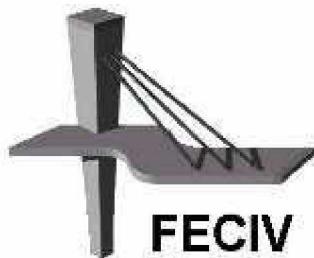


DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

**ANÁLISE DE POTENCIAIS ÁREAS DE RISCO À
POLUIÇÃO DO AQUÍFERO BAURU NA ZONA
URBANA DE ARAGUARI, MG**

CAROLINA VIEIRA DE ANDRADE

UBERLÂNDIA, 4 DE MARÇO DE 2016



FACULDADE DE ENGENHARIA CIVIL
Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil



UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA
FACULDADE DE ENGENHARIA CIVIL
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL



Carolina Vieira de Andrade

**ANÁLISE DE POTENCIAIS ÁREAS DE RISCO À
POLUIÇÃO DO AQUÍFERO BAURU NA ZONA URBANA
DE ARAGUARI, MG**

Dissertação apresentada à Faculdade de Engenharia Civil da Universidade Federal de Uberlândia, como parte dos requisitos para a obtenção do título de **Mestre em Engenharia Civil**.

Orientador: Prof. Dr. Marcio Augusto Reolon Schmidt

Uberlândia, 4 de março de 2016

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)
Sistema de Bibliotecas da UFU, MG, Brasil.

A553a Andrade, Carolina Vieira de, 1986-
2016 Análise de potenciais áreas de risco à poluição do Aquífero Bauru na
zona urbana de Araguari, MG / Carolina Vieira de Andrade. - 2016.
128 f. : il.

Orientador: Marcio Augusto Reolon Schmidt.
Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Uberlândia,
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil.
Inclui bibliografia.

1. Engenharia civil - Teses. 2. Águas subterrâneas - Poluição - Teses.
3. Aquíferos - Araguari (MG) - Teses. I. Schmidt, Marcio Augusto
Reolon. II. Universidade Federal de Uberlândia. Programa de Pós-
Graduação em Engenharia Civil. III. Título.

CDU: 624



SERVIÇO PÚBLICO FEDERAL
MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA
FACULDADE DE ENGENHARIA CIVIL
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL



ATA DA DEFESA DE DISSERTAÇÃO DE MESTRADO ACADÊMICO DO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL - PPGEC

ATA Nº: 153/2016

CANDIDATO: Carolina Vieira de Andrade

Nº. Matrícula: 11412ECV001

ORIENTADOR: Prof. Dr. Marcio Augusto Reolon Schmidt

TÍTULO: "Análise de potenciais áreas de risco à poluição do aquífero Bauru na zona urbana de Araguari, MG".

ÁREA DE CONCENTRAÇÃO: Engenharia Urbana, Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental

LINHA DE PESQUISA: Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental

PROJETO DE PESQUISA: Recursos Hídricos e Saneamento

DATA DA DEFESA: 04 de março de 2016

LOCAL: Sala de Projeções Prof. Celso Franco de Gouvea, bloco 1Y.

HORÁRIO INÍCIO/TÉRMINO: 13h00 - 17h15

Reuniu-se na Sala de Projeções Prof. Celso Franco de Gouvea, bloco 1Y - Campus Santa Mônica da Universidade Federal de Uberlândia, a Banca Examinadora, designada pelo Colegiado do PPGEC, assim composta: Professores Doutores: **José Eduardo Alamy Filho – FECIV/UFU; Leila Nunes Menegasse Velásquez – IGC/UFMG e Marcio Augusto Reolon Schmidt** orientador da candidata. Ressalta-se que a Prof.^a Dr.^a **Leila Nunes Menegasse Velásquez** participou da defesa por meio de video-conferência desde a cidade de Belo Horizonte (MG) e os demais membros da banca e o aluno participaram in loco.

Iniciando os trabalhos o presidente da mesa **Dr. Marcio Augusto Reolon Schmidt** apresentou a Comissão Examinadora e concedeu ao discente a palavra para a exposição do trabalho. A seguir, o senhor presidente concedeu a palavra aos examinadores, que passaram a arguir a candidata. Ultimada a arguição, a Banca, em sessão secreta, atribuiu os conceitos finais. Em face do resultado obtido, a Banca Examinadora considerou a candidata aprovada. Esta defesa de Dissertação de Mestrado Acadêmico é parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Mestre. O competente diploma será expedido após cumprimento dos demais requisitos, conforme as normas do Programa, a legislação pertinente e a regulamentação interna da UFU. Nada mais havendo a tratar foram encerrados os trabalhos e foi lavrada a presente ata que após lida e aprovada foi assinada pela Banca Examinadora.

Professor Orientador: **Prof. Dr. Marcio Augusto Reolon Schmidt – FECIV/UFU**

Membro interno: **Prof. Dr. José Eduardo Alamy Filho – FECIV/UFU**

Uberlândia, 04 de março de 2016.

A treva da meia noite é a ocasião em que o tempo dá sinal de partida para novo alvorecer. Por maior que seja a dificuldade, jamais desanime. O nosso pior momento na vida é sempre o momento de melhorar.

Chico Xavier

*À minha família e ao Ezequiel,
pelo amor e carinho.*

A GRADECIMENTOS

Um nome na lista de agradecimentos parece pouco para expressar a gratidão pela ajuda recebida, foram tantos momentos de auxílio, de tantas formas diferentes que se torna difícil elencar. Em primeiro lugar agradeço a Deus por permitir o desenvolvimento desse trabalho, em muitos momentos desistir pareceu o passo correto.

Agradeço à Universidade Federal de Uberlândia, que através do programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil tornou esse sonho possível. Ao professor orientador Dr. Marcio Augusto Reolon Schmidt, pela amizade, compreensão e incentivo durante toda a realização desse trabalho. Aos professores Dr. Marcio Ricardo Salla e Dr. José Eduardo Alamy Filho, por terem participado da qualificação e pelas contribuições que fizeram à pesquisa.

Agradeço à minha família pelo incentivo constante, por sempre acreditarem que eu seria capaz, ao meu pai que me ajudou incansavelmente na coleta dos dados, à minha mãe e aos meus irmãos, por serem preciosos em minha vida. Agradeço ao Ezequiel, sem sua ajuda esse trabalho não aconteceria.

Agradeço a todos que contribuíram direta ou indiretamente na elaboração desse trabalho, em especial os profissionais que forneceram as informações que embasaram esse estudo.

ANDRADE, Carolina Vieira de. **Análise de potenciais áreas de risco à poluição do Aquífero Bauru na zona urbana de Araguari, MG.** 2016. 128 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, Faculdade de Engenharia Civil, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2016.

RESUMO

Todas as pessoas precisam de acesso à água e a água subterrânea tem sido cada vez mais utilizada como alternativa para o uso humano, exemplo dessa situação é a cidade de Araguari que utiliza as águas do Aquífero Bauru como principal fonte de abastecimento de água potável. O objetivo deste trabalho foi estudar a vulnerabilidade e risco do Aquífero Bauru, na zona urbana de Araguari, MG, foi realizada uma atualização do mapa de vulnerabilidade, utilizando os métodos DRASTIC e GOD; e análise do risco em detrimento do uso e ocupação do solo. Foram elaborados dois cenários para avaliação do potencial risco, o primeiro composto pela vulnerabilidade apresentada pelo método DRASTIC associada ao mapa de uso e ocupação do solo atual; o segundo cenário foi realizado a partir da vulnerabilidade apresentada pelo método DRASTIC associada ao mapa de uso e ocupação do solo previsto pelo Plano Diretor Urbano do Município de Araguari. Na elaboração dos mapas de vulnerabilidade e nos cenários foram utilizadas ferramentas de Sistemas de Informação Geográfica, através de Sistemas de Apoio à Decisão.

Palavras-chave: DRASTIC – GOD – SIG - Água Subterrânea – Poluição

ANDRADE, Carolina Vieira. **Risk assessment for pollution of Bauru aquifer in Araguari's urban area, Minas Gerais state, Brazil.** 2016 128 f. Thesis (MS) - Course of Civil Engineering, Faculty of Civil Engineering, Federal University of Uberlândia, 2016.

ABSTRACT

It is common sense that everybody needs access to water to live and, increasingly, groundwater has been used as an alternative for human use. An example is Araguari city (municipality localized in western Minas Gerais state, Brazil) that uses the Bauru aquifer's waters as the main source of drinking water supply.

Work's objective were to study the Bauru Aquifer's vulnerability and risk in Araguari's urban area and consisted of an update of the vulnerability map using the DRASTIC and GOD methods. Also, the present study provided a risk analysis for potential polluting using the land use map.

This work present two scenarios to assess the potential risk of pollution, the first was composed by vulnerability obtained by the DRASTIC model associated with the current land occupation map; the second scenario was the vulnerability by the DRASTIC model associated with land occupation map based on Araguari's Master Plan. To obtain vulnerability maps and scenarios, GIS tools and Decision Support Systems were employed.

Keywords: DRASTIC – GOD – GIS – Groundwater – Pollution

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Exemplos de Tempos de Residência em Aquíferos.....	19
Figura 2 - Classificação dos Tipos de Aquífero quanto à Porosidade	21
Figura 3 – Figura do Mapa geológico do município de Araguari	23
Figura 4 – Figura do Relevo do município de Araguari com apresentação da hidrografia	25
Figura 5 – Figura do Mapa da superfície piezométrica do Aquífero Bauru em Araguari	27
Figura 6 - Comparativo entre três métodos de vulnerabilidade intrínseca – GOD, EKv e Híbrido	31
Figura 7 - Escala de vulnerabilidade intrínseca com seus valores.....	43
Figura 8 – Parâmetros e índices para avaliação da vulnerabilidade - método GOD....	45
Figura 9 - Escala de risco (vulnerabilidade específica) com seus valores	47
Figura 10 – Estrutura do processo de Decisão multicriterial.....	52
Figura 11 - Elementos apresentados na forma Vetorial e Matricial	57
Figura 12 - Camadas contendo informações de representação da superfície.....	58
Figura 13 - Aplicação da Álgebra Booleana.....	59
Figura 14 - Localização do município de Araguari.....	64
Figura 15 – Malha urbana da cidade de Araguari – 2005	65
Figura 16 – Malha urbana da cidade de Araguari - 2010	66
Figura 17 – Malha urbana da cidade de Araguari - 2015	66
Figura 18 - Sobreposição malha urbana da cidade de Araguari dos anos 2005 e 2015	67
Figura 19 - Área de estudo do projeto	70
Figura 20 – Localização dos poços estudados para o parâmetro de profundidade	72
Figura 21 – Carta topográfica SE 22-Z-B-VI-2-NO	74
Figura 22 – Carta topográfica SE 22-Z-B-VI-2-SO	75
Figura 23 – Figura do Mapa de Profundidade do Lençol Freático.....	76
Figura 24 - Parâmetro de Profundidade do nível freático (Dc)	77
Figura 25 – Poço esquemático demostrando as camadas de solo considerados no estudo	80
Figura 26 - Localização dos poços estudados para os parâmetros de solos.....	81
Figura 27 – Análise do Parâmetro I em um Poço Esquemático	86
Figura 28 – Figura do Parâmetro de Impacto da Zona Vadosa (Ic)	87
Figura 29 – Figura do Modelo digital de elevação - MDE.....	89
Figura 30- Figura do Parâmetro Topografia (Tc) – Declividades da superfície	90
Figura 31 - Distribuição espacial dos pontos de Condutividade Hidráulica.....	92
Figura 32 – Figura do Parâmetro Condutividade Hidráulica Cc	93

Figura 33 – Figura do Parâmetro Litologia acima do Aquífero (O).....	96
Figura 34 – Figura do Parâmetro Profundidade do Aquífero (D).....	97
Figura 35 – Figura do Mapa Uso e Ocupação do Solo Atual.....	98
Figura 36 – Figura das Áreas de Urbanização	100
Figura 37 – Figura do Mapa Uso e Ocupação do Solo Futuro.....	101
Figura 38 - Interpolação do DRASTIC.....	103
Figura 39 – Figura do Mapa de Vulnerabilidade - DRASTIC	104
Figura 40 – Figura do Mapa de Vulnerabilidade - GOD	105
Figura 41 - Álgebra de mapas - Cenário 1	106
Figura 42 – Figura do Mapa de Risco - Cenário 1	107
Figura 43 – Figura do Mapa de Risco - Cenário 2.....	109
Figura 44 – Figura do Mapa de Vulnerabilidade Natural - Método GOD.....	110
Figura 45 – Figura do Mapa de Vulnerabilidade Natural - Método GOD.....	111
Figura 46 – Figura do Mapa de Vulnerabilidade Intrínseca usando as faixas de valores do GOD - DRASTIC Normalizado	113
Figura 47 – Figura do Mapa de Vulnerabilidade Intrínseca GOD usando escala de cores DRASTIC	114
Figura 48 - Comparativo método DRASTIC x GOD	115
Figura 49 - Comparativo de Risco Cenários 1 e 2	117
Figura 50 - Diferença de Risco à Poluição da Água Subterrânea entre Cenário 2 e Cenário 1	118
Figura 51 - Perfil Estratigráfico.....	129
Figura 52 - Perfil Estratigráfico.....	130

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Relação de trabalhos relacionados à pesquisa.....	28
Tabela 2 - Pesos do Método DRASTIC.....	38
Tabela 3 - Profundidade do nível da água e valores de pontuação atribuídos em função da Vulnerabilidade (D_C)	39
Tabela 4 - Taxas de infiltração (recarga) e seus respectivos valores de pontuação atribuídos em função da Vulnerabilidade (R_C)	39
Tabela 5 - Litotipos que compõem o aquífero e seus valores de pontuação atribuídos em função da Vulnerabilidade (A_C).....	40
Tabela 6 - Tipos de solo e seus valores de pontuação atribuídos em função da Vulnerabilidade (S_C)	41
Tabela 7 - Inclinação do relevo e seus valores de pontuação atribuídos em função da Vulnerabilidade (T_C)	41
Tabela 8 - Litotipos que constituem a zona vadosa e seus valores de pontuação atribuídos em função da Vulnerabilidade (I_C).....	42
Tabela 9 – Condutividade hidráulica e seus valores de pontuação atribuídos em função da Vulnerabilidade (C_C)	43
Tabela 10 – Parâmetros do método GOD e valores da escala de vulnerabilidade.....	44
Tabela 11 - Classes e características do método GOD.....	44
Tabela 12 – Uso e ocupação do solo e seus valores de pontuação atribuídos em função do potencial poluidor (L_C)	46
Tabela 13 - Resumo dos valores de recarga aquífera.....	78
Tabela 14 - Dados solos	82
Tabela 15 - Condutividade Hidráulica do solo superficial - K	91
Tabela 16 – Dados parâmetro Caracterização do Aquífero quanto à Litologia (O).....	95
Tabela 17 - Comparativo de áreas DRASTIC x GOD	115
Tabela 18 - Comparativo de áreas de Risco dos Cenários 1 e 2.....	117
Tabela 19 – Relação da área em relação à situação da diferença entre o Cenário 2 e Cenário 1	119

SUMÁRIO

AGRADECIMENTOS	xí
RESUMO.....	xii
ABSTRACT	xiii
LISTA DE FIGURAS	xiv
LISTA DE TABELAS.....	xvi
SUMÁRIO.....	ii
CAPÍTULO 1	12
INTRODUÇÃO.....	12
1.1. OBJETIVO GERAL.....	15
1.1.1. Objetivos Específicos.....	15
1.2. JUSTIFICATIVA	16
1.3. ESTRUTURA DA PESQUISA.....	17
CAPÍTULO 2	18
REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	18
2.1. ÁGUA SUBTERRÂNEA.....	18
2.1.1. AQUÍFERO.....	18
2.1.1.1. Características dos Aquíferos	20
2.1.2. AQUÍFERO BAURU.....	22
2.1.2.1. Trabalhos Relacionados ao Aquífero Bauru em Araguari	28
2.1.3. VULNERABILIDADE E RISCO A POLUIÇÃO.....	33
2.1.3.1. Mapa de Vulnerabilidade.....	36
2.1.3.1.1. DRASTIC	38
2.1.3.1.2. GOD	44
2.1.3.2. Mapa de Risco.....	46
2.2. SISTEMAS DE APOIO À DECISÃO (SAD)	50
2.2.1. SISTEMAS DE INFORMAÇÃO GEOGRÁFICA – SIG	55
CAPÍTULO 3	63
METODOLOGIA.....	63
3.1. ÁREA DE ESTUDO	63

3.2. MATERIAIS E MÉTODOS	70
3.2.1. Método DRASTIC	71
3.2.1.1. Parâmetro D – Profundidade do Lençol Freático	71
3.2.1.2. Parâmetro R – Recarga do Aquífero	77
3.2.1.3. Parâmetros A, S e I – Litotipo do Aquífero, Tipo de Solo e Litotipo da Zona Vadosa	79
3.2.1.4. Parâmetro T – Inclinação da Superfície	87
3.2.1.5. Parâmetro C – Condutividade Hidráulica	91
3.2.2. Método GOD	94
3.2.2.1. Parâmetro G – Ocorrência de Água Subterrânea	94
3.2.2.2. Parâmetro O – Litologia acima do Aquífero	94
3.2.2.3. Parâmetro D – Profundidade do Aquífero	96
3.2.3. Uso e Ocupação do Solo	97
3.2.4. Mapa de Expansão - Plano Diretor	99
CAPÍTULO 4	102
RESULTADOS E CONCLUSÕES	102
4.1. RESULTADOS	102
4.1.1. DRASTIC	102
4.1.2. GOD	105
4.1.3. Primeiro Cenário	106
4.1.4. Segundo Cenário	108
4.2. CONCLUSÕES	110
4.2.1. Comparativo Método GOD	110
4.2.2. Comparativo entre os Métodos DRASTIC e GOD	112
4.2.3. Avaliação dos Cenários	116
4.2.4. Conclusões	119
4.2.5. Trabalhos Futuros	122
CAPÍTULO 5	124
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	124
ANEXO 1	129

CAPÍTULO 1

INTRODUÇÃO

“Terra, planeta água.”
(Guilherme Arantes)

Um dos grandes desafios da humanidade no início desse novo milênio é a questão da água (ABAS, 2007). Segundo Barros (2008), a demanda de água doce para os mais diversos usos cresce continuamente enquanto a disponibilidade de água doce com qualidade adequada ao consumo humano é cada vez menor. Um grande volume de água é desperdiçado pelo uso inadequado, acrescenta-se a essa redução a perda de qualidade das águas dos rios, lagos e reservatórios construídos pelo homem, devido aos impactos ambientais.

Segundo relatório publicado pela Unesco (2015), todas as pessoas precisam de acesso a água de qualidade para beber, cozinhar e garantir a higiene pessoal, visando o não comprometimento da saúde e da dignidade. O relatório prevê um déficit de água a nível global de 40% para o ano de 2030, ao passo que a reserva de água presente nos aquíferos está diminuindo e estima-se que cerca de 20% dos aquíferos do mundo estejam sendo sobreexplorados. A coordenação e cooperação entre gestores dos recursos naturais e setores que gerenciam a saúde, agricultura e indústria são necessários para promover a sinergia e integrar respostas aos desafios ambientais, econômicos e sociais. A colaboração é vital para a formulação de políticas de planejamento e monitoramento.

A água subterrânea é paulatinamente reconhecida como alternativa viável aos usuários e tem apresentado uso crescente nos últimos anos. Essas águas, que estão em armazenamento transitório nos poros e fraturas de formações rochosas profundas, são extraídas através de poços. Além dos problemas de susceptibilidade de poluição, inerentes às águas superficiais, o maior interesse pelo uso da água subterrânea vem sendo despertado pela maior oferta desse recurso em decorrência do desenvolvimento tecnológico, o que promoveu uma melhoria na produtividade dos poços e um aumento de sua vida útil (SOUZA, 2009).

A água contida nos mananciais subterrâneos está mais protegida quando comparada com as águas superficiais, mas não são isentas de poluição e cabe salientar a dificuldade de recuperação desses mananciais quando poluídos. Segundo Amharref e Bernoussi (2007) a política de gestão da água, a predição do risco de poluição e a proteção é de primordial importância. Preservar, a médio e longo prazo, a qualidade desse recurso é fundamental. Barros (2008) afirma que a exploração das águas subterrâneas cresce gradativamente, pois, por fluírem no subsolo, são bem mais protegidas. Mas essas águas não deixam de necessitar de uma proteção, que pode acontecer, inicialmente pela delimitação de zonas suscetíveis de serem afetadas pela poluição. Cabe salientar que a poluição urbana difere da rural em termos de poluentes e concentrações.

Avaliar e quantificar o risco à poluição é um problema de difícil solução dada à probabilidade de ocorrência de fenômenos dessa natureza. Dada a dinâmica das cidades como potencial poluidor, destaca-se a importância do planejamento e gestão de recursos hídricos como forma de manter a qualidade do abastecimento de áreas urbanas em longo prazo.

Rufino (2009) destaca a necessidade do enfoque multidisciplinar no planejamento e gestão de recursos hídricos, visando uma solução adequada aos problemas relacionados à água. Segundo a autora, o cerne do problema está em como tomar as decisões mais adequadas em uma área complexa devido às dificuldades e incertezas de diversas naturezas, volume de investimentos em infraestrutura, a necessidade de planejamento a longo prazo e as repercussões econômicas, sociais e ambientais sobre a população de determinada região. Alia-se a isso a participação de grupos heterogêneos no processo decisório. O processo decisório passa então a ser uma mescla de diversos fatores que se apoiam em decisões técnicas, sociais e ambientais para a escolha da melhor solução para determinado problema.

Do ponto de vista técnico, os sistemas de apoio à decisão (SAD) contribuem para transformar o conhecimento difuso dos especialistas em uma forma sistematizada de apresentação e confirmação de hipóteses para apoio a gestão através de dados e informações. A estratégia dessa pesquisa passa então a elaboração de cenários e

alternativas como propostas de solução e análise pormenorizadas dos mesmos. Estes cenários espelham os conjuntos de problemas enfrentados em determinada situação e as alternativas são diversas soluções possíveis elencadas pelo grupo de especialistas para abordagem de um problema específico dentro do cenário.

O problema passa a ser então a adequada quantificação do risco potencial à poluição dado ao dinamismo da relação da ocorrência de fenômenos poluidores e do comportamento do aquífero na sazonalidade de chuvas. A hipótese aventada é a criação de mapas de risco como ferramenta de apoio a decisão e que contemplem as características físicas do aquífero e da região, bem como o processo de urbanização local, mesmo entendendo que a gestão local é apenas uma parte do mosaico de bacias e sub bacias contribuintes para o abastecimento de um aquífero de grandes dimensões.

Diante desse contexto, esta pesquisa adota a estratégia da criação e avaliação de cenários em sistemas de apoio a decisão, apoiados por Sistemas de Informação Geográfica, para avaliar o zoneamento da cidade de Araguari, MG, com o enfoque do zoneamento da ocupação urbana na tentativa de garantir a manutenção da qualidade da água subterrânea.

1.1. OBJETIVO GERAL

O objetivo geral desse trabalho é analisar potenciais áreas de risco de poluição do Aquífero Bauru na zona urbana do município de Araguari – MG, em relação à ocupação atual e expansão futura da cidade.

1.1.1. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Com a finalidade de atingir o objetivo desse trabalho, foram elaborados alguns objetivos específicos, são eles:

- Atualizar o mapa de vulnerabilidade natural da cidade de Araguari-MG, tomando por base as informações e pesquisas realizadas no aquífero Bauru, existente na região;
- Elaborar mapa de risco através de dois cenários, uso e ocupação atual e ocupação prevista no plano diretor urbano, no contexto do SAD;
- Comparar o mapa de risco ao mapa do Plano Diretor Urbano - PDU da cidade de Araguari, visando identificar áreas de conflito;
- Indicar a proteção de zonas suscetíveis à poluição na área urbana da cidade visando à garantia da qualidade da água no Aquífero Bauru.

