

	Alto	Baixo
VMP ≥ Limite permitido	0,99	0,01
VMP < Limite permitido	0,01	0,99

Grupos de substâncias químicas inorgânicas (Tabela A7 anexo 4)

	Alto	Baixo
VMP ≥ Limite permitido	0,99	0,01
VMP < Limite permitido	0,01	0,99

Índice de Qualidade da Água – IQA (Tabela 8 anexo 4)

	Alto	Baixo
Ótima a Boa	0,8	0,05
Razoável	0,15	0,15
Péssima	0,05	0,8

Anexo 5 - Lista de Verificação (Check List)-para identificação dos eventos perigosos na estação de tratamento

na ETAI/SAAE, Viçosa, Brasil, 2008

		Sim	Não	N.A
Coagulação/Mistura Rápida	Eventos Perigosos			
	Ausência de ensaios para estabelecimento de concentração, pH e dose ótimos	x		
	Ausência de jarrest		x	
	Reduzida frequência de realização do teste de jarros	x		
	Dose incorreta do coagulante		x	
	Armazenamento incorreto do coagulante		x	
	Ponto de aplicação do coagulante inadequado		x	
	Ausência de bomba reserva	x		
Tempo excessivo de mistura do coagulante, baixa agitação (gradiente de velocidade insuficiente)	x			
Floculação	Eventos Perigosos	Sim	Não	N.A
	Inexistência de uma distribuição decrescente de gradientes entre as câmaras		x	
	Gradientes excessivos		x	
	Gradientes reduzidos		x	
	Gradiente nas passagens superior ao da câmara anterior		x	
	Deposição excessiva de sedimentos no floculador		x	
	Problemas estruturais nas instalações do floculador	x		
	Existência excessiva de fluxos preferenciais, afetando o perfil hidráulico do floculador		x	
	TDH inadequado		x	
	Intervalo de tempo excessivo entre as operações de limpeza		x	
Decantação	Eventos Perigosos	Sim	Não	N.A
	Elevada taxa de aplicação		x	
	Distribuição ineficiente da água floculada		x	
	Má distribuição da vazão		x	
	Problemas estruturais		x	
	Coleta inadequada da água decantada		x	
	Existência de correntes ascensionais, ressuspensão de lodo		x	
	Presença de cianobactérias e cianotoxinas		x	
	Ocorrência de flotação		x	
	Intervalo de tempo excessivo entre as operações de limpeza		x	
	Vazão operacional superior à vazão de projeto		x	
	Ausência do monitoramento da qualidade da água		x	
	Tempo de detenção inadequado, favorecimento de zonas mortas ou curtos-circuitos		x	
	Ausência de tratamento do lodo	x		
Filtração rápida	Eventos Perigosos	Sim	Não	N.A
	Taxa de filtração não recomendada (excessiva ou reduzida)		x	
	Falha no controle da carreira de filtração	x		
	Granulometria do leito filtrante inadequada		x	
	Leito filtrante deteriorado	x		
	Má distribuição dos grãos do leito (granulometria)		x	
	Excesso de carga hidráulica		x	
	Velocidade excessiva de retrolavagem		x	
Tempo de lavagem insuficiente		x		

	Velocidade de retrolavagem		x	
	Perda de leito filtrante		x	
	Ausência de lavagem superficial do leito	x		
	Ausência de monitoramento da qualidade da água efluente		x	
	Ausência de controle da expansão do leito filtrante	x		
	Exposição do leito filtrante		x	
	Ausência de monitoramento da qualidade microbiológica da água de lavagem.	x		
	Ausência de tratamento da água de lavagem	x		
	Elevada razão de recirculação		x	
	Má distribuição da água de lavagem		x	
	Ausência de monitoramento da carreira de filtração		x	
	Deficiência do filtro		x	
	Insatisfatória conservação dos registros e estruturas de controle de vazão de água de lavagem e de água filtrada		x	
	Exposição a céu aberto dos filtros ascendentes		x	
	Eventos Perigosos	Sim	Não	N.A
Desinfecção	Estado de conservação dos equipamentos de dosagem insatisfatório	x		
	Uso de agente incompatível com a qualidade da água		x	
	Dose incorreta do desinfetante		x	
	Ausência de conhecimento e controle acerca do tempo de contato	x		
	CT incorreto	x		
	Existência de vazamentos		x	
	Suspensão do fornecimento de desinfetante		x	
	Ausência de monitoramento dos subprodutos	x		
	Ausência de controle do residual		x	
	Residual insuficiente		x	
	pH de desinfecção insatisfatório		x	
	Inexistência de desinfetante alternativo		x	
	Aplicação do desinfetante em ponto inadequado		x	
	Ausência e conservação e padronização dos equipamentos	x		
	Presença de curtos-circuitos e zonas mortas	x		