1.2. JUSTIFICATIVA

A cidade de Araguari é abastecida exclusivamente por água subterrânea, retirada do Aquífero Bauru, aquífero livre, cuja superfície apresenta nível variável e, portanto, sem proteção aos agentes poluidores. O lençol freático na região urbana apresenta cota piezométrica próxima à superfície do terreno, sendo, portanto, raso em quase todo o município. Dada a sua importância para a cidade, entende-se que o zoneamento e avaliação das tendências de expansão, quando comparadas ao plano diretor, podem elucidar as potencialidades à poluição da área urbana do município e avaliar a ocupação atual.

O presente trabalho se justifica pela necessidade de gestão do espaço urbano, no caso da cidade de Araguari, cuja fonte de abastecimento de água potável advém do aquífero, a necessidade de conhecimento e análise da expansão urbana frente à suscetibilidade de poluição do aquífero se torna um tema importante. A busca por um sistema que agregue possibilidade de gestão e possibilite a sustentabilidade do manancial é um tema atual e possível de ser realizado a partir de estudos já realizados.

Portanto, o foco do trabalho é a determinação das áreas com potencial risco de poluição do aquífero Bauru em relação ao uso atual (regiões/áreas possíveis de poluição) e em relação à ampliação do espaço urbano através de simulações do uso do espaço físico por cenários. O presente estudo auxilia na manutenção da qualidade da água para a cidade de Araguari, que não possui outras fontes próximas com vazão suficiente para atender à população. Os rios Paranaíba e Araguari se encontram em distância considerável da malha urbana e a substituição da fonte de abastecimento acarretaria em custos elevados.

A contribuição do ponto de vista acadêmico é a utilização da ferramenta de Sistema de Apoio à Decisão através da utilização de Sistema de Informação Geográfica, ferramentas que permitem avaliações de todo o espaço de forma conjunta e relativamente rápida, depois de criado o banco de dados. Diversos estudos foram e tem sido realizados no município de Araguari, classificando e analisando o Aquífero Bauru, mas poucos tratam do tema utilizando uma ferramenta SIG aliado à expansão urbana atual e principalmente visando uma expansão futura.

1.3. ESTRUTURA DA PESQUISA

Esta pesquisa será estruturada em cinco capítulos, cada um apresentado da seguinte forma:

- O 1º capítulo contém uma breve introdução contextualizando o problema e a importância da discussão do tema;
- O 2º capítulo apresenta uma revisão bibliográfica sobre água subterrânea e Sistemas de Apoio à Decisão;
- O 3º capítulo apresenta a área de estudo e a metodologia abordada no desenvolvimento da pesquisa;
- O 4º capítulo apresenta os resultados e conclusões da pesquisa;
- O 5º capítulo fornece as referências bibliográficas usadas durante a elaboração do texto e da pesquisa.

CAPÍTULO 2

REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

“Na natureza nada se cria, nada se perde, tudo se transforma.”
(Lei de Lavoisier)

2.1. ÁGUA SUBTERRÂNEA

2.1.1. AQUÍFERO

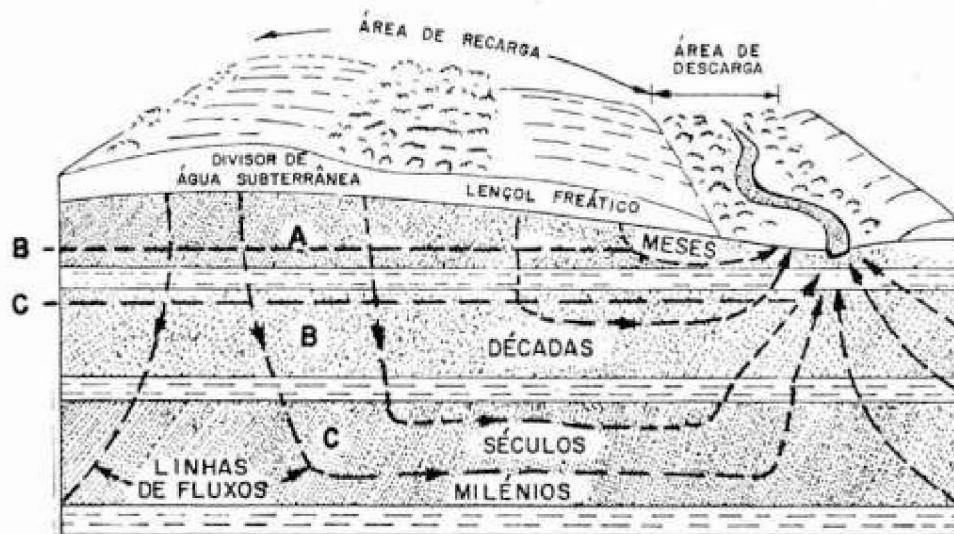
O aquífero pode ser definido como a água armazenada no subsolo, contida em unidades geológicas consolidadas ou não, em que os poros estão saturados de água e permitem sua movimentação de um ponto a outro em quantidades significativas. A quantidade de água presente no subsolo é relevante, no entanto, nem toda água armazenada pode ser aproveitada. Segundo Cleary (2007), um aquífero é uma formação geológica saturada com suficiente permeabilidade e porosidade interconectada para armazenar e transmitir quantidades significativas de água, sob gradientes hidráulicos naturais.

A velocidade de movimentação, transmissão de um ponto a outro dessa água presente no solo, determina o chamado tempo de residência das águas subterrâneas, conforme podem ser observados na Figura 1. Para que uma formação¹ seja considerada aquífero, é necessário a existência de água no solo e a transmissão sob taxas significativas. Algumas formações geológicas não possuem água, outras não permitem a exploração desse recurso. Formações que possuem água armazenada, mas não a transmitem em quantidades adequadas ao uso humano, são chamadas de aquitardes ou aquicludes e, dependendo do período de armazenamento dessa água, a qualidade pode ser prejudicada pelos sais e minerais dissolvidos, podendo torná-la inclusive salobra. Outro fator importante na consideração de aquíferos é a profundidade que esse manancial se encontra,

¹ O termo formação geológica será usado no texto sem vínculo à norma estratigráfica.

fator que se relaciona diretamente com a tecnologia e o custo empregados na extração da água presente no aquífero.

Figura 1 - Exemplos de Tempos de Residência em Aquíferos



Fonte: Cleary, R. W. – Águas Subterrâneas – 2007, p.18

Os aquíferos podem ser classificados quanto à forma de confinamento, podendo ser aquíferos livres ou confinados. Observa-se na Figura 1 a existência de um aquífero livre representado pela letra A e de dois aquíferos confinados identificados como B e C.

Aquífero confinado é aquele em que a água contida no meio poroso do solo se encontra sob pressões exercidas por camadas subjacentes e adjacentes; já o livre não está sujeito a pressões adicionais, apenas a pressão atmosférica atua. Na Figura 1, segundo Cleary (2007) parte da precipitação que cai na área de recarga infiltra para recarregar o aquífero freático e uma vez que a superfície potenciométrica do aquífero freático é maior do que as superfícies potenciométricas dos dois aquíferos confinados (indicadas pelas linhas tracejadas B e C) existe drenagem descendente em direção aos aquíferos confinados. Esse movimento descendente é extremamente lento e, para alguns aquíferos profundos, pode levar muitos anos para que a penetração atinja grandes profundidades.

Ainda segundo Cleary (2007), o fluxo horizontal nos aquíferos confinados pode ser também um processo muito lento, levando desde décadas até milhares de anos para finalmente atingir as áreas de descarga que se encontram na superfície. Geralmente,

quanto mais profundo o aquífero, maior é o tempo para que uma partícula de água se desloque de uma área de recarga para uma área de descarga.

2.1.1.1. CARACTERÍSTICAS DOS AQUÍFEROS

O tipo de confinamento, a capacidade de transmitir água, entre outros fatores, se relaciona diretamente com a formação geológica. Pode-se observar a existência de formações magmáticas (oriundas do resfriamento do magma), formações sedimentares (possíveis a partir do intemperismo) e as formações metamórficas (provenientes de variações de pressão e temperatura).

A facilidade com que a água flui através de um aquífero ou de uma camada confinante é determinada por um parâmetro chamado condutividade hidráulica (K). Areias e cascalhos apresentam altos valores de K , enquanto argilas possuem valores relativamente baixos. Esta condutividade hidráulica, no caso das argilas, pode ser severamente alterada para valores muito mais elevados, nos casos de poluição envolvendo solventes puros e escoando através dessas camadas de argila (CLEARY, 2007).

Segundo Capucci et al. (2001) *porosidade* é a capacidade que o solo ou rocha tem de armazenar água e é medida pelo percentual de volume ocupado pelos vazios ou poros no volume total do corpo rochoso, já *permeabilidade* é a capacidade que tem a rocha ou solo de transmitir a água, depende do tamanho dos poros e da intercomunicação entre eles.

Rochas sedimentares têm alta porosidade ao contrário das rochas cristalinas, mas nem todas possuem alta permeabilidade. As argilas, consideradas praticamente impermeáveis, têm poros tão pequenos que não deixam passar água. Outras rochas sedimentares como os arenitos e areias inconsolidadas possuem tanto porosidade quanto permeabilidade elevadas. Já nas rochas cristalinas, a permeabilidade será proporcional ao número de fraturas e da interconexão entre elas (CAPUCCI et al, 2001).

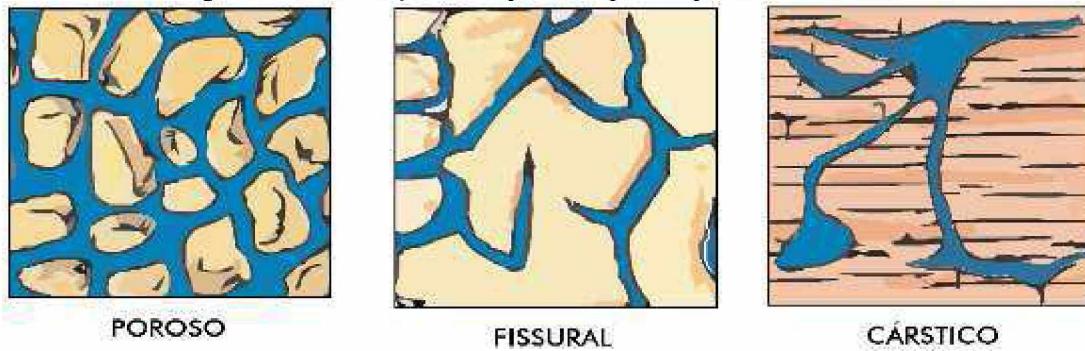
A maioria dos aquíferos presentes no mundo que apresentam altas vazões, consistem de areias e cascalhos inconsolidados encontrados em planícies costeiras, vales aluviais e depósitos glaciais. No Brasil, são aquíferos adequados (com maior potencial de porosidade e permeabilidade) os arenitos e os basaltos fraturados e os calcários com

canais formados por dissolução e com fraturas. Em algumas áreas, rocha cristalina fraturada, tal como granito, tem sido perfurada para o suprimento de água, mas as vazões são em geral bem mais baixas, se comparadas com às dos aquíferos de areia e de cascalho (CLEARY, 2007).

A água subterrânea no Brasil está estimada em mais de 95% da água doce disponível, representando um manancial hídrico de grande importância no suprimento de diversas populações do Brasil. No Estado de Minas Gerais, em especial, essa condição de importância das águas subterrâneas destaca-se, visto que o estado possui grandes reservas hidrogeológicas (CLEARY, 2007; CPRM, 2012).

Capucci et al. (2001) considera que existem três tipos básicos de aquíferos: granulares, fissurais e cársticos, conforme ilustrado na Figura 2. Aquíferos granulares ou porosos são aqueles formados por grãos em sedimentos e rochas sedimentares de estrutura granular e a água armazenada flui nesses espaços; aquíferos fissurais são aqueles nos quais a água está presente nas fraturas e fendas de rochas cristalinas e aquíferos cársticos são aqueles onde a água se apresenta em cavidades produzidas pela dissolução causada pelas águas.

Figura 2 - Classificação dos Tipos de Aquífero quanto à Porosidade



Fonte: MMA; Águas Subterrâneas – Um Recurso a ser Conhecido e Protegido – 2009, p.12

A recarga natural para a maioria dos aquíferos é a precipitação. O maior ou menor grau de reabastecimento ou recarga depende de fatores como clima, vegetação, relevo, drenagem e geologia da região. A existência de solos porosos e permeáveis favorece a infiltração, mas essa condição pode ser ampliada se o solo for coberto por vegetação e estiver em relevo plano.

2.1.2. AQUÍFERO BAURU

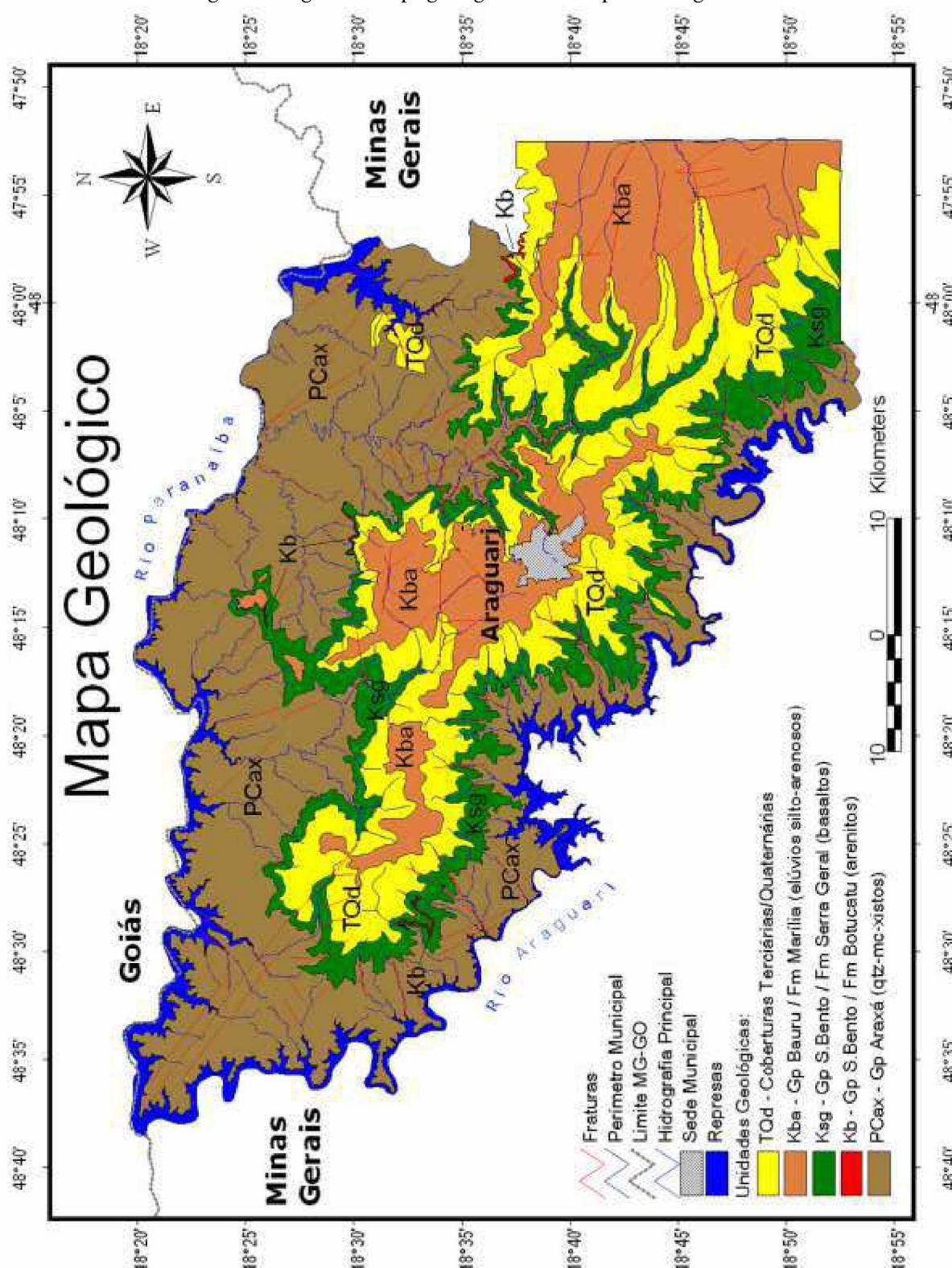
Araguari é um município mineiro posicionado entre os Rios Araguari e Paranaíba, com malha urbana distante desses rios e além da distância, a diferença altimétrica é de aproximadamente 300 m tornando onerosa a implantação de um sistema de captação da água desses rios. A Figura 3 apresenta o posicionamento da malha urbana hachurada e a localização dos cursos hídricos de grande vazão distantes da cidade, a hidrografia está apresentada na cor azul (FONDO DE UNIVERSIDADES, 2006)

A Figura 3 apresenta o mapa geológico do município de Araguari, cujas unidades geológicas presentes na região são, da base para o topo: Grupo Araxá, Formação Serra Geral (Grupo São Bento), Formação Marília (Grupo Bauru) e Coberturas Terciárias/Quaternárias. Existe ainda algumas fraturas, pouco expressivas, com apresentação da Formação Botucatu (Grupo São Bento).

Segundo o Fondo de Universidades (2006) o Grupo Araxá é formado por rochas metassedimentares que compõem o embasamento cristalino regional e se apresenta como o principal substrato rochoso dos Rios Araguari e Paranaíba, situa-se em cotas inferiores a 700 m. Já o Grupo São Bento, representado pela Formação Serra Geral, corresponde a extensos e espessos derrames basálticos. Em Araguari, os basaltos repousam sobre os xistos do Grupo Araxá de forma discordante, atingindo espessuras de até 250 m, cota de topo entre 880 m e 900 m e área de ocorrência abrange aproximadamente 1400 km². Desses, cerca de 380 km² estão expostos e a área restante ocorre sob os sedimentos do Bauru e dos depósitos quaternários, trata-se de um aquífero do tipo fraturado característico de resfriamento e alívio, no município. Esse aquífero é pouco explotado no município, com poucos poços utilizando suas águas.

O Grupo Bauru, representada pela Formação Marília, se estende por aproximadamente 1000 km², e segundo o Fondo de Universidades (2006), corresponde à unidade mais significativa em extensão e em produção de água, se apresentando em cotas superiores a 880m e espessura média de 54 m.

Figura 3 – Figura do Mapa geológico do município de Araguari



Fonte: Fondo de Universidades

Avaliação dos Recursos Hídricos do Sistema Aquífero Guarani (SAG) no município de Araguari–
2006,p.1.11

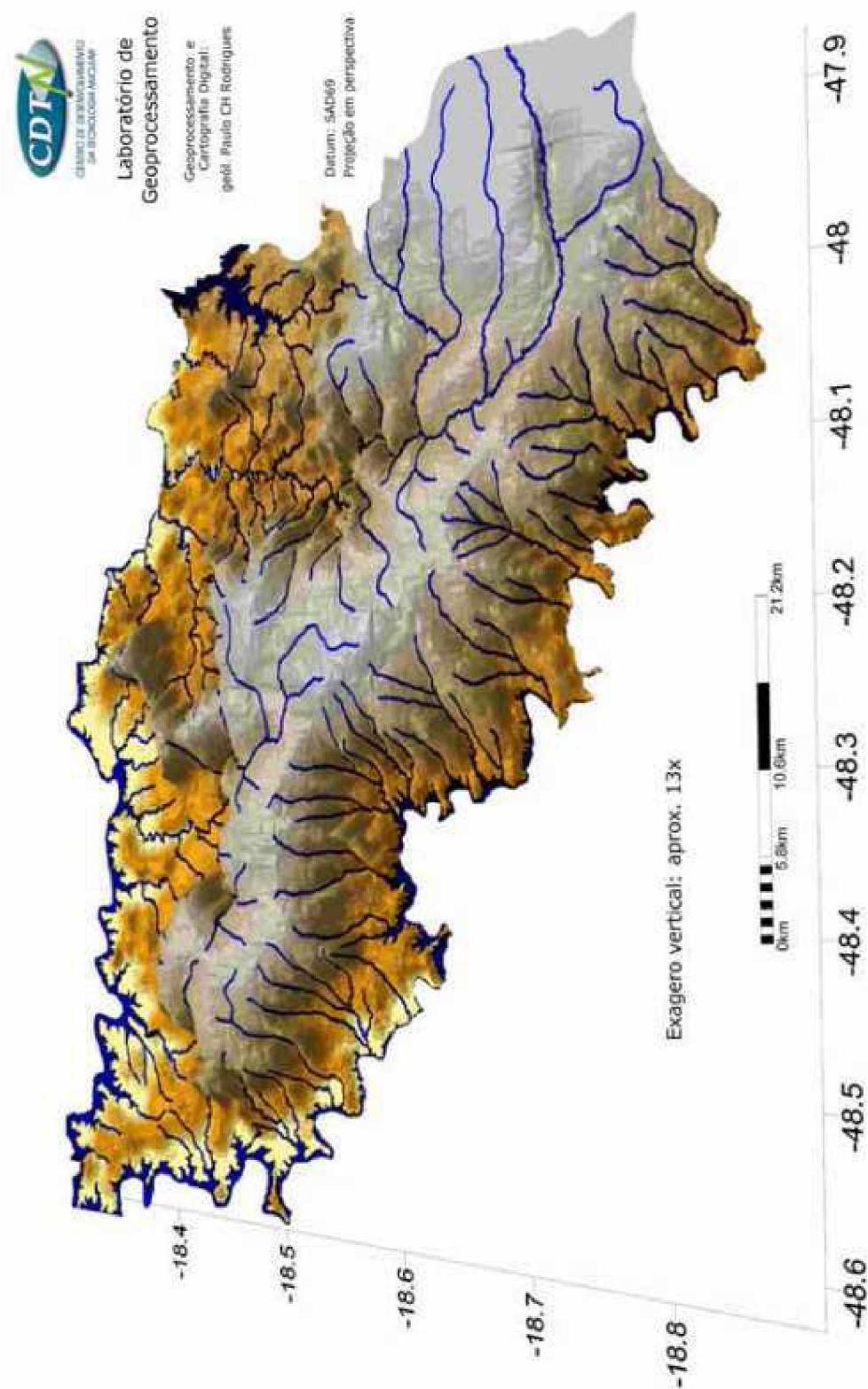
Os depósitos elúvio-coluvionares e aluvionares são depósitos recentes que representam as Coberturas Terciárias/Quaternárias, os depósitos eluviais de natureza areno-argilosa a siltosa, avermelhado a castanho avermelhado. Resultam de ação intempérica direta e sem transporte sobre significativos conglomerados, apresentando espessura de 5 m a 10 m, frequentemente exibido nos perfis de poços tubulares (FONDO DE UNIVERSIDADES, 2006)

O relevo do município, corresponde à bacia sedimentar do Paraná e é caracterizado por uma superfície superior, aplainada, homogênea e contínua, acima de 900 m, estabelecida sobre os sedimentos arenosos do Grupo Bauru apresentando elevada taxa de infiltração; uma segunda feição foi estabelecida pela presença de um relevo estruturado em degraus pelos derrames basálticos, onde ocorrem as maiores concentrações de descargas, existindo várias nascentes que se formam no contato entre os sedimentos de topo e o basalto. Essa caracterização do relevo pode ser melhor apreciada na Figura 4, em que a sede municipal está localizada na região plana (FONDO DE UNIVERSIDADES, 2006).

Bertol (2007) destaca que a localização do município de Araguari sobre a chapada que separa as bacias do rio Araguari e Paranaíba resulta em uma elevada infiltração e pouco escoamento superficial, devido à topografia plana da região, propiciando o suprimento de água no município de origem subterrânea, predominantemente pelo Aquífero Bauru. Segundo o CPRM (2012), o aquífero Bauru é intensamente explotado e o suprimento de água para o abastecimento público, irrigação e uso industrial é feito quase exclusivamente por suas águas, gerando conflitos entre os usuários.

A descarga, segundo o Fondo de Universidades (2006) ocorre formando diversas nascentes na quebra topográfica da chapada que marca o contato entre a sequência sedimentar do aquífero Bauru e o basalto do Serra Geral, entre as cotas 880 m e 900 m, a maioria dessas nascentes constituem tributários de 1^a ou 2^a ordem dos rios Araguari e Paranaíba.

Figura 4 – Figura do Relevo do município de Araguari com apresentação da hidrografia



Fonte: Fondo de Universidades

Avaliação dos Recursos Hídricos do Sistema Aquífero Guarani (SAG) no município de Araguari-2006,p.1.23

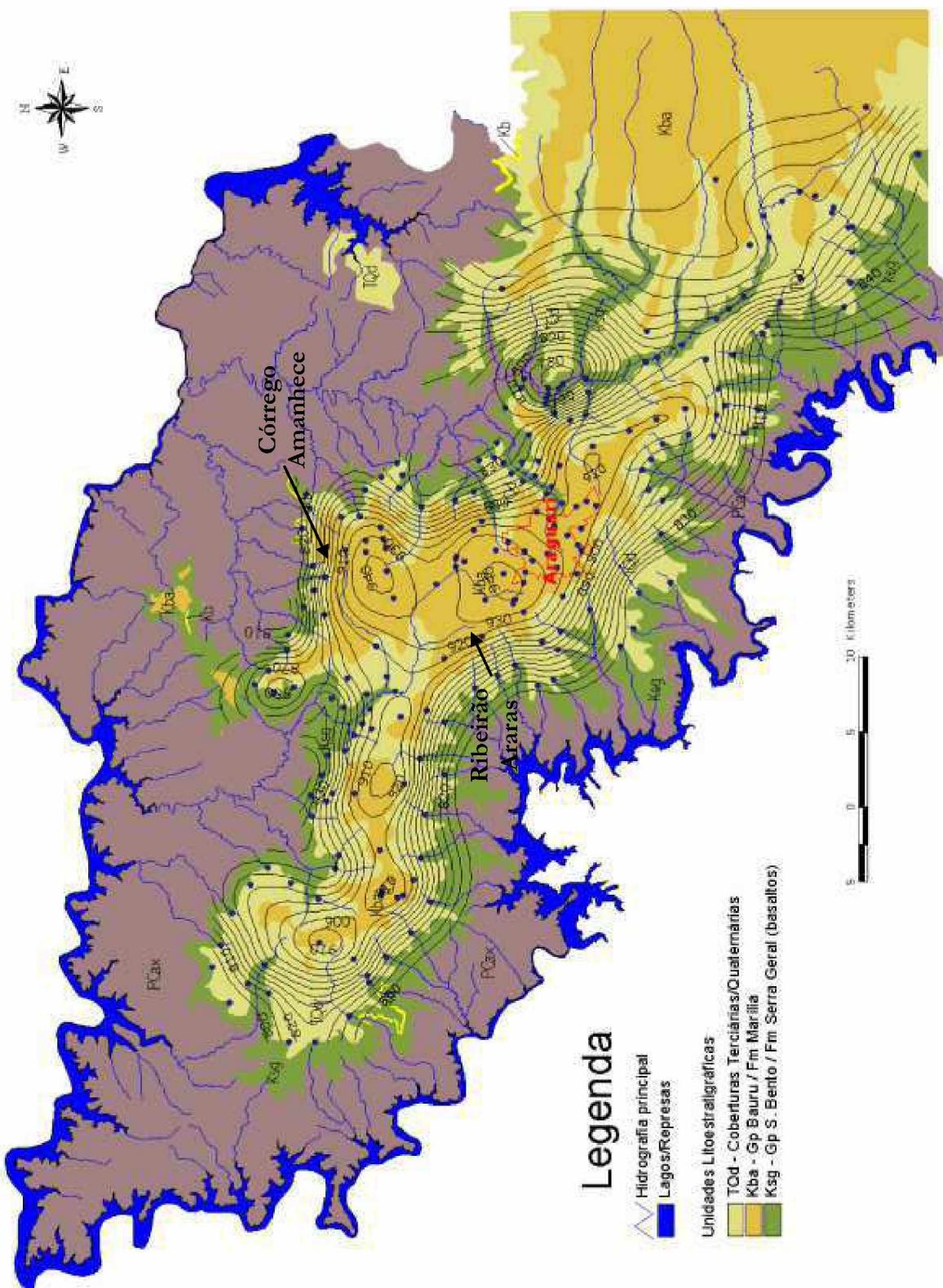
Segundo Fondo de Universidades (2006) e Alamy Filho et al. (2013) o regime pluviométrico é característico de áreas tropicais com precipitações máximas no verão e mínimas no inverno, índice pluviométrico anual de 1589 mm e o período de chuvas concentra-se entre os meses de outubro a março. O clima é caracterizado pelo predomínio de temperaturas amenas durante todo o ano com média mensal de 22 °C.

A configuração da superfície piezométrica apresentada na Figura 5 mostra um grande divisor de água subterrânea ao longo de toda a chapada no sentido noroeste sudeste, região que constitui a zona de recarga direta. Segundo o Fondo de Universidades (2006), destacam-se duas importantes áreas de recarga, uma situada na cabeceira do Córrego Amanhece, a norte do município de Araguari, e outra na porção central, junto à cabeceira do Ribeirão Araras, onde está situada a parte norte da cidade de Araguari. Na mancha urbana de Araguari, a recarga aquífera provém de duas origens, sendo uma direta, proveniente da precipitação, e a indireta, por meio de ações antrópicas, destacando-se como mais importantes os vazamentos da rede de distribuição de água potável, de coleta de esgotos e de água pluvial.

No mapa da superfície piezométrica apresentado na Figura 5, estão posicionados os pontos amostrais utilizados na elaboração da superfície freática, foram utilizados 85 poços profundos e 130 nascentes. Em vermelho está apresentada o limite da mancha urbana de Araguari (FONDO DE UNIVERSIDADES, 2006).

A natureza pouco profunda desse aquífero e o seu material litológico facilitam a exploração preponderante na cidade de Araguari, com elevada densidade de poços em algumas áreas, como na zona urbana e em determinadas localidades agrícolas (FONDO DE UNIVERSIDADES, 2006). Estima-se que a quantidade de poços perfurados seja superior a mil, considerando as perfurações legalizadas e não legalizadas. A médio e longo prazos, a exploração do aquífero pode comprometer a produtividade dos poços, uma vez que os dados são muito limitados e incompletos, sobretudo relacionado às características construtivas dos poços e informações litológicas e locacionais. Ressalta-se, ainda, que toda a área urbana de Araguari se encontra edificada acima desse aquífero, elevando o risco de poluição direta do mesmo (FONDO DE UNIVERSIDADES, 2006).

Figura 5 – Figura do Mapa da superfície piezométrica do Aquífero Bauru em Araguari



Fonte: Fondo de Universidades

Avaliação dos Recursos Hídricos do Sistema Aquífero Guarani (SAG) no município de Araguari–
2006, p.1.27

2.1.2.1. TRABALHOS RELACIONADOS AO AQUÍFERO BAURU EM ARAGUARI

Alguns trabalhos foram realizados em Araguari, relacionados ao Aquífero Bauru, estes visaram determinar os parâmetros hidrogeológicos, simulações de fluxo, gestão do aquífero, entre outros, a Tabela 1 relaciona alguns desses trabalhos. Vale ressaltar que não foi possível ter acesso a todos os documentos listados.

Tabela 1 - Relação de trabalhos relacionados à pesquisa

Título	Autores	Ano
Relatório Hidrogeológico SAE	Romano, Antônio Wilson Paiva, Cibele Teixeira	2001
O Sistema Aquífero Bauru na Região de Araguari/ MG: propostas de gestão e parâmetros dimensionais	Oliveira, Luiz Antônio de	2002
Sequência conglomerática do membro Araguari – Grupo Bauru – Norte do Triângulo Mineiro	Oliveira, Luiz Antônio de Campos, José Elio Guimarães	2003
Caracterização do Sistema Hidrogeológico Bauru no município de Araguari	Fiumari, Sebastião Luiz	2004
Relatório Final: Caracterização hidrogeológica do município de Araguari	Velásquez, L. N. Menegasse Romano, Antônio Wilson	2004
Parâmetros hidrogeológicos do sistema Aquífero Bauru na região de Araguari/MG: Fundamentos para a gestão do sistema de abastecimento de água	Oliveira, Luiz Antônio de Campos, José Elio Guimarães	2004
Avaliação dos recursos hídricos do Sistema Aquífero Guarani no município de Araguari, Minas Gerais, Brasil	Fondo de Universidades	2006
Avaliação da recarga anual no Aquífero Bauru no município de Araguari, Minas Gerais	Bertol, Gisele Ana	2007
Simulação matemática de fluxo de água subterrânea no Aquífero Bauru no município de Araguari, MG	Cota, Stella et al.	2007
Caracterização hidrogeológica dos Aquíferos Bauru e Serra Geral e avaliação das reservas do aquífero Bauru no município de Araguari, Minas Gerais	Velásquez, L. N. Menegasse et al.	2008

Título	Autores	Ano
Técnicas isotópicas aplicadas em estudos hidrogeológicos no município de Araguari, MG	Minardi, P.S.P. et al.	2008
Vulnerabilidade à poluição das águas subterrâneas – um estudo do Aquífero Bauru na zona urbana de Araguari, MG	Souza, Nathália Assunção de	2009
Um modelo híbrido para simulação de escoamento em aquíferos situados em zonas urbanas	Alamy Filho, José Eduardo Segantini, Marília de Oliveira	2010
Mapeamento do sistema Aquífero Bauru subjacente à cidade de Araguari - MG	Alamy Filho, José Eduardo Segantini, Marília de Oliveira	2010
Mapeamento do Aquífero Bauru situado sob a zona urbana de Araguari, MG	Segantini, Marília de Oliveira	2010
Modelagem e simulação do escoamento em aquíferos sotopostos a zonas urbanas	Miranda, M. Crescêncio de	2012
Diagnóstico da qualidade da água do Aquífero Bauru na área urbana de Araguari, MG	Alamy Filho, José Eduardo Borges, Eduardo H. Campos Oliveira, André Luiz de	2013
Monitoramento do Aquífero Bauru na zona urbana de Araguari/MG: da obtenção de dados primários à simulação numérica do escoamento das águas subterrâneas	Alamy Filho, José Eduardo et al.	2013

Fonte: Autora

Alguns desses trabalhos são complementares, artigos que se originaram de relatórios mais complexos. Da lista relacionada na Tabela 1 destacam-se dois trabalhos que tiveram uma abordagem mais global, com análises mais completas a respeito do Aquífero Bauru, o ‘Informe Final’ elaborado pelo Fondo de Universidades (2006) e o ‘Relatório Final’ elaborado por Alamy Filho et al. (2013).

O Informe Final elaborado pelo Fondo de Universidades (2006) foi realizado em parceria com várias instituições e teve por objetivos: elaborar um modelo hidrogeológico no município, avaliar a recarga do aquífero pelos métodos do balanço hídrico e traçador de tritio, avaliação da vulnerabilidade natural, entre outros.

Segundo este relatório, na região de Araguari, a espessura mais frequente a partir das informações das profundidades dos poços perfurados está entre 50m e 60 m, com média

de 54 m, e a espessura saturada média está em torno de 38 m. Os valores médios de vazão e capacidade específica são de $22 \text{ m}^3/\text{h}$ e $1,0 \text{ m}^3/\text{h/m}$. O Aquífero Bauru na área possui condutividade hidráulica de $2,13 \times 10^{-3} \text{ cm/s}$ porosidade efetiva estimada em 0,12, permeabilidade média de $2,3 \times 10^{-3} \text{ cm/s}$ e transmissividade média de $76 \text{ m}^3/\text{h/m}$.

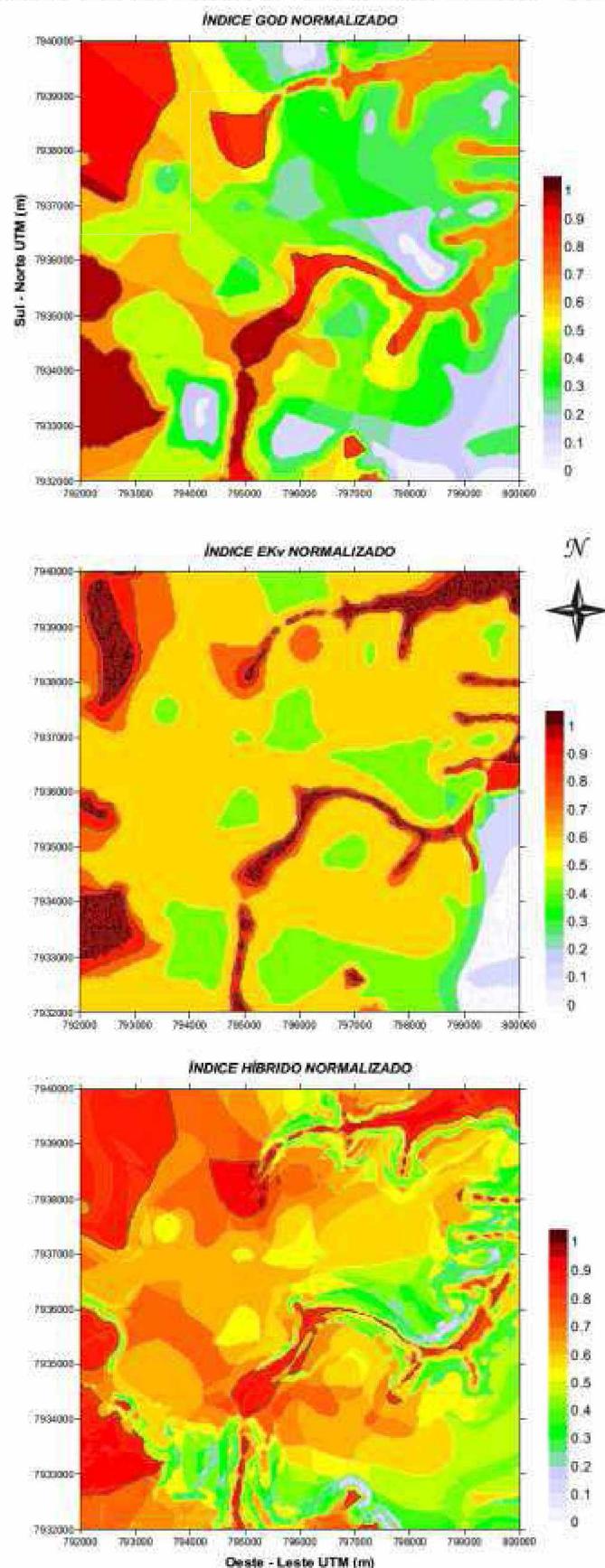
O Relatório Final elaborado por Alamy Filho et al. (2013) também apresenta uma visão global do Aquífero Bauru com foco na malha urbana do município. Esse trabalho teve por objetivos: analisar a vulnerabilidade intrínseca do aquífero à poluição, mapear os parâmetros hidrogeológicos do aquífero, modelar e simular o escoamento da água subterrânea e analisar a qualidade da água.

Alamy Filho et al. (2013) visando, inicialmente o estudo de vulnerabilidade intrínseca, buscaram informações que dessem base para o mapeamento da área urbana, de 64 km^2 , foram coletados dados em campo e na literatura, tais como: coordenadas dos poços, profundidade do lençol, perfis litológicos, curvas de nível e condutividade hidráulica, o resultado dessa primeira parte de informações está apresentado no trabalho de Souza (2009) que apresenta valores para a condutividade hidráulica superficial variando de $1,16 \times 10^{-3} \text{ cm/s}$ a $6,74 \times 10^{-2} \text{ cm/s}$.

Os valores apresentados em Souza (2009) são superiores àqueles apresentados pelo Fondo de Universidades (2006) para a condutividade hidráulica profunda do aquífero, portanto a condutividade hidráulica superficial e profunda possuem valores diferentes, caracterizando um aquífero anisotrópico e heterogêneo diferente de vários trabalhos que tem considerado o aquífero homogêneo.

Alamy Filho et al. (2013) aplicaram os métodos GOD e EKv (apresentados no item 2.1.3) para a análise de vulnerabilidade, além desses, foi elaborado um complemento com outros parâmetros, como condutividade hidráulica vertical e declividade associados ao método GOD, delimitando um método chamado pelos autores de método Híbrido. A Figura 6 apresenta esses resultados normalizados.

Figura 6 - Comparativo entre três métodos de vulnerabilidade intrínseca – GOD, EKv e Híbrido



Fonte: Alamy Filho et al. (2013)

Na avaliação dos parâmetros hidrogeológicos, o trabalho de Segantini (2013) apresenta o resultado de levantamento de dados obtidos na literatura e em 65 poços distribuídos na região. Os parâmetros avaliados foram condutividade hidráulica, rendimento específico, transmissividade e espessura saturada.

Miranda (2012) apresenta a elaboração de mapas que modelam e simulam matematicamente o escoamento em aquíferos livre, os mapas elaborados abrangem a área estudada em estudos de fluxo do aquífero com simulações temporais (7, 91, 224 e 364 dias de simulação) determinando as espessuras saturadas.

Além do resultado desses trabalhos, Alamy Filho et al. (2013) apresenta estudo da qualidade da água baseado na amostra de 68 poços, parâmetros como DBO, DQO, nitrato, nitrito, fósforo total, pH, cor, turbidez entre outros, foram analisados e os resultados não indicaram um cenário de poluição da água subterrânea.

Durante o processo de coleta de dados junto aos profissionais que atuam no município houve relatos de dois poços que já apresentam poluição por coliformes, tais poços estão situados no entorno do Córrego Brejo Alegre, região que concentra os rejeitos domésticos de grande parte da malha urbana. Um dos poços foi desativado e o outro, que serve para abastecimento de um prédio, vem tendo a água tratada conforme orientações dos técnicos e engenheiros do SAE para que a água seja utilizada.

Nem todo o esgoto doméstico do município é tratado, a exemplo da região central cuja totalidade do esgoto é lançada no córrego Brejo Alegre, afluente do Rio Paranaíba. Existe no município a obrigatoriedade de executar em todas as residências uma fossa séptica que faz um tratamento preliminar, antes do esgoto ser lançado na rede municipal. No entanto, existem casos de ligações clandestinas de esgotamento sanitário nas redes de drenagem pluvial e casos de residências sem a fossa séptica, as quais foram detectadas em 2013 quando a Superintendência de Água e Esgoto – SAE iniciou um trabalho com injeção de fumaça nas redes do município, detectando esses defeitos construtivos.

2.1.3. VULNERABILIDADE E RISCO A POLUIÇÃO

A vulnerabilidade é a capacidade maior ou menor de proteção das águas subterrâneas em relação aos agentes poluidores. Na literatura são apresentados dois conceitos de vulnerabilidade, a vulnerabilidade intrínseca e a vulnerabilidade específica. A primeira, também chamada de vulnerabilidade natural, é usada para representar as características do meio que determinam a sensibilidade das águas subterrâneas serem poluídas pelas atividades humanas. É determinada por parâmetros que levam em consideração somente as características do sistema aquífero. A segunda, também definida como risco, é utilizada para determinar a vulnerabilidade do aquífero frente a um poluente particular ou um conjunto de poluentes, levando em consideração a propriedade dos poluentes e as relações destes com as diversas características da vulnerabilidade intrínseca (MARDHEL, PINSON; 2008).

A distinção desses dois tipos de vulnerabilidade se faz necessário pois, de modo geral, as duas não se aplicam na mesma escala de investigação, a vulnerabilidade intrínseca (chamada de vulnerabilidade) pode ser considerada como invariável no tempo, já a vulnerabilidade específica (também chamada de risco), é caracterizada em relação a um momento específico, diretamente ligada a existência e localização de eventuais poluentes (MARDHEL, PINSON; 2008).

A vulnerabilidade de um aquífero pode ser definida como as características intrínsecas dos meios que separam a zona saturada do aquífero da superfície do terreno, determinando sua susceptibilidade de ser adversamente afetado por uma carga poluente aplicada na superfície. A vulnerabilidade, portanto, é uma propriedade inerente ao aquífero, não dependente do poluente nem da carga aplicada, elementos que, junto com o risco à poluição, permitem a elaboração de mapas de risco ou periculosidade de poluição do aquífero pelo poluente e a carga aplicada (OLEAGA, PACHECO, FELLER, 2009).

Segundo Foster e Hirata (1988) é difícil determinar a ocorrência e características de um poluente específico, uma solução viável é tratar dos agentes poluidores por grupos de atuação em função das atividades geradoras, predominantes na área, através de graus de potencial poluidor. O autor sugere a determinação de atividades e seus graus de poluição.

A água normalmente é usada para abastecimento humano, uso industrial e irrigação. Considerando o município de Araguari, a maior parte da água captada não recebe tratamento antes de retornar ao meio, como em muitos municípios brasileiros. O uso indiscriminado e com pouco ou nenhum planejamento pode acarretar em prejuízo ao Aquífero a médio e longo prazo. Segundo CPRM (2012), os problemas de poluição relacionam-se ao esgotamento sanitário, à disposição de resíduos sólidos, aos resíduos industriais e aos vazamentos em postos de combustível.

Oleaga, Pacheco e Feller (2009) descrevem algumas atividades de poluição de água subterrânea, das quais se destacam: atividade agrícola, rede de esgotamento sanitário e/ou falta de saneamento, postos de gasolina e oficinas mecânicas, disposição de resíduos sólidos, indústrias metalúrgicas, indústrias madeireiras, curtumes, entre outras. Observa-se que o uso e ocupação do solo está diretamente relacionado à poluição, por essa razão, mapas de vulnerabilidade e risco são ferramentas para gestão do uso do solo, e sua estimativa deve basear-se em informações confiáveis que representem adequadamente o modelo conceitual de funcionamento hidrogeológico da área.

Sabendo que a água utilizada nas diversas atividades humanas não mantém o mesmo padrão de qualidade ao ser devolvida ao meio, gera-se uma sobrecarga no processo de depuração natural dos rios e dos aquíferos, podendo atingir mananciais subterrâneos ao penetrar no solo e prejudicar a qualidade das reservas disponíveis. Torna-se ainda mais preocupante o uso da água na região de Araguari, uma vez que, segundo o Fondo de Universidades (2006), pressupõe-se que existe um excedente hídrico do Aquífero Bauru que recarrega o Aquífero Serra Geral.

Conforme Oleaga, Pacheco e Feller (2009) a lenta circulação da água subterrânea, a degradação natural e as características próprias do poluente fazem com que transcorram vários anos antes que o impacto de um episódio de poluição por um elemento poluente fique plenamente evidente, isto é, seja detectado em poços de extração ou monitoramento.

Visando evitar esse processo de poluição do manancial, o planejamento do uso e ocupação do solo deve ser um norteador no sentido de preservar e proteger visando a

manutenção dessa fonte que uma vez comprometida, grandes volumes do aquífero já terão sido afetados implicando em altos custos de reparação.

Segundo Souza (2009) é necessário a implementação de uma gestão que considere áreas susceptíveis à poluição das águas subterrâneas já que o Aquífero Bauru se apresenta como a alternativa mais viável para o abastecimento da população de Araguari. A vulnerabilidade intrínseca do aquífero, se apresenta principalmente na região central da zona urbana, a qualidade da água indicou, em 2009, a existência de poluição em decorrência das atividades humanas e expansão da área urbana. Souza (2009) avaliou alguns parâmetros de qualidade da água do Aquífero Bauru. Foram analisados a Demanda Bioquímica de Oxigênio (DBO), coliformes e Nitrato (NO_3); alguns resultados apresentaram valores acima do estabelecido pelas normas vigentes (Resolução 357 do CONAMA), tornando preocupante e necessário estudos que levassem em consideração o risco de poluição dessas águas.

O mapa de vulnerabilidade se apresenta, como uma ferramenta básica de proteção evidenciando a propensão à poluição das águas subterrâneas. As áreas de risco, conforme Amharref e Bernoussi (2007), necessitam de proteção quando as atividades antrópicas estão presentes e não podem ter sua localização alterada ou interrompidas. Dependendo do contexto hidrogeológico da região, essa proteção deve garantir a sustentabilidade das águas subterrâneas tendo em vista a manutenção das atividades desenvolvidas.

Foster, Hirata e Rocha (1988) alertam que os mapas de vulnerabilidade devem ser avaliados com certa precaução, já que não existe uma vulnerabilidade geral e um contaminante universal, mas o mapeamento pode ser útil a nível de reconhecimento da fragilidade do aquífero. Os autores ressaltam que, sobre o mapa de vulnerabilidade, podem ser lançados os pontos referentes às fontes de poluição. Esse exame conjunto de áreas mais vulneráveis associado às fontes de poluição resultará em áreas críticas que devem ser objeto de estudos de detalhe, com monitoramento e medidas de proteção.