Anexo 6 - Tabelas de probabilidades utilizadas na construção da rede Bayesiana para as variáveis física, hidráulica e qualidade da água

Variável Física

Idade da Tubulação x PVC

(Tabela A1– anexo 6)

	Alto	Baixo
Acima de 20 anos	0,7	0,3
Abaixo de 20 anos	0,3	0,7

Idade da Tubulação x Ferro Galvanizado

(Tabela A2– anexo 6)

	Alto	Baixo
Acima de 15 anos	0,9	0,1
Abaixo de 15 anos	0,1	0,9

Idade da Tubulação x Ferro Dúctil

(Tabela A3– anexo 6)

	Alto	Baixo
Acima de 35 anos	0,9	0,1
Abaixo de 35 anos	0,1	0,9

Idade da Tubulação x Cimento Amianto

(Tabela A4– anexo 6)

	Alto	Baixo
Acima de 20 anos	0,9	0,1
Abaixo de 20 anos	0,1	0,9

Comprimento da Tubulação

(Tabela A5 anexo 4)

	Alto	Baixo
Acima de 240 m	0,9	0,1
Abaixo de 240 m	0,1	0,9

Diâmetro da Tubulação

(Tabela A6 anexo 4)

	Alto	Baixo
Acima de 125 mm	0,9	0,1
Abaixo de 125 mm	0,1	0,9

Variável Hidráulica

Vazamento (Tabela A7 anexo 4)

	Alto	Baixo
Acima de 3	0,8	0,2
Abaixo de	0,2	0,8

Índice de perdas (Tabela A8 anexo 4)

	Alto	Baixo
Acima de 27%	0,7	0,3
Abaixo de 27%	0,3	0,7

Pressão (Tabela A9 anexo 4)

	Alto	Baixo
Acima do Limite permitido	0,9	0,1
Abaixo do Limite permitido	0,1	0,9

Variável Qualidade da água

Turbidez (Tabela A 10 anexo 4)

	Alto	Baixo
VMP \geq Limite permitido	0,7	0,3
VMP $<$ Limite permitido	0,3	0,7

Cloro Residual (Tabela A 11 anexo 4)

	Alto	Baixo
VMP \geq Limite permitido	0,99	0,01
VMP $<$ Limite permitido	0,01	0,99

Substâncias químicas

(Tabela A12 anexo 4)

	Alto	Baixo
VMP \geq Limite permitido	0,99	0,01
VMP $<$ Limite permitido	0,01	0,99

Bactérias Heterotróficas

(Tabela A13 anexo 4)

	Alto	Baixo
Acima do valor	0,7	0,3
Abaixo valor	0,3	0,7

Substâncias organolépticas

(Tabela A14 anexo 4)

	Alto	Baixo
VMP \geq Limite permitido	0,7	0,3
VMP $<$ Limite permitido	0,3	0,7

Substâncias químicas (subprodutos da desinfecção)

(Tabela A15 anexo 4)

	Alto	Baixo
VMP \geq Limite permitido	0,99	0,01
VMP $<$ Limite permitido	0,01	0,99

Coliforme Total

(Tabela A16 anexo 4)

	Alto	Baixo
VMP \geq Limite permitido	0,8	0,2
VMP $<$ Limite permitido	0,2	0,8

Escherichia coli/100mL

(Tabela A17 anexo 4)

	Alto	Baixo
Acima do valor	0,99	0,01
Abaixo valor	0,01	0,99