O foco do trabalho é a determinação das áreas com potencial de risco de poluição do aquífero Bauru em relação ao uso atual e em relação à cenários de ampliação do espaço urbano.

Segundo Oleaga, Pacheco e Feller (2009) podem-se organizar ações locais com o principal objetivo de proteger zonas de captação, perfuração ou de um conjunto delas, delimitando zonas em que se proíbem ou limitam determinadas atividades, a fim de garantir a qualidade da água de abastecimento adequada para vazões de bombeamento e períodos de tempo determinados.

Ainda segundo Oleaga, Pacheco e Feller (2009), ações regionais ou globais que podem ser tomadas para proteger o manancial subterrâneo levam em consideração – entre outras coisas – o tipo de aquífero (poroso, fissural ou cárstico), suas características hidráulicas (livre, confinado, semiconfinado), características da zona não saturada (vadosa), zonas de recarga e descarga, níveis piezométricos, parâmetros hidráulicos (transmissividade), o tipo de poluente, as zonas mais ou menos sensíveis à entrada de poluentes a partir da superfície do terreno.

Segundo os autores, estas zonas são traçadas em mapas de fácil visualização, denominados mapas de vulnerabilidade, em que aparecem, em várias cores, áreas com diferentes graus de sensibilidade do aquífero à poluição por poluentes. Nesse caso, podem ser usadas diversas metodologias, que requerem diferentes níveis de conhecimento do aquífero e trabalhos em escala adequada. A partir delas pode-se chegar a uma ferramenta de gestão de atividades (de acordo com possíveis impactos dos poluentes) para cada uma das áreas (OLEAGA, PACHECO, FELLER, 2009).

2.1.3.1. MAPA DE VULNERABILIDADE

Segundo Auge (2004), Jean Margat, em 1968, foi quem introduziu o termo ‘vulnerabilidade de água subterrânea à poluição’, a partir disso, diversos métodos para determinação da vulnerabilidade foram desenvolvidos. Os métodos mais utilizados na qualificação e mapeamento da vulnerabilidade, segundo Auge (2004), são:

- DRASTIC – desenvolvido por Aller et al, em 1987, para a agência norte americana de meio ambiente EPA (US Environmental Protection Agency), é um

método muito difundido e utiliza sete parâmetros de avaliação (um dos métodos mais robustos);

- SINTACS – uma variação do DRASTIC, desenvolvido por Civita et al, em 1990, para adequá-lo às diversas características hidrogeológicas da Itália e para requerer um mapeamento de maior detalhamento. Também utiliza sete parâmetros de avaliação, os mesmos utilizados no DRASTIC;
- GOD – método proposto por Foster, em 1987, se baseia em três variáveis que são ponderadas para chegar à espacialização das áreas vulneráveis;
- EPIK – método utilizado para aquíferos cársticos, desenvolvido por Doerfliger e Zwahlen, em 1997, e utiliza quatro variáveis para avaliação;
- EKv – desenvolvido por Auge, em 1995, utiliza dois parâmetros de avaliação, e segundo Auge (2004) é um conceito qualitativo, que se refere ao grau de proteção natural do aquífero frente à poluição;
- $\Delta hT'$ – método desenvolvido para aquíferos semiconfinados, utiliza dois parâmetros e foi desenvolvido por Auge (2004).

A dificuldade na escolha do método a ser utilizado repousa em vários fatores, e segundo Auge (2014), alguns elementos devem ser considerados na escolha da técnica a ser empregada. O aquífero é importante, pois cada método tem sua aplicação voltada para um determinado tipo de aquífero (livre, confinado, cárstico etc.); o conhecimento da metodologia pretendida também é um fator importante; a área de abrangência, dependendo da escala pretendida. Em função desses, um ou outro método é mais indicado e as informações disponíveis, fundamentais na aplicação dos métodos, pode ser um limitador da técnica a ser aplicada.

Os métodos escolhidos para aplicação na área de estudo são o DRASTIC e o GOD, o primeiro por ser amplamente aplicado, mais robusto e empregar uma quantidade maior de parâmetros de avaliação quando comparado com outros métodos; o segundo por existirem outros trabalhos na mesma área de estudo que fizeram uso desse método, permitindo assim comparação dos resultados.

2.1.3.1.1. DRASTIC

Na aplicação do método DRASTIC, cada característica analisada representa um parâmetro hidrogeológico do aquífero e é avaliado segundo um peso que varia de 1 a 5, conforme apresentado na Tabela 2, sendo 5 aferido para os itens mais significativos e 1 para os menos importantes. Os parâmetros avaliados nesse método são: profundidade da água (D), recarga do aquífero (R), material do aquífero (A), tipo de solo superficial (S), topografia avaliada pela declividade (T), impacto da zona vadosa ou zona não saturada (I) e condutividade hidráulica (C).

Tabela 2 - Pesos do Método DRASTIC

Fator	Significado do termo em inglês	Significado do termo em português	Peso
D	Depth to the water table	Profundidade da água	5
R	Net Recharge	Recarga	4
A	Aquifer material	Material do aquífero	3
S	Soil type	Tipo de solo	2
T	Topography	Topografia	1
I	Impact of the unsaturated zone	Impacto da zona vadosa	5
C	Hydraulic Conductivity	Condutividade hidráulica	3

Fonte: Adaptado de Homero Reis de Melo Junior (2008)

Além do peso imputado aos parâmetros de análise do aquífero, a cada variável também é atribuída um fator cuja pontuação varia de 1 a 10, 10 indicando maior vulnerabilidade e 1 maior proteção do aquífero. As Tabelas 3, 4, 5, 6, 7, 8 e 9 apresentam os valores atribuídos em função das propriedades de cada parâmetro, em cada uma delas podem ser visualizados os valores de 1 a 10, na parte inferior das tabelas observa-se o peso em função do parâmetro em análise.

Segundo Melo Junior (2008) esse sistema permite determinar um valor numérico para cada ambiente hidrogeológico, resultado da ponderação dos parâmetros. Para cada um deles avaliado o resultado será a produção de um mapa com apresentação visual em escala numérica que representa a vulnerabilidade.

A Tabela 3 apresenta o parâmetro de profundidade do nível do lençol freático e a respectiva pontuação atribuída em função da profundidade (D_C). O peso atribuído ao parâmetro de profundidade é 5, sendo, portanto, muito significativo no método estudado. Segundo Alamy Filho et al. (2013) a profundidade do topo do aquífero indica a camada que um poluente precisaria atravessar para atingir a região saturada do solo, espessuras menores implicam em maior vulnerabilidade.

Tabela 3 - Profundidade do nível da água e valores de pontuação atribuídos em função da Vulnerabilidade (D_C)

Profundidade (m)	Valor atribuído (D_C)
0 – 1,5	10
1,5 – 4,5	9
4,5 – 9,0	7
9,0 – 15,0	5
15,0 – 22,5	3
22,5 – 30,0	2
>30,0	1
Peso – 5 (D_p)	

Fonte: Homero Reis de Melo Junior (2008)

A Tabela 4 apresenta o parâmetro de recarga do lençol freático e a respectiva pontuação atribuída em função da taxa de infiltração (R_C). O peso atribuído ao parâmetro de recarga é 4, sendo, portanto, significativo no método estudado. Segundo Alamy Filho et al. (2013) a recarga está vinculada ao transporte de um poluente à zona saturada, quanto maior a taxa de infiltração, maior a probabilidade do poluente atingir o aquífero.

Tabela 4 - Taxas de infiltração (recarga) e seus respectivos valores de pontuação atribuídos em função da Vulnerabilidade (R_C)

Taxa de infiltração (mm/ano)	Valor atribuído (R_C)
<51	1
51 – 102	3
102 – 178	6
178 – 254	8
>254	9
Peso – 4 (R_p)	

Fonte: Homero Reis de Melo Junior (2008)

A Tabela 5 apresenta o parâmetro do material do aquífero e o respectivo valor atribuído em função do Litotipo, além da faixa de valores está apresentado o valor médio adotado (A_C). O peso atribuído ao parâmetro do material do aquífero é 3, sendo, portanto, medianamente significativo no método estudado. Segundo Alamy Filho et al. (2013) o material do aquífero condiciona o fluxo de água, determinando o tempo para ocorrência dos processos de poluição, solo com constituição mais porosa proporciona maior vulnerabilidade.

Tabela 5 - Litotipos que compõem o aquífero e seus valores de pontuação atribuídos em função da Vulnerabilidade (A_C)

Litotipo	Valor atribuído	Valor médio adotado (A_C)
Folhelho maciço	1 – 3	2
Ígneas / metamórficas	2 – 5	3
Ígneas / metamórficas intemperizadas	3 – 5	4
Till glacial	4 – 6	5
Arenito acamadado, calcário e folhelho sequencial	5 – 9	6
Arenito maciço	4 – 9	6
Calcário maciço	4 – 9	6
Areia e cascalho	4 – 9	8
Basalto	2 – 10	9
Calcário cárstico	9 – 10	10
Peso – 3 (A_P)		

Fonte: Homero Reis de Melo Junior (2008)

A Tabela 6 apresenta o parâmetro do tipo de solo da superfície e o respectivo valor atribuído em função do tipo de material (S_C). O peso atribuído ao parâmetro do material do aquífero é 2, sendo, portanto, pouco significativo no método estudado. Segundo Alamy Filho et al. (2013) o tipo de solo considera a espessura normalmente inferior a 2 m. Esse parâmetro é importante para a infiltração da água, determinando a qualidade da recarga, e também para o potencial atenuador da poluição, solo com constituição mais porosa proporciona maior vulnerabilidade. A ausência da camada superior (afloramento do aquífero) caracteriza maior suscetibilidade à poluição.

Tabela 6 - Tipos de solo e seus valores de pontuação atribuídos em função da Vulnerabilidade (S_c)

Tipo de solo	Valor atribuído (S_c)
Fino ou ausente	10
Cascalho	10
Arenoso	9
Turfoso	8
Argila agregada e/ou contraída	7
Marga ² arenosa	6
Marga	5
Silte margoso	4
Argila margosa	3
Lixo/esterco	2
Argila desagregada e não expansível	1

Peso – 2 (S_p)

Fonte: Homero Reis de Melo Junior (2008)

A Tabela 7 apresenta o parâmetro de declividade do terreno e a respectiva pontuação atribuída em função da inclinação do relevo (T_c). O peso atribuído ao parâmetro de inclinação é 1, sendo, portanto, pouco significativo no método estudado. Segundo Alamy Filho et al. (2013) esse parâmetro está relacionado com a probabilidade do poluente escoar ou permanecer na superfície e infiltrar.

Tabela 7 - Inclinação do relevo e seus valores de pontuação atribuídos em função da Vulnerabilidade (T_c)

Inclinação do relevo (%)	Valor atribuído (T_c)
0 – 1	10
1 – 6	9
6 – 12	5
12 – 18	3
>18	1

Peso – 1 (T_p)

Fonte: Homero Reis de Melo Junior (2008)

² Marga é o nome de uma rocha sedimentar, calcária, contendo de 35 a 60% de argila. Sua coloração varia de uma cor bem clara a cinzenta escura ou acastanhada.

A Tabela 8 apresenta o parâmetro de solo que constitui a zona vadosa e a respectiva pontuação atribuída e o valor médio (I_C). O peso atribuído ao parâmetro de litotipo da zona vadosa é 5, sendo, portanto, muito significativo no método estudado. Segundo Alamy Filho et al. (2013) o tipo de material da zona vadosa (zona não saturada) está relacionado com a atenuação do poluente nessa camada que se apresenta particularmente importante pois dependendo da constituição litológica pode facilitar ou atenuar o contato do poluente com o lençol freático.

Tabela 8 - Litotipos que constituem a zona vadosa e seus valores de pontuação atribuídos em função da Vulnerabilidade (I_C)

Zona vadosa	Valor atribuído	Valor médio adotado (I_C)
Camada confinante	1	1
Silte/argila	2 – 6	3
Folhelho	2 – 5	3
Calcário	2 – 7	6
Arenito	4 – 8	6
Calcário acamulado, arenito, folhelho	4 – 8	6
Areia e cascalho com significante silte e argila	4 – 8	6
Ígneas/metamórficas	2 – 8	4
Areia e cascalho	6 – 9	8
Basalto	2 – 10	9
Calcário cárstico	8 – 10	10
Peso – 5 (I_P)		

Fonte: Homero Reis de Melo Junior (2008)

A Tabela 9 apresenta o parâmetro de condutividade hidráulica da zona vadosa do aquífero e a respectiva pontuação atribuída (C_C). O peso atribuído ao parâmetro de condutividade hidráulica é 3, sendo, portanto, medianamente significativo no método estudado. Segundo Alamy Filho et al. (2013) a condutividade hidráulica é uma propriedade hidrogelogica importante dos aquíferos e se relaciona com a quantidade e a conexão dos vazios na formação, vincula-se diretamente com a velocidade de percolação da água no aquífero.

Tabela 9 – Condutividade hidráulica e seus valores de pontuação atribuídos em função da Vulnerabilidade (C_c)

Condutividade hidráulica (m/dia)	Valor atribuído (C_c)
0 – 4,1	1
4,1 – 12,2	2
12,2 – 28,5	4
28,5 – 40,7	6
40,7 – 81,5	8
>81,5	10
Peso – 3 (C_p)	

Fonte: Homero Reis de Melo Junior (2008)

O resultado de cada parâmetro será um mapa classificado segundo os valores de 1 a 10 conforme tabelas anteriores. Cada mapa será ponderado segundo o peso de 1 a 5 definido segundo cada parâmetro, sendo 5 atribuído para as propriedades mais significativas e 1 para as menos significativas. O resultado final será dado pela soma desses parâmetros, gerando um mapa final quantitativo que representa a avaliação do método DRASTIC. O resultado dessa soma é, portanto, a vulnerabilidade do aquífero para cada região em termos numéricos. A equação 1 ilustra essa ponderação.

$$\text{Índice DRASTIC} = D_p \cdot D_c + R_p \cdot R_c + A_p \cdot A_c + S_p \cdot S_c + T_p \cdot T_c + I_p \cdot I_c + C_p \cdot C_c \quad (1)$$

Depois de somados, o índice DRASTIC é dividido em quatro classes de vulnerabilidade, áreas com baixa vulnerabilidade apresentam valores entre 26 e 71, média vulnerabilidade são atribuídas aos valores entre 71 e 126, alta vulnerabilidade entre 126 e 180 e por fim áreas de vulnerabilidade muito alta variam de 180 a 226. A Figura 7 apresenta a escala de vulnerabilidade com os respectivos valores limites e as cores atribuídas para cada classe de vulnerabilidade.

Figura 7 - Escala de vulnerabilidade intrínseca com seus valores



Fonte: Homero Reis de Melo Junior (2008)

2.1.3.1.2. GOD

No método GOD, são avaliados três parâmetros que caracterizam o aquífero. Segundo Foster, Hirata e Rocha (1988), o primeiro parâmetro (G) se refere ao tipo de ocorrência da água subterrânea, utilizando intervalo de 0 a 1, esse parâmetro diz respeito ao tipo do aquífero, confinado, semi-confinado, livre etc.; o segundo parâmetro (O) trata dos tipos litológicos acima da zona saturada do aquífero, relacionado ao grau de consolidação, existência de permeabilidade através de fissuras e das características granulométricas, possui intervalo de 0,4 a 1; e a terceira variável (D) é relacionada à profundidade do aquífero e possui intervalo de 0,4 a 1. A Tabela 10 apresenta o resumo dos parâmetros e suas faixas de valores relacionados à vulnerabilidade de cada parâmetro analisado.

Tabela 10 – Parâmetros do método GOD e valores da escala de vulnerabilidade

Parâmetro	Termo em inglês	Descrição do parâmetro	Faixa de Valores
G	Groundwater	Forma que se apresenta a água subterrânea	0,0 a 1,0
O	Overall	Caracterização da cobertura do aquífero quanto ao grau de consolidação e natureza litológica	0,4 a 1,0
D	Depth	Profundidade até o nível do lençol freático	0,6 a 1,0

Fonte: Alamy Filho et al. (2013)

O produto dos valores dos três parâmetros resulta no índice de vulnerabilidade, expresso em uma escala de 0 a 1. A Tabela 11 apresenta as faixas de resultados possíveis e características de cada classe delimitada pelo método GOD. A Figura 8 apresenta o diagrama resumo dos parâmetros e índices utilizados na avaliação da metodologia.

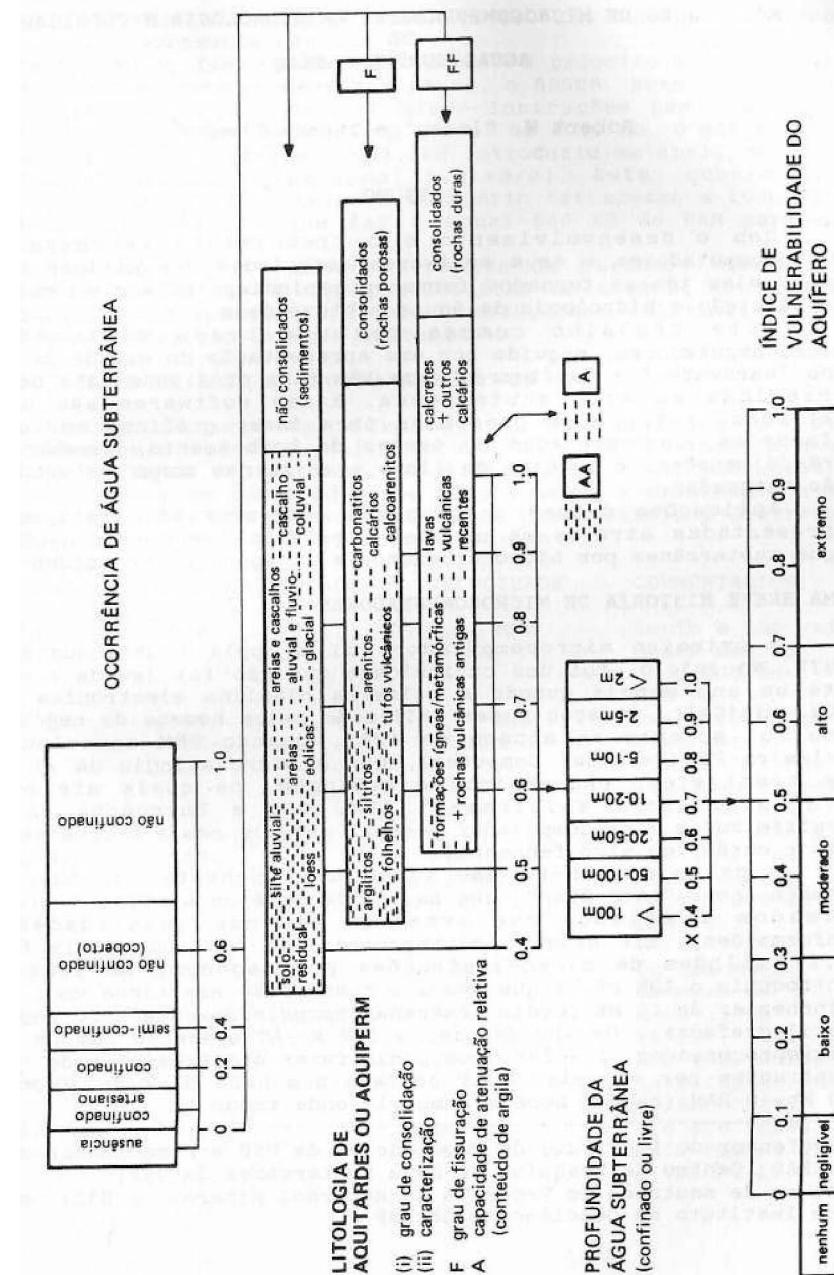
Tabela 11 - Classes e características do método GOD

Faixa de Valores	Classe	Característica
0 – 0,1	Insignificante	Desconsidera camadas confinantes com fluxos verticais descendentes não significativos
0,1 – 0,3	Baixo	Vulnerável a poluidores conservativos em longo prazo, quando continuamente e amplamente lançado
0,3 – 0,5	Médio	Vulnerável a alguns poluentes, mas somente quando continuamente lançado

Faixa de Valores	Classe	Característica
0,5 – 0,7	Alto	Vulnerável a muitos poluentes, exceto aqueles pouco móveis e pouco persistentes
0,7 -1,0	Extremo	Vulnerável a muitos poluentes, com rápido impacto em muitos cenários de poluição

Fonte: Barboza et al. Apud Alamy Filho et al. (2013)

Figura 8 – Parâmetros e índices para avaliação da vulnerabilidade - método GOD



Fonte: Foster, S.; Hirata, R.; Rocha, G (1988)

2.1.3.2. MAPA DE RISCO

O mapa de risco será elaborado segundo o estabelecido por Al-Adamat, Foster e Baban (2003). No qual um mapa de vulnerabilidade intrínseca é elaborado e acoplado ao mapa de uso e ocupação do solo buscando estabelecer uma relação espacial entre o uso do solo e a vulnerabilidade. O resultado dessa operação é demonstrado em um mapa com áreas mais suscetíveis de constituir focos de poluição. O objetivo desse método é determinar áreas que futuramente possam ser monitoradas, sejam áreas já ocupadas por atividades potencialmente poluidoras ou aquelas planejadas para serem ocupadas.

Na prática, a metodologia proposta por Al-Adamat, Foster e Baban (2003); Farjad et al. (2012) e Chenini, Zghibi e Kouzana (2015) é o método DRASTIC complementado por um parâmetro que envolve o uso e ocupação do solo. A Tabela 12 apresenta os valores atribuídos para tipo de uso e ocupação do solo, os quais são multiplicados pelo respectivo peso, no caso 5, que de acordo com a metodologia do DRASTIC atribui um peso significativo dentro da avaliação.

Tabela 12 – Uso e ocupação do solo e seus valores de pontuação atribuídos em função do potencial poluidor (L_c)

Uso do Solo	Valor atribuído (L_c)
Áreas de plantio irrigadas	10
Áreas industriais	10
Áreas residenciais / comerciais	9
Áreas de plantio não irrigadas	7
Brejo	5
Áreas não cultivadas	1
Peso – 5 (L_p)	

Fonte: Modificado de Farjad et al. (2012)

A equação 2 apresenta a forma de cálculo para determinação do índice de risco proposta por Al-Adamat, Foster e Baban (2003); Farjad et al. (2012) e Chenini, Zghibi e Kouzana (2015), o valor de L_p é o peso do parâmetro uso do solo e L_c é valor atribuído em função desse potencial poluidor de cada uso do solo.

$$\text{Índice Risco} = \text{Índice DRASTIC} + L_P \cdot L_C \quad (2)$$

A Figura 9 apresenta as faixas de valores na consideração do risco, o índice risco será considerado baixo se estiver entre 31 e 86, médio entre 86 e 154, alto entre 154 e 220 e muito alto entre 220 e 276. Esses valores foram modificados de Farjad et al. (2012) tentando manter a mesma faixa descrita por Melo Junior (2008) para o método DRASTIC, as cores apresentadas também foram mantidas.

Figura 9 - Escala de risco (vulnerabilidade específica) com seus valores



Fonte: Modificado de Farjad et al. (2012)

Foster, Hirata e Rocha (1988) relatam que sobre o mapa de vulnerabilidade podem ser marcados os pontos referentes à poluição, indicando suas principais características. As fontes de poluição podem ser pontuais (por exemplo postos de combustíveis) ou difusas (por exemplo redes de esgotamento sanitário). No caso das difusas, é mais prático delimitar áreas que representam o uso poluidor (distritos industriais, áreas residenciais etc.). Segundo os autores, o exame conjunto, em um mapa, das áreas mais vulneráveis associadas com as fontes potenciais de poluição resultam em áreas críticas que devem ser objeto de estudos detalhados, programas de monitoramento e medidas especiais de proteção.

Segundo Foster, Hirata e Rocha (1988) o mapa de vulnerabilidade e risco de poluição das águas subterrâneas, constitui uma base de planejamento para ações de gestão visando o controle e proteção dos aquíferos. Segundo os autores a delimitação de perímetros de proteção no entorno de poços ou baterias é importante, mas de difícil aplicação, o perímetro de proteção está centrado na proteção da zona não saturada que oferece uma barreira contra a poluição.

Al-Adamat, Foster e Baban (2003) apresentaram o resultado de uma pesquisa desenvolvida em parte da bacia Azraq na Jordânia, área com aquífero em basalto, intensamente explorada. O método DRASTIC foi aplicado visando uma avaliação da vulnerabilidade e o resultado foi sobreposto ao uso e ocupação do solo (conforme equação

2) gerando o mapa de risco, o estudo não utilizou o parâmetro da condutividade hidráulica devido à falta de dados para implementação desse parâmetro. O DRASTIC resultou em valores que foram de 92 a 139, variando de vulnerabilidade baixa (72 a 121) a moderada (122 a 170). Ressalta-se que os valores das faixas de vulnerabilidade são diferentes daqueles propostos por Melo Junior (2008). O risco ficou na faixa de baixo a moderado. O uso e ocupação do solo foi dividido em áreas construídas, áreas de plantio irrigado e áreas não cultivadas. Foi elaborado ainda uma análise referente à concentração de nitrato em alguns dos poços utilizados na elaboração dos mapas de vulnerabilidade e risco.

Farjad et al. (2012) realizaram um estudo de vulnerabilidade intrínseca do aquífero e criaram um mapa de risco para a Planície de Izeh, no Irã, utilizando o método DRASTIC modificado. A planície, localizada no sudoeste do Iran, cobre uma área de 140km², aproximadamente. O estudo cita como a principal desvantagem do DRASTIC sua subjetividade na avaliação e ponderação dos parâmetros do modelo, assim foi realizada uma análise de sensibilidade para otimizar os pesos na região de estudo. Desta forma, taxas e pesos do modelo DRASTIC original receberam valores mais apropriados com as características geológicas e hidrogeológicas do local. Por fim, o mapa de risco foi gerado integrando o mapa de vulnerabilidade intrínseca do aquífero com o mapa de uso e ocupação.

Chenini, Zghibi e Kouzana (2015) elaboraram mapas de vulnerabilidade intrínseca do aquífero Grombalia, na Tunisia. Foram aplicados os métodos DRASTIC, DRASTIC modificado e DRIST em uma área de aproximadamente 660 km². O método DRASTIC modificado possui alterações nos parâmetros de litotipo que compõe o aquífero e impacto da zona vadosa, tendo sido substituídos por parâmetros que envolviam a permeabilidade horizontal e vertical. O método DRIST é uma simplificação do DRASTIC, calculado da mesma forma, não contabilizando os parâmetros de litotipo que compõe o aquífero e condutividade hidráulica. Comparativamente, o método DRASTIC convencional apresentou valores de vulnerabilidade alta em 26% da área de estudo, o DRASTIC modificado 17% e o DRIST 66%. O mapa de risco foi elaborado a partir do uso e ocupação do solo conjuntamente com o método DRASTIC e este apresentou valores que variaram para um risco muito alto, enquanto que a vulnerabilidade teve como limite superior a vulnerabilidade alta.

Segundo Chenini, Zghibi e Kouzana (2015) deve-se evitar atividades poluentes em áreas de vulnerabilidade alta, criar áreas não cultivadas com o propósito de preservar o aquífero em regiões com qualidade de água já afetada e reduzir qualquer fonte de poluição visando minimizar os efeitos de perda de qualidade da água do aquífero. Medidas aparentemente simples, mas que nem sempre são colocadas em prática.

Diante do exposto, este trabalho busca determinar áreas que precisam de atenção imediata por parte da gestão municipal, através da sobreposição da vulnerabilidade do aquífero ao uso e ocupação atual. Já a sobreposição ao mapa do uso e ocupação do solo previsto pelo plano diretor urbano do município de Araguari, visa identificar áreas sensíveis que futuramente possam incorrer em áreas de poluição, caso existam, essas deverão ser objeto de proteção/monitoramento e uso por atividades de menor impacto para o aquífero.

Assim, a busca por delimitar essas áreas sensíveis do aquífero (vulnerabilidade) combinadas com fontes poluidoras (risco) visa garantir a qualidade do manancial hídrico do município de Araguari. Estabelecendo áreas de proteção e áreas que devam ser objeto de programas de monitoramento.

2.2. SISTEMAS DE APOIO À DECISÃO (SAD)

Sistemas de Apoio à Decisão (SAD) ou Sistemas de Suporte a Decisão (SSD) foram concebidos para dar suporte à tomada de decisões normalmente realizadas por seres humanos especialistas ou não. Trata-se de um sistema projetado para fornecer subsídios no processo decisório, tornando-o menos subjetivo, ordenando um número de opções para solução de um problema ou uma decisão de forma lógica e bem definida. Esta ordenação é representada através de pesos que caracterizam a importância relativa de cada uma das opções em relação às demais.

No contexto de decisões que envolvem fenômenos com distribuição espacial, Adiat, Nawawi e Abdullah (2012) afirmam que o SAD é um processo que transforma e combina dados geográficos e juízos de valor para obter informações que auxiliem no processo de tomada de decisão.

Os SAD contribuem na sistematização do conhecimento dos especialistas técnicos, que pode ser difuso em termos de entendimento e processo decisório, para a proposição e confirmação de hipóteses baseadas em dados e informações de diversas fontes. A estratégia mais comum adotada em SAD é a elaboração de cenários para caracterização de um problema e abordá-lo como subproblemas, ou problemas menores, como propostas de solução e análise pormenorizada dos mesmos. As alternativas de solução para cada cenário espelham as possíveis soluções ao problema, estas são elaboradas por especialistas. Segundo Longley et al. (2013) quando é necessário tomar decisões, é mais eficiente lidar primeiro com modelos e representações, visando explorar cenários distintos.

Segundo Malczewski e Rinner (2015), problemas que envolvam algum processo decisório são motivadores do SAD. Em uma escala mais rudimentar, um problema de decisão envolve um conjunto de alternativas que são avaliadas tomando por base critérios, muitas vezes conflitantes, difíceis de serem medidos e que serão avaliados de acordo com as preferências do tomador da decisão. Assim, pode-se definir três termos-chave que determinam os elementos básicos de qualquer problema de decisão multicriterial: tomador de decisões, critérios e alternativas.

O tomador de decisão representa um indivíduo, um grupo de indivíduos ou uma organização. O grau de consenso pode ser considerado determinante no processo de tomada de decisão, esse consenso repousa na coerência de objetivos, preferências e crenças do grupo, ainda que o grupo seja formado por diversos indivíduos, o mais importante é a existência de um consenso no processo decisório (MALCZEWSKI, RINNER, 2015).

Os critérios utilizados no SAD devem possuir algumas propriedades que representem adequadamente a natureza multicriterial do problema de decisão, cada critério utilizado deve ser compreensível e mensurável em uma escala ou espectro de opções definidos. O conjunto de critérios, segundo Malczewski e Rinner (2015) deve ser:

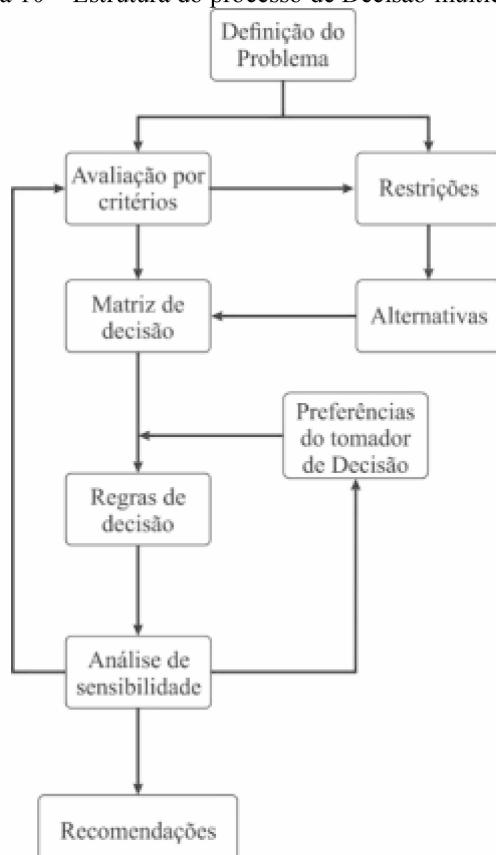
- a) Completo, ou seja, deve cobrir todos os aspectos do problema decisório;
- b) Operacional, representar de forma significativa o problema estudado;
- c) Desmembrável, ou seja, podem ser divididos em partes para simplificar o processo;
- d) Não redundantes, evitando contagens duplicadas e
- e) Mínimo, menor quantidade possível de critérios para representar o problema.

As alternativas demonstram as possibilidades de gestão apontadas pelos especialistas, um conjunto de variáveis mensuráveis que representam o problema avaliado. Não existe uma única solução para o problema, dessa forma, em SAD tem-se várias possíveis respostas. Estas são mostradas na forma de alternativas que podem ser apresentadas de forma individual ou associadas.

O procedimento de resolução de problemas espaciais em análises multicriteriais envolvem três conceitos principais: valor de escala (ou de normalização), ponderação do critério, e combinação de regras (decisão). Estes são conceitos fundamentais para os SAD, e podem ser considerados como elementos básicos nos procedimentos de suporte às decisões espaciais (MALCZEWSKI, RINNER; 2015).

O tomador de decisão fará a escolha das alternativas e dos critérios utilizados na resolução da análise multicriterial, estes serão corretamente representadas segundo uma escala; a partir disso serão aplicadas as ponderações dos critérios, estes ainda podem ser combinados segundo regras de decisão. A Figura 10 exibe a sequência do processo de análise multicriterial abordado pelo Sistema de Apoio à Decisão. O problema é definido e a partir dele o tomador de decisão propõe os critérios e restrições que limitam e classificam o problema. As soluções possíveis são evidenciadas pelas alternativas, e representadas pela matriz de decisão. As preferências do tomador de decisão definem as regras a serem aplicadas na matriz, pois nem todas as regras podem ser adequadas em determinados contextos de decisão. O último passo é a avaliação dos resultados. Para todo problema definido espera-se algo, uma vez que todo o processo é gerenciado por um especialista, o qual traz algumas expectativas de resultado. Fica a cargo do tomador de decisão a análise do resultado obtido no processo e este processo pode ser retomado para fins de refinar o resultado e ou análise. Por fim as recomendações para a solução do problema são elaboradas.

Figura 10 – Estrutura do processo de Decisão multicriterial



Fonte: Malczewski, Jacek; GIS and Multicriteria Decision Analysis, 1999
(adaptado pela autora)

A etapa de criação dos cenários deve envolver o conhecimento do problema proposto, dados disponíveis e/ou possíveis de serem obtidos e o processo decisório envolvido na resolução do problema. Num cenário que envolva a identificação de melhores locais para área de recarga, por exemplo, é necessário identificar características como a profundidade do aquífero, tipo do solo, permeabilidade, declividade, uso e ocupação do solo.

Buscando um elo entre o proposto pela teoria de SAD e o presente estudo pode-se estabelecer que o problema ora avaliado é a determinação de áreas de potencial risco de poluição do Aquífero Bauru sotoposto à malha urbana de Araguari, tendo então a definição do problema. Este problema será avaliado segundo critérios e restrições, em que os critérios são os parâmetros utilizados na resolução do problema. No caso dessa pesquisa serão elaborados os mapas de vulnerabilidade utilizando dois métodos, DRASTIC e GOD, estes serão sobrepostos ao uso e ocupação do solo, as restrições são os meios utilizados para classificar cada parâmetro, um exemplo é a declividade do solo, utilizado no método DRASTIC, que será dividida em cinco classes, cada uma com diferentes valores atribuídos que representam o grau de importância da classe quanto à vulnerabilidade. A matriz de decisão é a representação de todos os pesos (restrições) atribuídos para cada parâmetro (critério), o resultado final é a representação global dos itens considerados na resolução do problema.

As alternativas foram os cenários criados, no estudo foram avaliadas duas situações, a do uso e ocupação do solo atual e futura (prevista pelo mapa do PDU). Para cada uma dessas situações, foram apresentados resultados para o problema. A matriz de decisão foi representada pela forma em que cada parâmetro é ponderado, e, no caso dos métodos utilizados, a definição dos parâmetros, os pesos e as ponderações já se encontram definidas na literatura. A aplicação dos métodos aliados às simulações do uso e ocupação do solo geraram o resultado dos pontos críticos do aquífero. A análise de sensibilidade foi realizada para verificar as áreas mais vulneráveis em comparação com o uso do solo delimitando assim áreas de risco potencial do aquífero. Por fim foram definidas as recomendações de restrição de uso, de monitoramento e/ou áreas que necessitam de estudo detalhado, resultados estes do SAD da aplicação do problema.

Pesquisas como Batista (2005), Giboshi, Rodrigues e Neto (2006), Rufino (2009) e Adiat, Nawawi e Abdullah (2012), apresentam propostas de SAD para resolução de problemas ambientais. Batista (2005) utiliza SAD como um instrumento ao planejamento urbano, auxiliando na tomada de decisão para a elaboração de políticas públicas mais eficazes, tanto no aspecto do sistema de saneamento ambiental, como também para o processo de gestão da saúde e na melhoria das condições de vida e do meio ambiente. Giboshi, Rodrigues e Neto (2006) trabalham com o desenvolvimento de um sistema que visa a determinação da capacidade de uso da terra, recomendam usos adequados para cada classe de capacidade de uso como também práticas de conservação e manejo do solo e identificam áreas de conflito comparando os mapas de uso da terra com o mapa de capacidade de uso. Rufino (2009) explorou os recursos de SAD de forma a ampliar a capacidade de suporte à decisão, visando a implementação de diretrizes técnicas para a gestão integrada das águas superficiais e subterrâneas, além de diretrizes urbanísticas para a ocupação da área escolhida. Adiat, Nawawi e Abdullah (2012) ofereceram solução na previsão espacial de zonas potenciais de armazenamento de recursos hídricos subterrâneos visando a sustentabilidade, utilizando cinco critérios ponderados visando essa predição.

Por se tratar de fenômenos com distribuição espacial ampla, faz-se necessário o uso de ferramentas computacionais especializadas e capazes de gerir grandes quantidades de informação especializada, informações distribuídas em mapas e tabelas. Os Sistemas de Informação Geográficas (SIG) se apresentam como modeladores das alternativas através das informações espaciais disponíveis. Nestes sistemas, os cenários de solução são representados em bancos de dados georreferenciados e, através de algoritmos de processamento como operadores de mapas, estas informações são usadas para se avaliar a eficiência de cada alternativa e da combinação delas.

A utilização da ferramenta SIG pressupõe a sistematização do problema através de um modelo, visando a melhor alternativa para a resolução através critérios que usam dados previamente inseridos no programa.

Esta pesquisa, adotou a estratégia da criação e avaliação de cenários em SAD, fazendo uso da ferramenta SIG para avaliar e propor o zoneamento de risco à poluição da cidade de Araguari, MG, visando a manutenção da qualidade da água.

2.2.1. SISTEMAS DE INFORMAÇÃO GEOGRÁFICA – SIG

As ferramentas que apoiam a elaboração do SAD são os Sistemas de Informação Geográfica (SIG), as quais auxiliam no processo de sistematização do conhecimento, tornando simples a tarefa de organizar e armazenar dados, acessar e recuperar essas informações, manusear e sintetizar soluções, além de aplicar o conhecimento na resolução de problemas (LONGLEY, et al; 2013). Segundo Schmidt (2013), Sistemas de Informação Geográfica, podem ser definidos como a interação entre usuário, computador, programa e dados geográficos.

Os mapas representam a simplificação de mundo para uma determinada situação, e a partir deles é possível planejar cidades, encontrar lugares, determinar rotas, entre outros. A possibilidade de interpretação das informações contidas nos mapas é enorme e o SIG alia o recurso do mapa com dados físicos ligados ao espaço, além da capacidade de manusear e extrair informações complexas de forma simples. Estes sistemas permitem a representação de diversas características físicas, sociais e ambientais em mapas que serão analisados pelos especialistas nas tomadas de decisão. Segundo Rufino (2004), os Sistemas de Informação Geográfica (SIG), permitem recursos de gerenciamento e visualização das informações, de análises e inferências espaciais.

Os componentes de um SIG se relacionam de forma hierárquica. No nível mais próximo ao usuário, a interface homem-máquina define como o sistema é operado e controlado. No nível intermediário, um SIG deve ter mecanismos de processamento de dados espaciais (entrada, edição, análise, visualização e saída). No nível mais interno, um sistema de gerência de bancos de dados geográficos oferece armazenamento e recuperação dos dados espaciais e seus atributos (BATISTA; 2005).

Os SIG permitem a simplificação dos fenômenos que ocorrem na superfície terrestre, normalmente complexos. Segundo Longley et al (2013) estes devem ser limitados já que

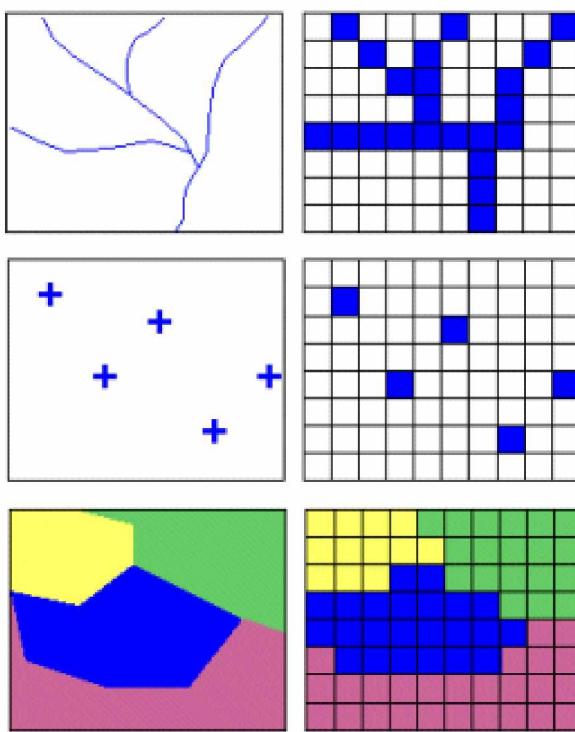
os recursos computacionais são finitos. A quantidade de detalhes capturados deve ser reduzido e para isso deve-se ignorar ou simplificar informações. Esse grau de simplificação deve ser tal que reflita com fidelidade a ocorrência do fenômeno e garanta a possibilidade de aquisição de dados, ou seja, deve-se obter dados suficientes que visem a representação do problema, mas que sejam exequíveis. Qualquer dado geográfico vincula lugar, tempo e atributo; lugar está relacionado com a posição do elemento a ser representado; tempo estabelece quando este fenômeno ocorreu; e atributo estabelece a forma de armazenar esse fenômeno ou a escala de mensuração do dado.

A representação da realidade está associada à forma de armazenamento dos dados, que pode ocorrer de duas formas: dados matriciais ou dados vetoriais. Na representação por elementos matriciais, o espaço é dividido em uma malha regular (geralmente quadrada) onde o dado geográfico é expresso através de atributos (nominais, ordinais, de intervalo, razão ou cíclico) aplicados às células chamadas de pixels. Na informação representada de forma matricial, toda a variação existente no interior da célula é perdida e no lugar dessa variação é apresentado um único valor (LONGLEY et al, 2013).

As estruturas vetoriais se baseiam em um espaço contínuo e se comportam segundo postulados da geometria euclidiana, os elementos podem ser representados por pontos, linhas ou polígonos. Algumas relações são estabelecidas com esses elementos, como por exemplo noções de distâncias, áreas e volumes que podem ser estabelecidos tendo por base a estrutura vetorial dos dados geográficos (ROSA, BRITO, 1996; SCHMIDT, 2013).

A Figura 11 apresenta a diferença dessas duas estruturas de armazenamento das informações espaciais, a estrutura de dados vetoriais e matriciais. Na figura, as representações à esquerda evidenciam a estrutura vetorial onde temos a representação de linhas, pontos e polígonos; já representações à direita destacam a estrutura matricial de linhas, pontos e polígonos. Pode-se armazenar o mesmo dado nas duas estruturas, por exemplo, um rio pode ser representado pela estrutura vetorial ou matricial.

Figura 11 - Elementos apresentados na forma Vetorial e Matricial



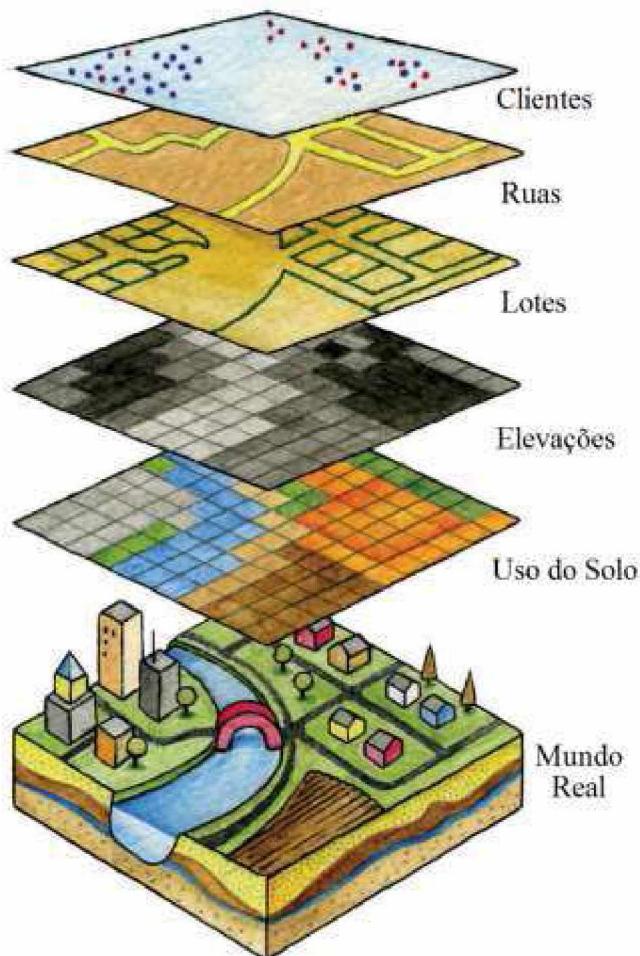
Fonte: Gis Primer, <http://gis.nic.in/gisprimer/images/vector.gif>, acesso em 31 de agosto de 2015

Os atributos podem ser nominais, ordinais, de intervalo, razão ou cílicos e cada elemento a ser representado será melhor simplificado através de um ou vários atributos. Os nominais são números, letras ou cores, por exemplo, endereço, nome ou CPF; os ordinais são classes bem definidas, por exemplo, a classificação de solos (classe 1, classe 2 ou classe 3); atributos de intervalos referem-se a níveis de mensuração com características de uma escala ordinal em que os intervalos são conhecidos, por exemplo, variação de temperatura (0 a 10°C, 11 a 20°C, 21 a 30°C); os atribuídos de razão são relações entre parâmetros, por exemplo, densidade de pessoas por metro quadrado (5 pessoas/m², 10 pessoas/m²); os cílicos se apresentam quando se faz necessário lidar com dados cujas categorias são diferentes das demais, tais como problemas direcionais ou cílicos quando por exemplo precisa-se evidenciar a direção de fluxo em um mapa e representações vinculadas ao mês do ano (ROSA, BRITO, 1996; LONGLEY et al 2013).

A manipulação de dados em SIG é feita considerando porções do espaço físico representados por uma série de mapas sobrepostos, referenciados em uma projeção comum (Figura 12). Cada camada apresenta uma informação e essas podem ser combinadas, comparadas e analisadas individualmente ou em conjunto. Cada camada

possui a parte visual apresentada no mapa aliada aos atributos e estes são vinculados a um Banco de Dados Geográficos (SCHMIDT, 2013).

Figura 12 - Camadas contendo informações de representação da superfície

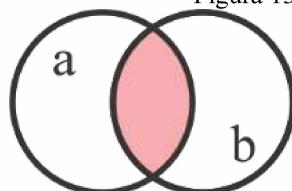
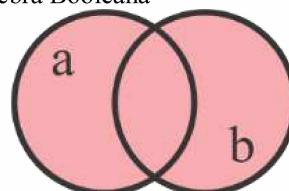
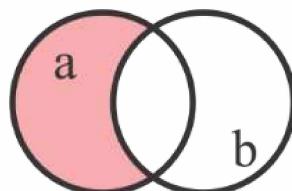
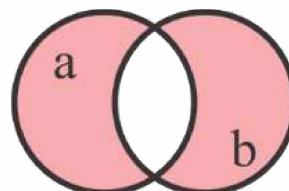
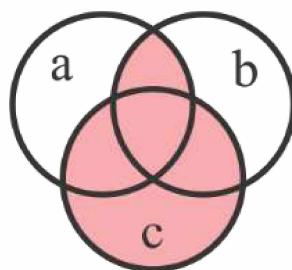
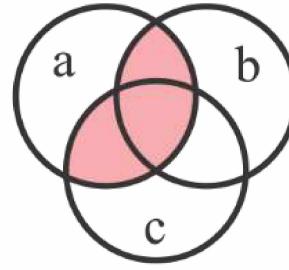


Fonte: Stanford University Libraries; https://lib.stanford.edu/files/u2966/GIS_layers.jpg, acesso em 31 de agosto de 2015
(adaptado pela autora)

Algumas operações podem ser realizadas com os elementos do SIG de modo que as camadas podem ser combinadas segundo a Álgebra Booleana que utiliza operadores lógicos de interseção (E), união (OU) e negação (NÃO). A Figura 13 demonstra esses operadores e o resultado obtido se encontra sombreado. Esses operadores podem ser utilizados individualmente ou combinados e normalmente se utiliza parênteses para indicar a ordem das operações, quando mais de uma operação é necessária (ROSA, BRITO; 1996).

Os dados contidos nos mapas são apresentados segundo um conjunto de variáveis mensuráveis que representam o problema avaliado. Malczewski e Rinner (2015) definem essas variáveis em três categorias distintas: binário, discreto e contínuo. A variável binária assume duas possibilidades, sim ou não; a discreta pode assumir valores dentro de um conjunto pré-determinado (classe 1, classe 2 ou classe3) e a contínua assume qualquer valor dentro de uma faixa de limites conhecidos (0 a 10, 11 a 20, 21 a 30).

Figura 13 - Aplicação da Álgebra Booleana

 $a \text{ E } b$  $a \text{ OU } b$  $a \text{ NÃO } b$  $(a \text{ NÃO } b) \text{ OU } (b \text{ NÃO } a)$  $(a \text{ E } b) \text{ OU } c$  $a \text{ E } (b \text{ OU } c)$

Fonte: Department of Geography; <http://www.geo.hunter.cuny.edu/aierulli/gis2/lectures/lecture5/boo.gif>, acesso em 31 de agosto de 2015 (adaptado pela autora)

Segundo Rufino (2009) em Sistemas de Informação Geográfica, toda a informação é gerada a partir da modelagem conceitual dos dados e um processo de modelagem bem sucedido pode ser de grande importância na tomada de decisão, pois ajuda a extrair a

informação relevante a partir de um grande e complexo volume de dados. As operações existentes em SIG servem no auxílio de resolução do problema, são as ferramentas a serem aplicadas no processo de tomada de decisão, todos os dados inseridos devem estar diretamente relacionados ao problema. Quando um processo decisório ocorre, normalmente ele passa por etapas nem sempre bem definidas e constantes, no entanto, para a simulação utilizando SIG se faz necessário que o processo decisório seja formalizado em etapas.

As principais operações existentes em SIG de análise dos dados geográficos, segundo Rosa e Brito (1996), são: reclassificação, sobreposição, ponderação, medidas, tabulação cruzada, análise de vizinhança, análise de rede e consulta a banco de dados geográficos.

A reclassificação é realizada quando a forma de classificação apresentada não é adequada ao tipo de análise do problema a ser realizado, por exemplo, as categorias dos tipos de rochas de mapas geológicos podem estar muito detalhadas e algumas dessas categorias precisam ser reagrupadas em menor número para se adequar ao uso (ROSA, BRITO; 1996).

A sobreposição de mapas acontece quando a informação que se deseja extrair está contida em dois ou mais mapas, nessa situação a aplicação dos operadores lógicos existentes na Álgebra Booleana é aplicado na obtenção da informação. Por exemplo, deseja-se saber onde um tipo de uso ocorre num tipo particular de solo, precisa-se da informação contida no mapa de uso do solo e no mapa de tipo de solo e quando as duas ocorrências forem verdadeiras, a solução do problema é apresentada, essa operação fica evidenciada pelo primeiro exemplo da Figura 13, união de A e B (ROSA, BRITO; 1996).

Os operadores de ponderação consistem em gerar um mapa a partir da média ponderada dos planos de informação contidos na base de dados. Um exemplo da ponderação é a geração de mapas de vulnerabilidade, por exemplo o método GOD, a partir de vários planos de informação. nesse exemplo são utilizados mapas do tipo do aquífero estudado (confinado, semiconfinado, livre etc.), caracterização do aquífero quanto ao seu grau de consolidação e natureza litológica e profundidade até o nível freático do aquífero. Cada mapa é avaliado segundo pesos de avaliação, os valores variam de 0 a 1 para o primeiro

parâmetro e 0,4 a 1 para os outros dois, sendo 1 o índice que indica maior vulnerabilidade e 0/0,4 o que indica menor. No caso do método GOD todos os parâmetros possuem pesos iguais, isto é, tem mesma importância na determinação da vulnerabilidade. No caso do método DRASTIC ainda se tem um peso a ser atribuído para cada parâmetro avaliado.

Também chamada de álgebra de mapas, a operação de ponderação é aplicada em mapas no formato matricial. Depois de realizado o produto dos pesos, os mapas são sobrepostos e cada célula dessa matriz possui agora um valor que foi obtido pela multiplicação do valor da célula do mapa. No caso do método DRASTIC, cada parâmetro é ponderado. O resultado dessa ponderação será o mapa final que deverá apresentar áreas vulneráveis segundo categorias definidas: baixo, médio, alto e muito alto que são as respostas para cada célula desse processo de ponderação realizado pelo método DRASTIC (ROSA, BRITO; 1996; SCHMIDT; 2013).

Outro operador usado em SIG é o de medidas, existem várias possibilidades de uso desse operador, as principais são: distâncias, perímetros, áreas e volumes. O processo de tabulação cruzada, operador que permite calcular área das intersecções entre dois mapas, por exemplo a obtenção de áreas a partir do uso do solo considerando a declividade como fator de soma, geralmente requerem os dados no formato matricial para esse procedimento. Os dois planos de informação devem apresentar a mesma resolução espacial, isto é, o número de “pixels” deve ser o mesmo além do mesmo tipo de projeção e coordenadas (ROSA, BRITO; 1996).

Tem-se em SIG os operadores de vizinhança que servem para selecionar uma área localizada a certa distância de uma feição de interesse. O usuário especifica o critério de distância a partir de um objeto contido no mapa, o resultado desse operador é uma nova camada com a informação requerida. Um exemplo é a obtenção de áreas de proteção de poços que podem ser obtidas a partir da camada que contém a localização desses elementos e uma distância deve ser considerada a partir do ponto considerado (ROSA, BRITO; 1996).

Já o estudo de análise de redes possui aplicação na obtenção de menor caminho, funções de fluxo e hidrologia. Um exemplo é a determinação do sentido de fluxo considerando o

escoamento superficial. Outro operador utilizado em SIG são Análises Estatísticas que são utilizadas visando assegurar a precisão dos dados durante o processamento, tendo-se como funções de avaliação estatística: estatística descritiva (média, mediana, covariância etc), histogramas, valores extremos (máximo e mínimo) e correlação (regressão linear) (ROSA, BRITO; 1996).

Pode-se realizar a banco de dados georreferenciados, esta consiste na obtenção de informações que estão referenciadas espacialmente através de um sistema de coordenadas. Um exemplo é a obtenção de distâncias entre poços perfurados que estão com a localização armazenada no banco de dados (ROSA, BRITO; 1996).

CAPÍTULO 3

METODOLOGIA

“Nenhuma decisão sensata pode ser tomada sem que se leve em conta o mundo não apenas como ele é, mas como ele virá a ser.”
Isaac Asimov

3.1. ÁREA DE ESTUDO

Conforme censo realizado em 2010, pelo IBGE, Araguari possuía 109.801 habitantes, em uma área de 2.729 km², segundo o mesmo órgão, a população estimada para 2015 é de 116.267 habitantes, sendo 91,61% da população residente na sede municipal. Segundo a Superintendência de Água e Esgoto de Araguari – SAE, o abastecimento de água da cidade é realizado pela captação nos aquíferos, através de poços profundos que possuem em média 70 metros.

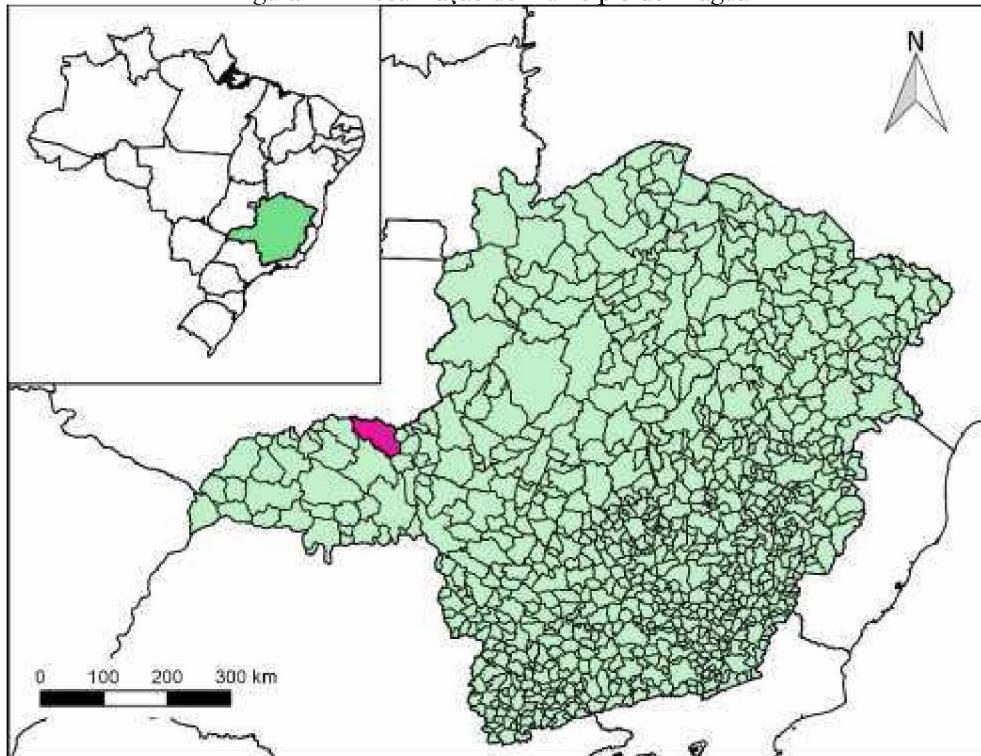
O município de Araguari está sobreposto ao Aquífero Bauru, aquífero livre de natureza pouco profunda, apresentando extensão lateral limitada pelos vales mais encaixados dos rios Araguari e Paranaíba (OLIVEIRA, CAMPOS; 2004). Aproximadamente 140 poços estão operando individualmente ou em conjunto (chamado baterias) com vazão média de 20 m³/h. Segundo a SAE, órgão municipal responsável pela administração, planejamento e gerenciamento desses poços, o tratamento da água é simplificado e feito através de bombas dosadoras (desinfecção por cloro).

Segundo Segantini (2010) a SAE enfrenta dois problemas relacionados à qualidade da água: presença de areia e pH da água bruta. A presença de areia é função do incorreto dimensionamento do pré-filtro dos poços, o que compromete a durabilidade e eficiência das bombas submersas. Para minimizar o efeito da areia, os poços localizados em baterias e alguns poços isolados bombeiam água para uma caixa de areia, mas como a manutenção dessas é mínima ou inexistente, elas acabam se tornando ineficientes fazendo com que os reservatórios de distribuição atuem como tanques de sedimentação dessa areia e sofram

com o assoreamento. A correção do pH da água, em torno de 5,0, não é realizada em Araguari e os valores indicados pelo Ministério da Saúde são entre 6,0 e 9,5.

Araguari é a quarta maior cidade do Triângulo Mineiro (Figura 14), ficando atrás das cidades de Uberlândia, Uberaba e Patos de Minas. Possui 90% das lavouras irrigadas, produzindo café, tomate, soja, milho, entre outras culturas. Esse recorte espacial demonstra a importância do aquífero para o município, que depende da água presente no subsolo em grande parte das atividades desenvolvidas, tanto no espaço urbanizado, como no ambiente rural. O foco do trabalho visa o estudo no ambiente urbano, buscando ferramentas que visem a manutenção da qualidade do aquífero ao longo do tempo.

Figura 14 - Localização do município de Araguari



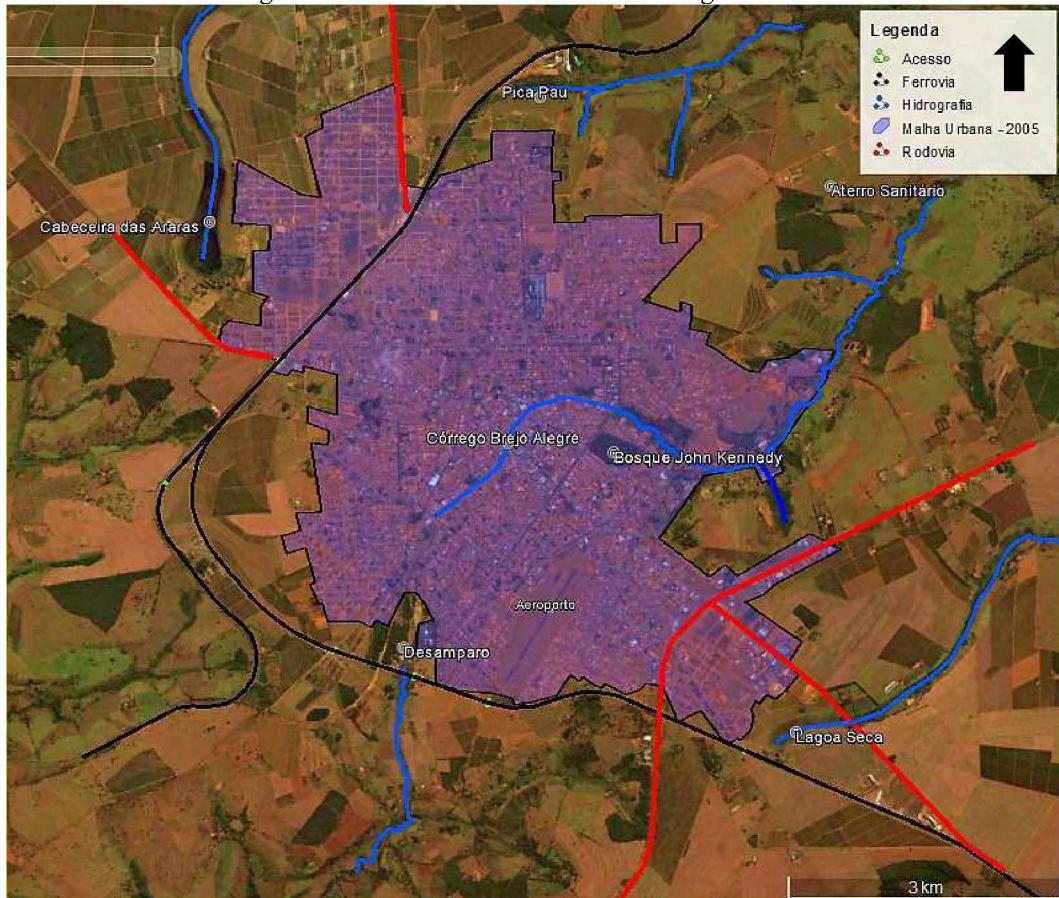
Fonte: Autora (2016)

A expansão da malha urbana do município de Araguari foi de aproximadamente 33%, em termos de área urbanizada, nos últimos cinco anos. Tal afirmação fica evidenciada na Figura 15, Figura 16 e Figura 17. A Figura 15 apresenta a malha urbana do município de Araguari em sobreposição a uma imagem de satélite do ano 2005, alguns elementos importantes para o estudo foram destacados, a hidrografia aparece em azul com a identificação de cada região / córrego, a linha férrea aparece em preto, as rodovias estão

em vermelho e a malha urbana aparece com limite em preto. Foi identificado ainda o posicionamento do Bosque John Kennedy e do aeroporto que possuem papéis importantes, respectivamente de área verde e área não ocupada na malha urbana. A Figura 16 apresenta uma sobreposição do município com uma imagem do ano 2010 e a Figura 17 com uma imagem de 2015.

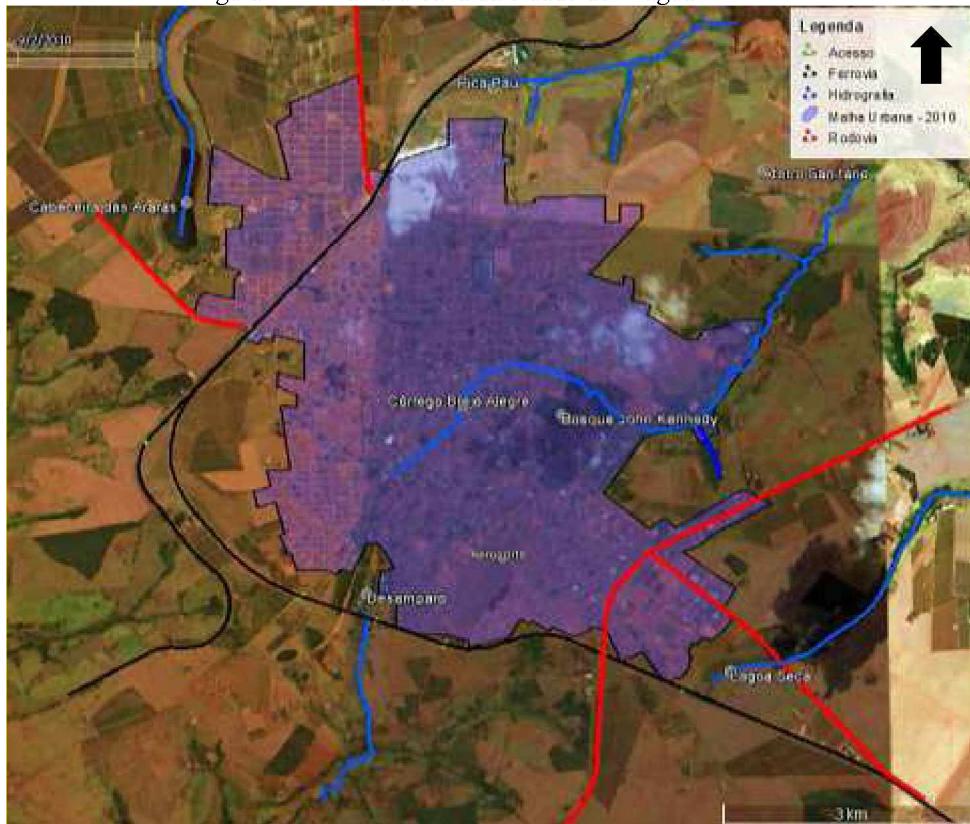
Comparando a Figura 15 com a Figura 16 não houve expansão da malha urbana, existindo nesse período uma densificação nos loteamentos existentes. Na comparação da Figura 15 com a Figura 17 pode-se verificar uma expansão de cerca de 33% da área. Com intuito de apresentar esse crescimento da região urbana, a Figura 18 apresenta a sobreposição das malhas urbanas de 2005 e 2015. Fica evidente, na Figura 18, o crescimento do município nos sentidos nordeste, leste, sudeste e sudoeste. No sentido sudeste esse crescimento se refere ao setor industrial, os demais são preferencialmente residenciais.

Figura 15 – Malha urbana da cidade de Araguari – 2005



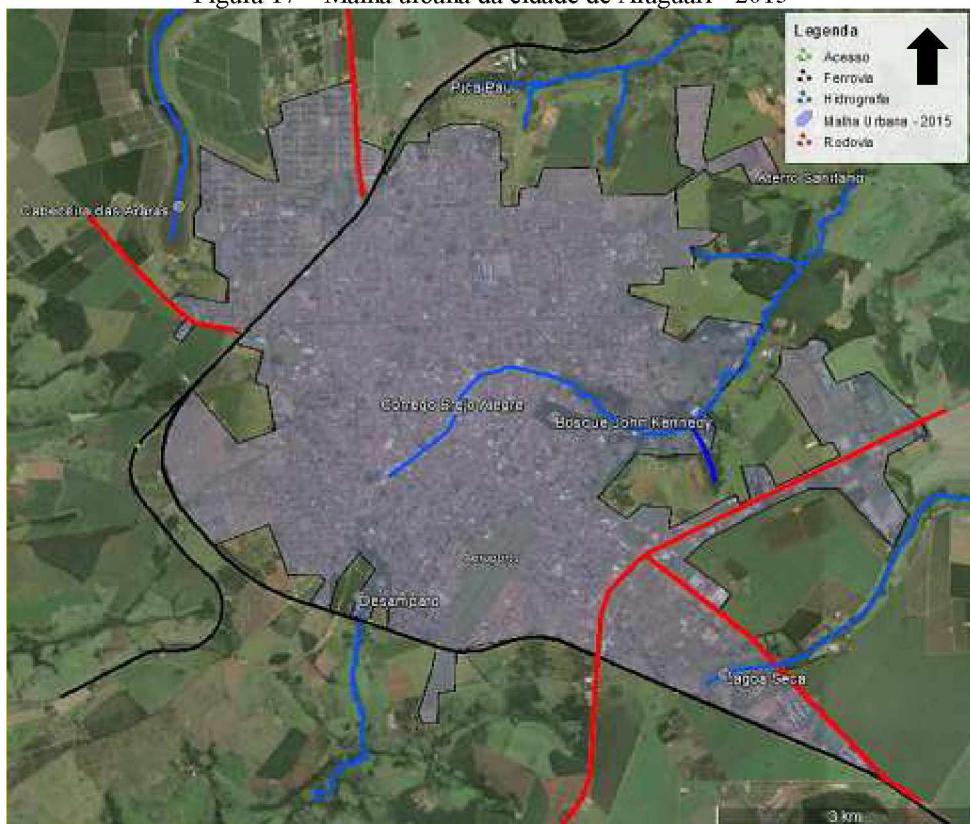
Fonte: Google Earth – imagens históricas (elaborado pela autora) (2015)

Figura 16 – Malha urbana da cidade de Araguari - 2010



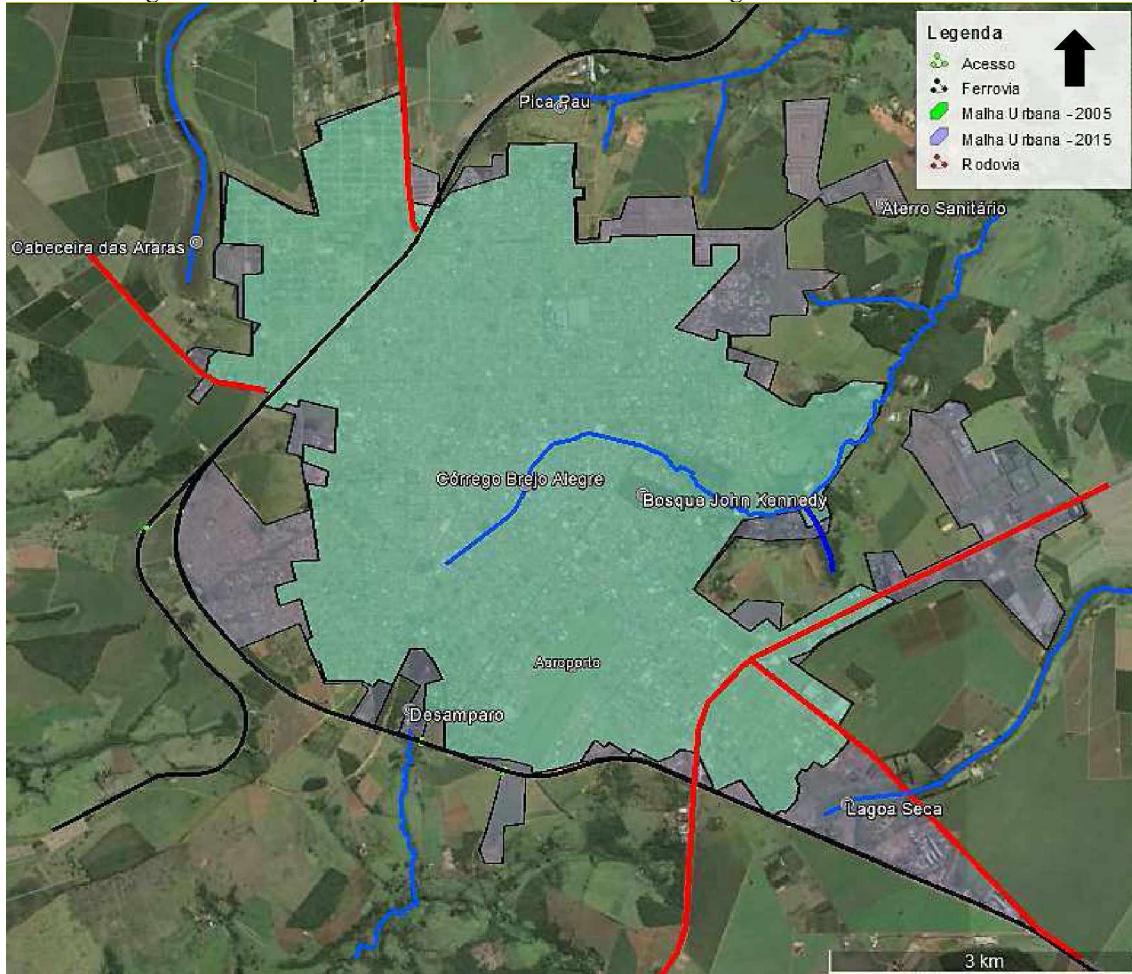
Fonte: Google Earth – imagens históricas (elaborado pela autora) (2015)

Figura 17 – Malha urbana da cidade de Araguari - 2015



Fonte: Google Earth – imagens históricas (elaborado pela autora) (2015)

Figura 18 - Sobreposição malha urbana da cidade de Araguari dos anos 2005 e 2015



Fonte: Google Earth – imagens históricas (elaborado pela autora) (2015)

Considerando a existência de linhas férreas que contornam a cidade no entorno da parte sul e oeste, e avaliando os bairros que ultrapassaram o limite da linha férrea, ainda que loteamentos antigos (bairro São Judas Tadeu, bairro São Sebastião e bairro Vieno), estes não tiveram grande densificação e nem expansão. O vetor de crescimento residencial da cidade se comportou mais fortemente no sentido nordeste.

O crescimento da malha urbana nos últimos cinco anos se deu, em grande parte, pelos programas habitacionais do governo federal, como o Minha Casa Minha Vida, que proporcionou a implantação de novos loteamentos, além disso, o crescimento e densificação da área do distrito industrial é evidente na comparação das imagens.

A expansão urbana foi acompanhada por um aumento de consumo de água tanto para processos industriais quanto para consumo humano. Cada novo loteamento aprovado na cidade de Araguari contou com perfuração de novos poços profundos. A diretriz de aprovação da SAE previa o volume de água a ser bombeado em função da quantidade de lotes projetados para cada novo loteamento e a localização para perfuração do novo poço era determinada por funcionário da SAE.

A maior parte dos estudos que envolvem o Aquífero Bauru, na região analisada, não apresenta uma abordagem voltada para o ambiente SIG. A criação do banco de dados permite um estudo contínuo desde que novas informações sejam acrescentadas à medida em que ocorrem mudanças do uso e ocupação do espaço físico.

O presente estudo aborda análises considerando o cenário atual e o cenário futuro de expansão previsto pelo plano diretor urbano. Os cenários propostos no trabalho foram analisados através do SAD, permitindo suporte qualitativo e quantitativo visando ao adequado uso e ocupação do solo, tendo em vista a sustentabilidade do aquífero que abastece o município.

Segundo proposto pela teoria de SAD, o problema avaliado foi a determinação de áreas de potencial risco de poluição do Aquífero Bauru sotoposto à malha urbana de Araguari. Este problema foi avaliado segundo critérios e restrições. Os critérios são os parâmetros utilizados na resolução do problema que no caso do estudo foram os mapas de vulnerabilidade elaborados segundo dois métodos, DRASTIC e GOD, e a vulnerabilidade resultante do DRASTIC sobreposto ao mapa do uso e ocupação do solo. Existem restrições, que correspondem aos meios utilizados para classificar cada parâmetro, como exemplo a declividade do solo, utilizado no DRASTIC, que ficou dividida em cinco classes, cada uma com diferentes valores atribuídos que representam o grau de importância da classe para a vulnerabilidade. A matriz de decisão é a representação de todos os pesos (restrições) atribuídos para cada parâmetro (critério), o resultado final é a representação global dos itens considerados na resolução do problema.

As alternativas foram os cenários criados no estudo em que foram avaliadas duas situações, a do uso e ocupação do solo atual e futura (prevista pelo mapa do PDU) e para

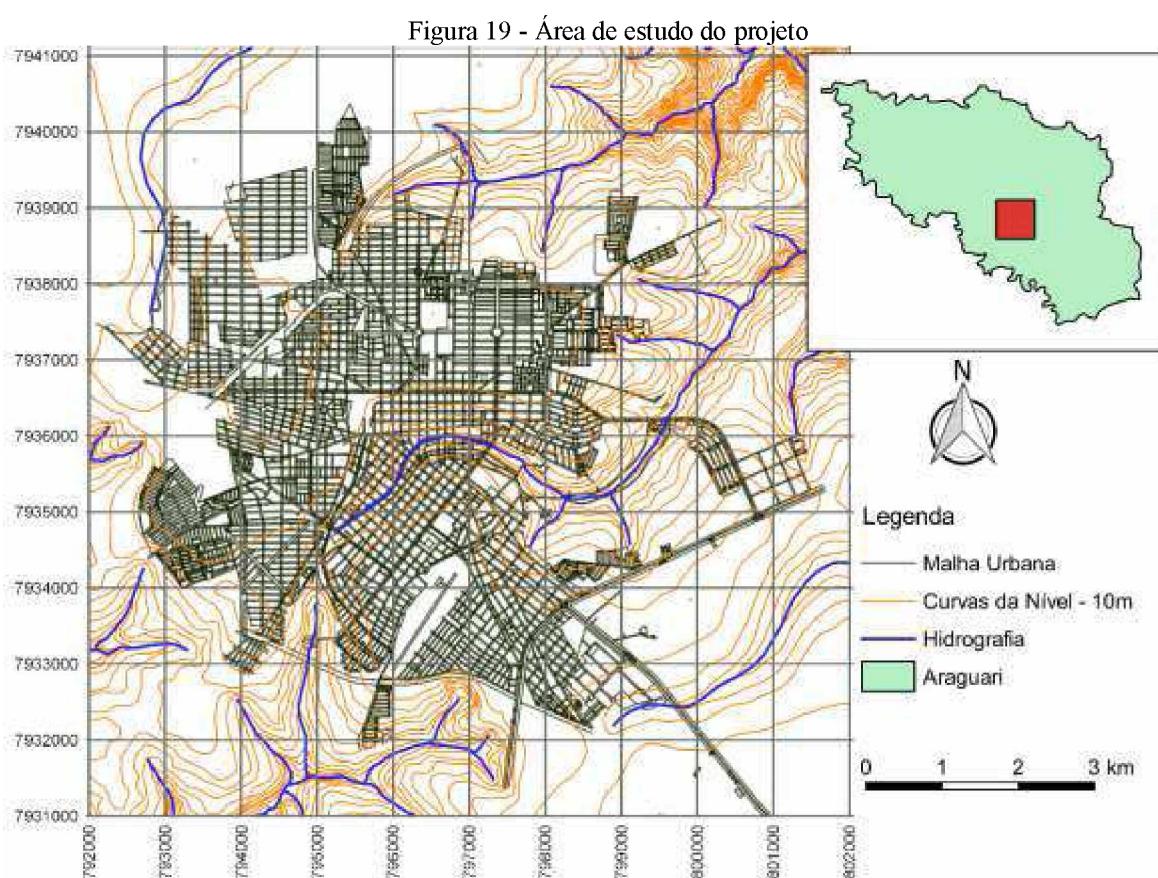
cada uma dessas situações, foram apresentados resultados para o problema. A matriz de decisão é representada pela forma em que cada parâmetro foi ponderado, que, no caso dos métodos de vulnerabilidade empregados, métodos DRASTIC e GOD, a definição dos parâmetros, os pesos e as ponderações se encontram definidas na literatura. A aplicação dos métodos aliados às simulações do uso e ocupação do solo geraram o resultado de áreas críticas do aquífero.

A análise de sensibilidade foi realizada para verificar as áreas mais vulneráveis em comparação com o uso do solo, delimitando, assim áreas de risco potencial do aquífero. Por fim foram definidas as recomendações de restrição de uso, monitoramento e/ou áreas que necessitam de estudo detalhado, compondo o resultado do SAD aplicado ao problema.

3.2. MATERIAIS E MÉTODOS

Foram utilizados, nesta pesquisa, dados previamente estabelecidos por outros estudos, fornecidos pela municipalidade e por profissionais da área. Todos os dados foram tratados e organizados de forma a gerar informações possíveis de serem utilizadas em ambiente SIG. O programa QGIS foi escolhido para tratamento dos dados, por ser um software robusto e de código livre, a partir disso diversos mapas foram elaborados.

Para a elaboração dos mapas foi inicialmente delimitada uma área de estudo, considerando o Datum de referência WGS 84 / Fuso 22S. O limite da área na direção leste foi de 792.000 a 802.000, na direção norte de 7.931.000 a 7.941.100. Nos mapas que envolveram geração de dados matriciais, foi realizada uma malha de 10 x 10 m, permitindo a elaboração de mapa até na escala 1:50.000. Na Figura 19 é apresentado o município de Araguari com a área limite do projeto em destaque, estão apresentadas as curvas de nível com equidistância vertical de 10 m, hidrografia e malha urbana da área em estudo.



Fonte: Autora (2016)

Metodologias já consolidadas na literatura foram utilizadas para a elaboração dos mapas de vulnerabilidade, através dos métodos DRASTIC e GOD. A elaboração do mapa de risco foi realizada a partir do mapa de vulnerabilidade gerado pelo método DRASTIC associado ao uso e ocupação do solo atual e o previsto pelo mapa de expansão do Plano Diretor. Na elaboração do mapa de risco não foi avaliado um poluente específico, mas a possibilidade de poluição de possíveis áreas poluidoras, como proposto por Foster e Hirata (1988).

Os mapas de risco foram separados em dois cenários, sendo o primeiro a apresentação do mapa de risco considerando o uso e ocupação do solo atual. No segundo, o mapa de risco a partir da previsão do mapa de uso e ocupação do solo indicado pelo plano diretor.

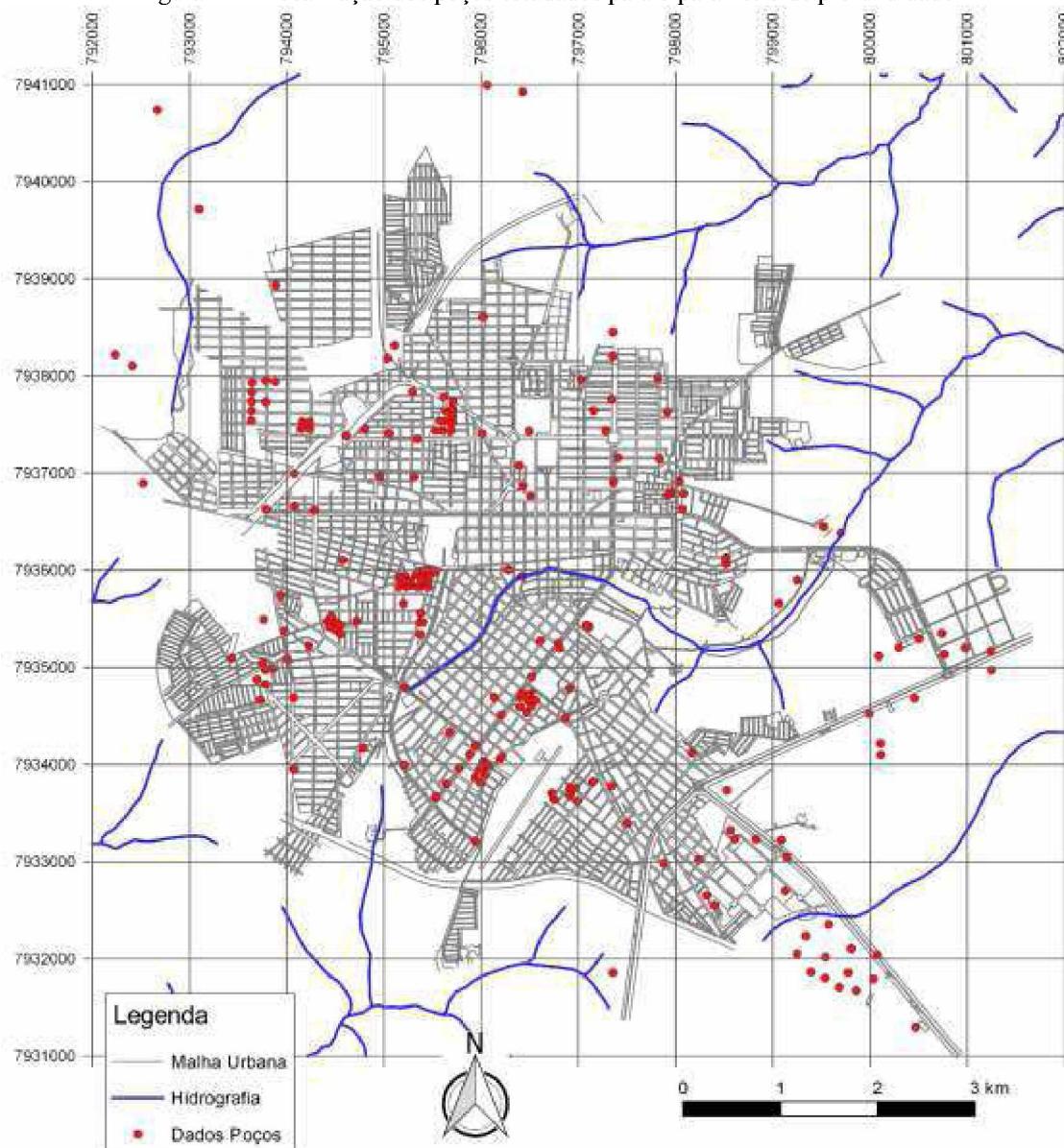
3.2.1. MÉTODO DRASTIC

Na aplicação do método DRASTIC foram elaborados mapas para cada parâmetro de ponderação, conforme previsto pelo modelo (descrito em 2.1.3.1.1). A seguir será descrito como foi realizada a obtenção dos dados e como foram elaborados os mapas para cada parâmetro.

3.2.1.1. PARÂMETRO D – PROFUNDIDADE DO LENÇOL FREÁTICO

O parâmetro profundidade do lençol freático indica a distância, em relação à superfície, que a água se encontra. Na elaboração desse mapa foram, inicialmente, utilizados testes de bombeamento e dados dos poços fornecidos pela SAE. Foram obtidos dados de 764 poços perfurados no município de Araguari. Desse total 414 foram descartados por não possuírem coordenadas que permitissem identificar a localização dos poços. Da quantidade remanescente, apenas 209 se encontravam dentro da área de estudo. A Figura 20 apresenta o posicionamento dos poços e a hidrografia da área de estudo.

Figura 20 – Localização dos poços estudados para o parâmetro de profundidade



Fonte: Autora (2016)

Interessante notar que o processo de crescimento (Figura 18) nos últimos anos em Araguari, foi na direção NE e SW para áreas residenciais e na direção SE para o distrito industrial, os poços estão preferencialmente locados no sentido NW e SE, pois, o relevo se apresenta mais acidentado na direção NE e SW da área de estudo, indicando o limite do aquífero Bauru.

As informações obtidas desses dados iniciais foram organizadas em uma planilha elaborada no programa Excel, são eles: coordenadas geográficas em latitude e longitude, profundidade do nível estático, profundidade do nível dinâmico, profundidade total do

poço, vazão total do teste, data do teste de bombeamento e número do processo de outorga. Nem todos os poços possuíam todas as informações e como não era possível separar, inicialmente, os poços que estavam na área de estudo dos demais, essas informações foram obtidas de todos os 764 poços. Depois de elaborada a tabela, foi possível selecionar aqueles que tinham a informação de localização (coordenadas geográficas) dos demais. Ressalta-se que os dados obtidos têm origem em testes de bombeamento realizado nos últimos 10 anos.

A importação desses dados no QGIS permitiu selecionar os poços que estavam dentro da área de estudo e eliminar os demais. Na elaboração do mapa de profundidade do lençol freático foi utilizada a cota do nível estático, essa escolha ocorreu por esse parâmetro ser mais rigoroso quando comparado com o nível dinâmico que sofre variação no momento do bombeamento. O nível estático está mais próximo da superfície e, portanto, mais acessível ao poluente que precisa percorrer uma distância menor para atingir o nível de água.

Além dos dados dos poços, foi utilizada também a hidrografia dessa área de estudo. Os dados de hidrografia foram obtidos a partir de duas cartas topográficas, Figura 21 e Figura 22, com escala de 1:25.000, em SAD69, numeração SE 22-Z-B-VI-2-NO e SE 22-Z-B-VI-2-SO, nomenclatura usada no mapeamento sistemático brasileiro. Posteriormente esses dados foram transportados para o sistema de referência usado na pesquisa, WGS84 / Fuso 22S. As cartas obtidas estavam digitalizadas, elas foram georreferenciadas no QGIS e com as funções do programa foi obtida a hidrografia de forma manual. Os dados de hidrografia disponíveis nos sites do governo não tinham escala compatível com o projeto, por isso foi feita a digitalização desses dados.

Figura 21 – Carta topográfica SE 22-Z-B-VI-2-NO



Fonte: Acervo particular do Eng. Carlos Ernane Vieira (2015)

Na primeira carta (Figura 21) podemos observar na parte inferior desta uma pequena parte da cidade de Araguari e na segunda (Figura 22) a cidade está na parte superior da carta. A primeira carta é justaposta à segunda pela parte inferior da primeira e superior da segunda.

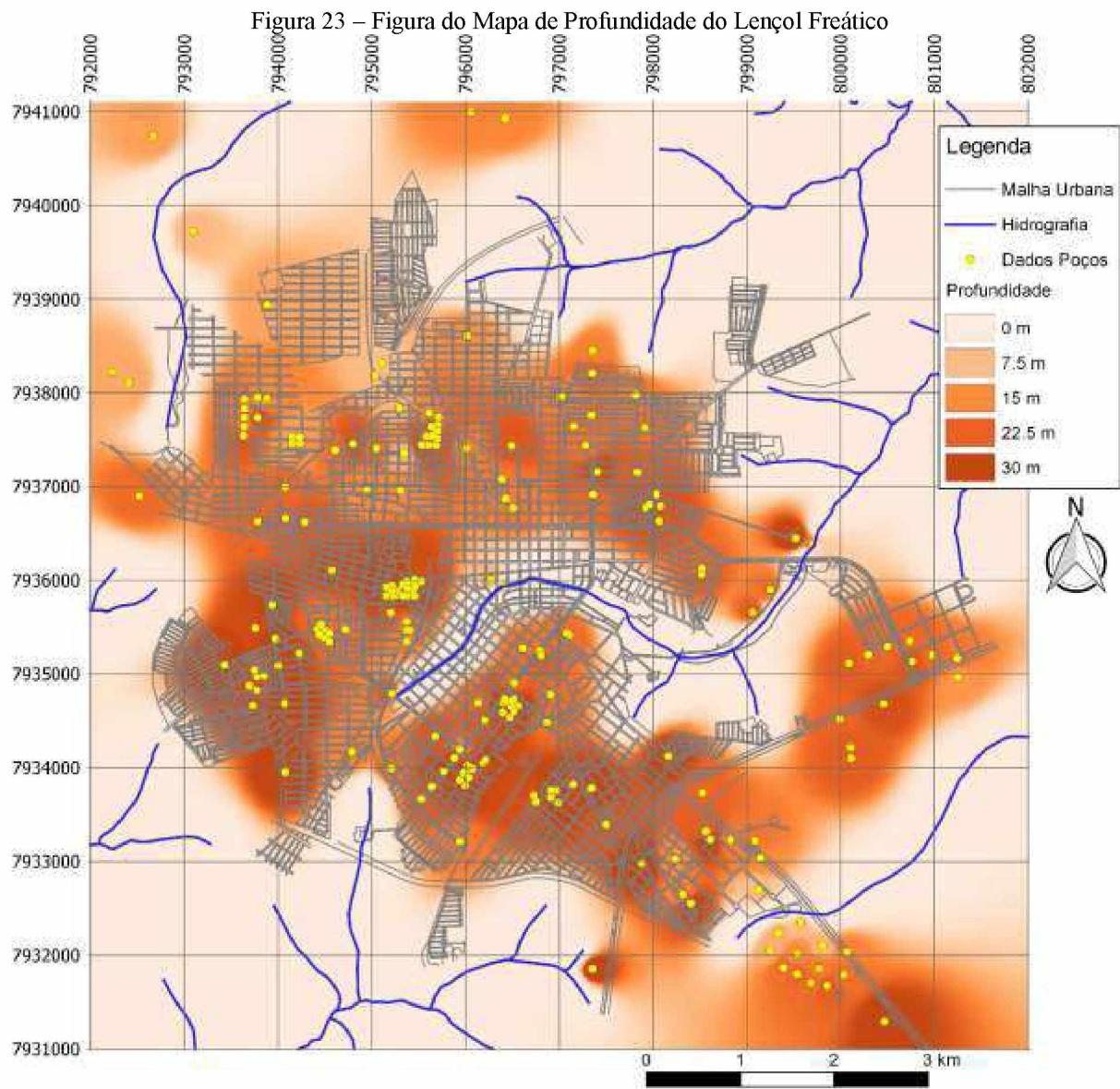
Figura 22 – Carta topográfica SE 22-Z-B-VI-2-SO



Fonte: Acervo particular do Eng. Carlos Ernane Vieira (2015)

A região da lâmina d'água dos córregos foi considerada com profundidade do lençol freático zero, admitindo-se a intercomunicação dos cursos d'água com o aquífero, conforme previsto por Alamy Filho et al. (2013).

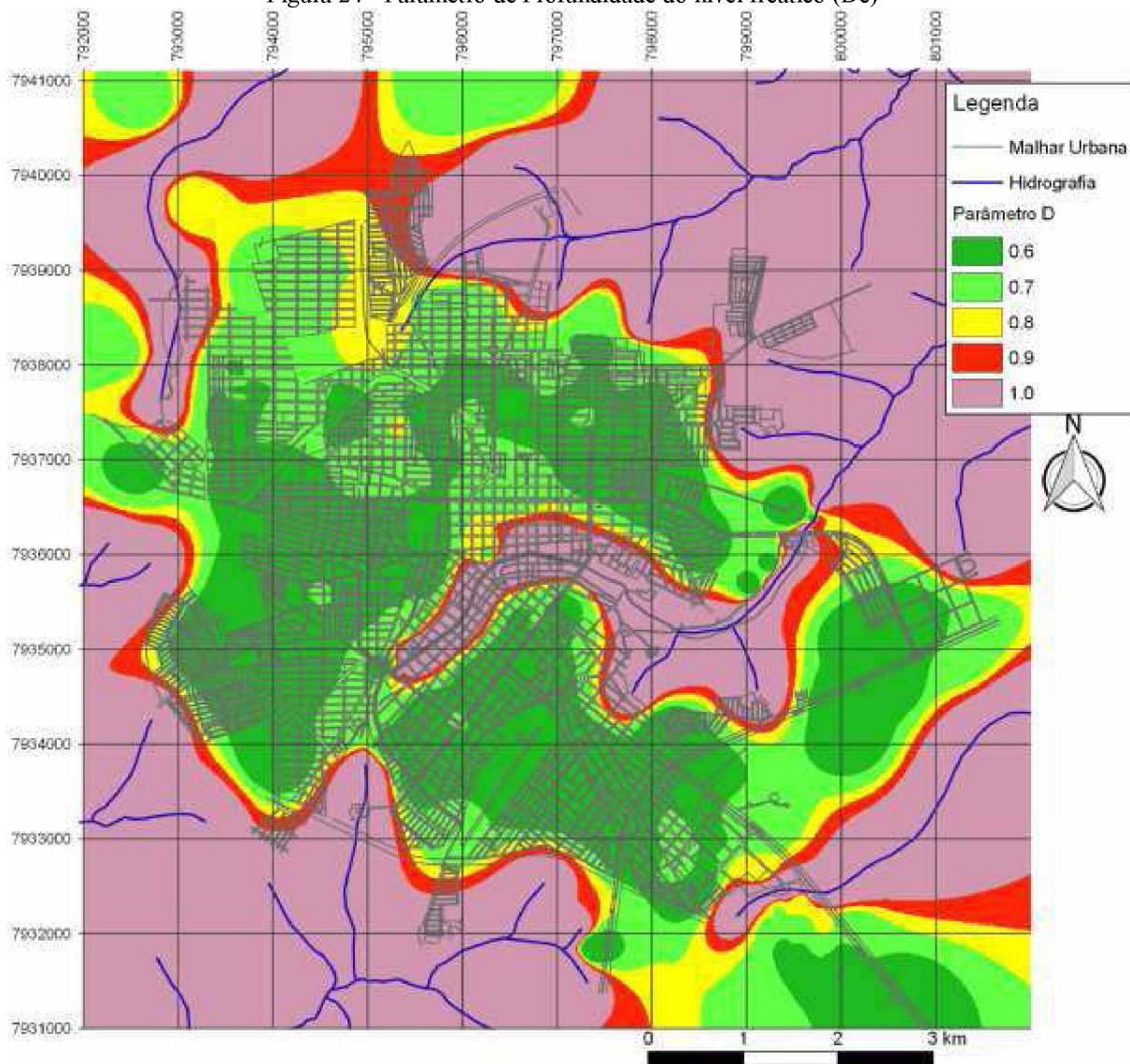
O mapa de profundidade do nível freático é apresentado na Figura 23, onde observa-se uma região a NE e SO onde não existem dados de poços e, consequentemente com profundidade igual a zero. Isso se deu pelo fato de o método de interpolação nessas regiões utilizar apenas os dados da hidrografia que possuem profundidade zero, correspondendo ao entorno da região citada. O mapa foi obtido através do interpolador *inverse to distance weight* (IDW - inverso da distância ponderada) através do complemento fornecido pelo programa GRASS associado ao QGIS.



Fonte: Autora (2016)

Após a elaboração do mapa de profundidade, foi aplicado a ferramenta de reclassificação para que o mapa tivesse os valores de profundidade associados aos valores estabelecidos na Tabela 3, do método DRASTIC. O resultado desse procedimento está apresentado no mapa de profundidade reclassificado, Figura 24.

Figura 24 - Parâmetro de Profundidade do nível freático (Dc)



Fonte: Autora (2016)

3.2.1.2. PARÂMETRO R – RECARGA DO AQUÍFERO

Os dados do parâmetro de recarga foram obtidos do estudo precedente realizado por Bertol (2007), em sua pesquisa a autora elaborou estudos de recarga do aquífero por dois métodos, variação do nível de água e análise da curva de recessão do hidrograma. Os resultados estão apresentados na Tabela 13, além dos resultados obtidos por Bertol (2007) estão apresentados os resultados de trabalhos de outros autores.

O menor percentual de recarga, 20% do total precipitado, foi estimado por Fiumari (2004) usando o método de medida direta do nível de água. A maior recarga, 51% da

precipitação, foi estimada por Velásquez et al. (2006) através do método do traçador de trítio.

Tabela 13 - Resumo dos valores de recarga aquífera

Autor	Método	Área (km ²)	Ano Hidrológico	Recarga (mm)	Recarga % da precipitação	Precipitação (mm)
IGAM (2001)	Separação da componente subterrânea do escoamento total pelo método de Barnes	22.050	2000 2001	367	23	1600
Oliveira (2002)	Medida de variação do nível da água (ne – 15% e Δh – 2,5m)	45,66	1998 2002	380	25	1500
Fiumari (2004)	Medida direta do nível de água (ne – 12% e Δh – 2,5m)	1152	1998 2002	299	20	1500
Velazquez et al. (2006)	Balanço hídrico	8,6 Sub-bacia Amanhece	2003 2004	243	23	1043
			2004 2005	709	48	1482
		28,7 Sub-bacia R. Araras	2003 2004	344	30	1152
			2004 2005	788	50	1542
	Traçador Radioativo (trítio)	1,8.10 ⁻⁵ Amanhece	2004 2005	807	51	1596
			2004 2005	638	44	1442
Bertol (2007)	Variação do nível de água	-	2005 2006	470	29	1636
	Análise da curva de recessão do hidrograma	R. Araras	2003 2004	422	36	1152
			2004 2005	543	35	1542
		C. Amanhece	2003 2004	398	38	1043
			2004 2005	515	34	1482

Fonte: Adaptado de Bertol (2007 – p. 48 e 72)

Nas duas situações, a recarga estimada é superior ao máximo valor estabelecido pelo método DRASTIC, a máxima vulnerabilidade desse parâmetro ocorre com taxa de recarga superior a 254 mm/ano. Como a recarga atingiu o máximo valor estabelecido na Tabela 4, este parâmetro foi considerado constante na aplicação do método DRASTIC para a área de estudo, o valor R_C (Equação 1) usado foi 9.

3.2.1.3. PARÂMETROS A, S E I – LITOTIPO DO AQUÍFERO, TIPO DE SOLO E LITOTIPO DA ZONA VADOSA

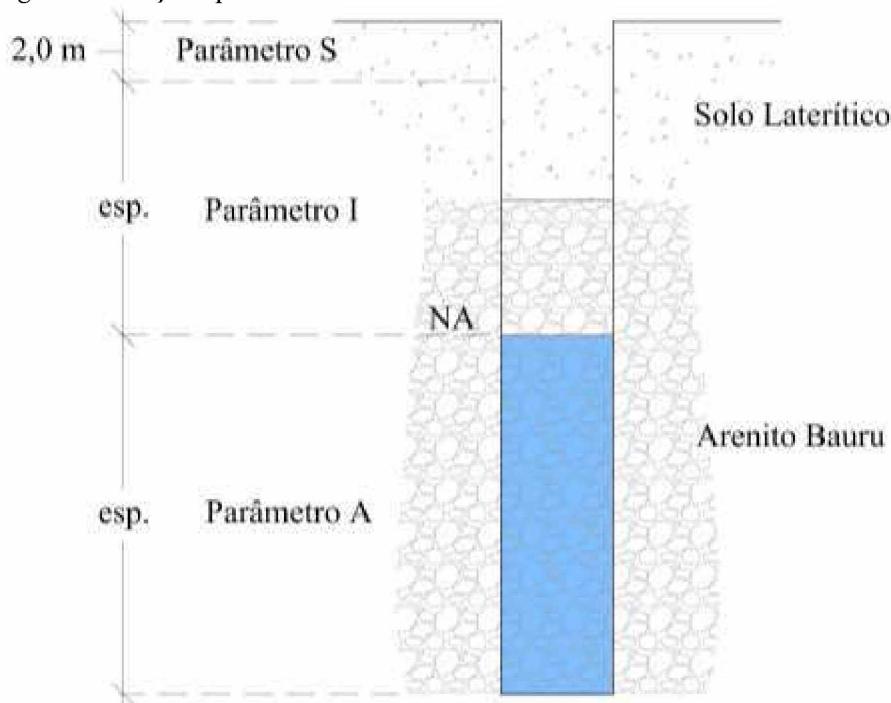
O parâmetro litotipo (Ac) que compõe o aquífero determina o tipo de material (solo ou rocha) que contém a água, possibilitando, assim, a formação do manancial subterrâneo nos poros e fraturas deste. Dependendo do material ele pode propiciar um aumento na vulnerabilidade por facilitar o fluxo de água e, consequentemente, o transporte do poluente para outras regiões do aquífero.

O parâmetro tipo de solo (Sc) representa o solo superficial, que nesse trabalho foi considerado como a camada de 2m em relação à superfície. Ele determina a possibilidade de atenuar ou facilitar a entrada do poluente no solo, dependendo de sua composição e granulometria

O parâmetro litotipo da zona vadosa (Ic) indica o tipo de solo presente entre a camada superficial e a camada do aquífero, essa camada tem a função de atenuar ou facilitar a chegada do poluente na água subterrânea.

A Figura 25 apresenta as três camadas dos parâmetros avaliados e seu posicionamento em relação a um poço esquemático, podemos observar na figura a variação de duas camadas de solo, a parte superficial de solo laterítico e a camada abaixo desta, do arenito Bauru. A divisão dos parâmetros consiste em uma camada superior de 2m de profundidade denominada parâmetro S, outra denominada parâmetro A que determina a existência do aquífero e intermediária a essas duas o parâmetro I que possui parte de sua espessura no solo laterítico e parte em arenito Bauru sem a presença de água.

Figura 25 – Poço esquemático demostrando as camadas de solo considerados no estudo



Fonte: Autora (2016)

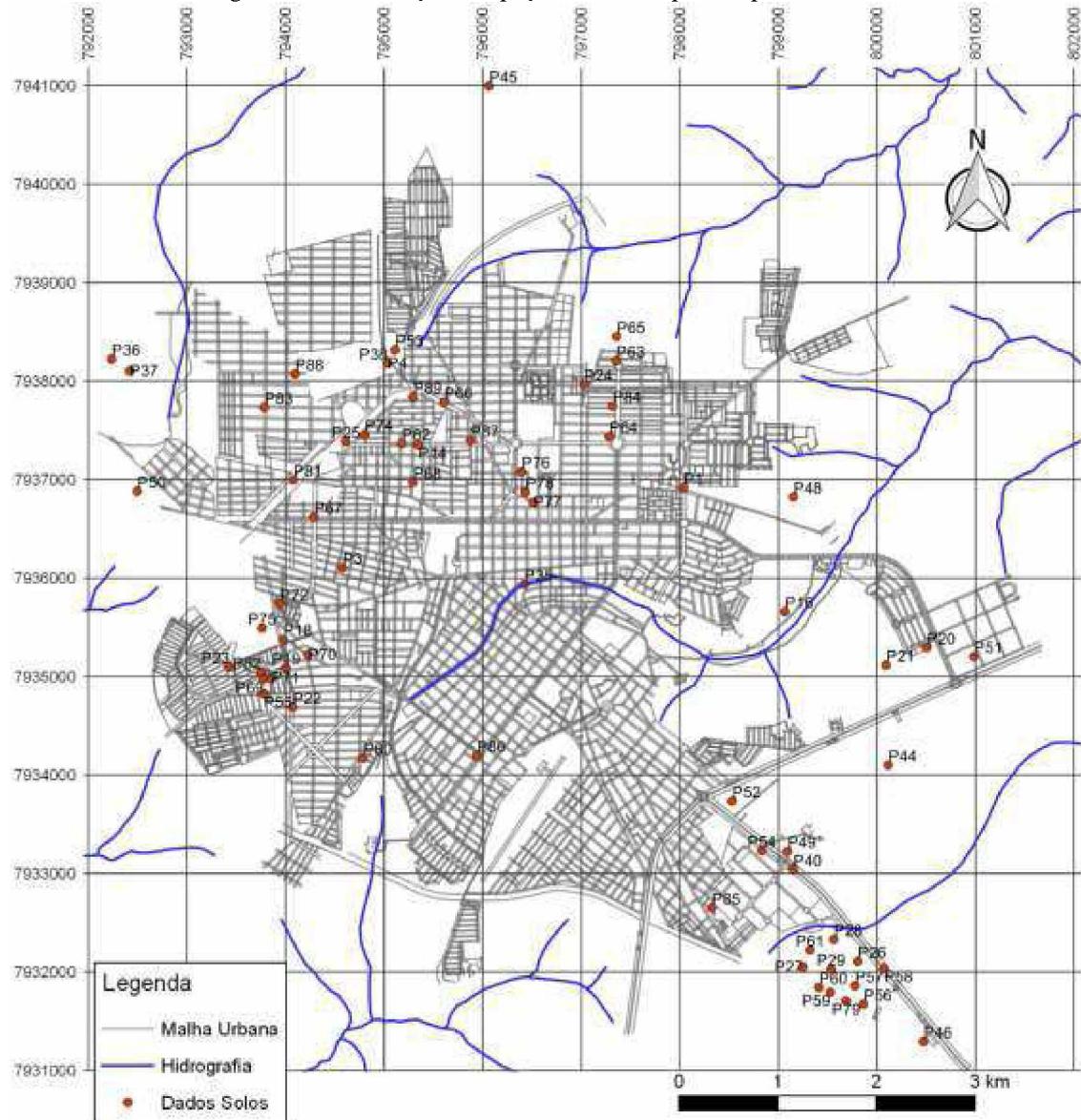
Inicialmente, existia a intenção de se trabalhar com dados geológicos a partir de sondagens de investigação geotécnica fornecida por empresa de sondagem para fins de construção civil. A quantidade de dados obtida não foi suficiente para a finalidade da pesquisa e por isso outra fonte de dados foi necessária. Em consulta a profissional que trabalha com outorga de poços e parâmetros obtidos no site do SIAM (Sistema Integrado de Informação Ambiental) foi possível melhorar a quantidade de dados do perfil litológico, obtendo uma série de informações de poços perfurados.

Através dos dados fornecidos e da pesquisa realizada no site do SIAM, foram obtidos 89 pontos que caracterizam o perfil litológico de cada poço. Os dados coletados foram organizados em uma planilha elaborada no programa Excel, sendo eles: coordenadas geográficas em latitude e longitude, profundidade do nível estático, profundidade do nível dinâmico, profundidade total do poço, vazão total do teste, data do teste de bombeamento, número do processo de outorga, litologia da camada 1, espessura da camada 1, litologia da camada 2, espessura da camada 2, litologia da camada 3 e espessura da camada 3. Nem todos os poços possuíam todas as informações e da mesma forma que aconteceu com os dados de profundidade do lençol freático, inicialmente não era possível separar os poços que estavam na área de estudo dos demais.

Ao final da elaboração da tabela e com a importação dos dados no QGIS foi possível selecionar aqueles que estavam dentro do limite da área da pesquisa. Do total de dados obtidos 22 foram descartados por estarem fora da área de estudo. A Figura 26 apresenta a localização dos poços que compuseram os dados de solos e sua respectiva identificação.

Nem todas as informações armazenadas foram utilizadas pois o foco dessa etapa foram os dados litológicos, mas serviram como complemento aos dados de profundidade do lençol freático. Na Tabela 14 estão apresentados os dados litológicos dentro da área de estudo.

Figura 26 - Localização dos poços estudados para os parâmetros de solos



Fonte: Autora (2016)

Tabela 14 - Dados solos

Id	Latitude	Longitude	Processo SIAM	Camada 1	Espessura Camada 1	Camada 2	Espessura Camada 2	Camada 3	Espessura Camada 3	Nível Estático	Parâmetro S	Parâmetro I	Parâmetro A
P1	-18,63764	-48,17528	-	Solo laterítico	6	Arenito Bauru	54			25,34	7	5,5	6
P3	-18,64547	-48,20792	-	Solo laterítico	6	Arenito Bauru	44			21,20	7	5,4	6
P4	-18,62667	-48,20389	-	Solo laterítico	6	Arenito Bauru	44			8,14	7	4,0	6
P14	-18,63408	-48,20083	-	Solo laterítico	6	Arenito Bauru	54			8,13	7	4,0	6
P16	-18,64886	-48,16536	-	Solo laterítico	6	Arenito Bauru	43			24,10	7	5,5	6
P18	-18,65211	-48,21350	-	Solo laterítico	6	Arenito Bauru	52			32,10	7	5,6	6
P19	-18,65472	-48,21319	-	Solo laterítico	6	Arenito Bauru	61			28,95	7	5,6	6
P20	-18,65194	-48,15167	-	Solo laterítico	6	Arenito Bauru	39			20,52	7	5,4	6
P21	-18,65361	-48,15556	-	Solo laterítico	6	Arenito Bauru	36			23,60	7	5,4	6
P22	-18,65833	-48,21250	-	Solo laterítico	6	Arenito Bauru	57			34,15	7	5,6	6
P23	-18,65472	-48,21861	-	Solo laterítico	6	Arenito Bauru	50			35,40	7	5,6	6
P24	-18,62833	-48,18500	-	Solo laterítico	6	Arenito Bauru	53			17,20	7	5,2	6
P25	-18,63389	-48,20778	-	Solo laterítico	6	Arenito Bauru	52			19,52	7	5,3	6
P26	-18,68081	-48,15783	-	Solo laterítico	6	Arenito Bauru	49			18,45	7	5,3	6
P27	-18,68139	-48,16308	-	Solo laterítico	6	Arenito Bauru	45			3,38	7	3,0	6
P28	-18,67883	-48,16017	-	Solo laterítico	6	Arenito Bauru	55			10,08	7	4,5	6
P29	-18,68156	-48,16039	-	Solo laterítico	6	Arenito Bauru	46			7,12	7	3,7	6
P35	-18,64672	-48,19044	-	Solo laterítico	6	Arenito Bauru	20			2,00	7	10,0	6
P37	-18,62772	-48,22867	7094/2009	Solo laterítico	6	Arenito Bauru	54			10,30	7	4,6	6
P38	-18,62667	-48,20389	-	Solo laterítico	6	Arenito Bauru	44			9,35	7	4,4	6
P40	-18,67250	-48,16417	2375/2013	Solo laterítico	6	Arenito Bauru	16			13,00	7	4,9	6
P41	-18,72069	-48,12158	18541/2007	Solo laterítico	6	Arenito Bauru	30			21,45	7	5,4	6

Id	Latitude	Longitude	Processo SIAM	Camada 1	Espessura Camada 1	Camada 2	Espessura Camada 2	Camada 3	Espessura Camada 3	Nível Estático	Parâmetro S	Parâmetro I	Parâmetro A
P44	-18,66278	-48,15519	3756/2004	Solo laterítico	6	Arenito Bauru	52			23,35	7	5,4	6
P45	-18,60111	-48,19458	5051/2006	Solo laterítico	6	Arenito Bauru	47			16,28	7	5,2	6
P46	-18,68806	-48,15139	1926/2006	Solo laterítico	6	Arenito Bauru	60	Basalto	34	31,00	7	5,6	6
P47	-18,64269	-48,16033	-	Solo laterítico	6	Arenito Bauru	0	Basalto	76	38,53	7	5,7	6
P48	-18,63833	-48,16472	-	Solo laterítico	6	Arenito Bauru	16	Basalto	178	19,00	7	5,3	6
P49	-18,67083	-48,16475	1008/2009	Solo laterítico	6	Arenito Bauru	54			20,54	7	5,4	6
P50	-18,63875	-48,22775	4986/2012	Solo laterítico	6	Arenito Bauru	58			20,97	7	5,4	6
P51	-18,65269	-48,14714	-	Solo laterítico	6	Arenito Bauru	53			18,05	7	5,3	6
P52	-18,66631	-48,17014	-	Solo laterítico	6	Arenito Bauru	54			6,82	7	4,8	6
P53	-18,62544	-48,20319	5176/2009	Solo laterítico	4	Arenito Bauru	12	Basalto	0	17,12	7	4,8	6
P54	-18,67081	-48,16722	2231/2005	Solo laterítico	8	Arenito Bauru	48			26,30	7	5,5	6
P55	-18,65711	-48,21531	27691/2013	Solo laterítico	6	Arenito Bauru	60			17,43	7	5,2	6
P56	-18,68472	-48,15722	6171/2007	Solo laterítico	6	Arenito Bauru	51			16,51	7	5,2	6
P57	-18,68306	-48,15806	6170/2007	Solo laterítico	6	Arenito Bauru	50			15,97	7	5,1	6
P58	-18,68139	-48,15528	4281/2008	Solo laterítico	6	Arenito Bauru	50			15,47	7	5,1	6
P59	-18,68367	-48,16042	4279/2008	Solo laterítico	6	Arenito Bauru	47			15,62	7	5,1	6
P60	-18,68325	-48,16153	4282/2008	Solo laterítico	6	Arenito Bauru	46			6,28	7	3,2	6
P61	-18,67983	-48,16244	7403/2009	Solo laterítico	6	Arenito Bauru	55			26,84	7	5,5	6
P62	-18,65517	-48,21558	27687/2013	Solo laterítico	6	Arenito Bauru	45			21,60	7	5,4	6
P63	-18,62611	-48,18194	6522/2013	Solo laterítico	6	Arenito Bauru	54			19,40	7	5,3	6
P64	-18,63306	-48,18250	6601/2013	Solo laterítico	6	Arenito Bauru	54			16,91	7	5,2	6
P65	-18,62389	-48,18194	6516/2013	Solo laterítico	6	Arenito Bauru	54			15,26	7	5,1	6
P66	-18,63014	-48,19842	22632/2013	Solo laterítico	6	Arenito Bauru	58			24,10	7	5,5	6
P67	-18,64086	-48,21075	7154/2014	Solo laterítico	6	Arenito Bauru	54			15,90	7	5,1	6

Id	Latitude	Longitude	Processo SIAM	Camada 1	Espessura Camada 1	Camada 2	Espessura Camada 2	Camada 3	Espessura Camada 3	Nível Estático	Parâmetro S	Parâmetro I	Parâmetro A
P68	-18,63756	-48,20128	414/2014	Solo laterítico	6	Arenito Bauru	52			26,49	7	5,5	6
P69	-18,65581	-48,21533	27688/2013	Solo laterítico	6	Arenito Bauru	60			29,46	7	5,6	6
P70	-18,65347	-48,21111	14909/2011	Solo laterítico	6	Arenito Bauru	61			27,92	7	5,5	6
P71	-18,65569	-48,21461	27689/2013	Solo laterítico	6	Arenito Bauru	60			29,50	7	5,6	6
P72	-18,64889	-48,21389	877/2012	Solo laterítico	6	Arenito Bauru	61			26,18	7	5,5	6
P74	-18,63325	-48,20600	879/2012	Solo laterítico	6	Arenito Bauru	54			28,13	7	5,5	6
P75	-18,65111	-48,21556	7161/2012	Solo laterítico	6	Arenito Bauru	55			18,80	7	5,5	6
P76	-18,63642	-48,19089	4152/2008	Solo laterítico	5	Arenito Bauru	55			18,90	7	5,5	6
P77	-18,63919	-48,18972	4153/2008	Solo laterítico	5	Arenito Bauru	55			17,15	7	5,4	6
P78	-18,63828	-48,19047	2300/2011	Solo laterítico	5	Arenito Bauru	55			20,20	7	6,0	6
P79	-18,68444	-48,15889	13984/2011	Solo laterítico	0	Arenito Bauru	40			17,06	7	5,6	6
P80	-18,66289	-48,20564	5147/2008	Solo laterítico	4	Arenito Bauru	56			21,08	7	4,7	6
P81	-18,63750	-48,21278	13982/2011	Solo laterítico	10	Arenito Bauru	34,5			20,31	7	5,2	6
P82	-18,63400	-48,20242	4029/2005	Solo laterítico	7	Arenito Bauru	71	Basalto	24	25,52	7	3,2	6
P83	-18,63089	-48,21567	4030/2005	Solo laterítico	24	Arenito Bauru	54	Basalto	30	24,50	7	4,4	6
P84	-18,63028	-48,18222	-	Solo laterítico	14	Arenito Bauru	50	Basalto	7	16,10	7	3,4	6
P85	-18,67611	-48,17194	-	Solo laterítico	14	Arenito Bauru	56	Basalto	6	17,00	7	3,0	6
P86	-18,66250	-48,19472	-	Solo laterítico	18	Arenito Bauru	48	Basalto	6	16,00	7	5,1	6
P87	-18,63361	-48,19583	-	Solo laterítico	6	Arenito Bauru	62	Basalto	4	17,00	7	3,6	6
P88	-18,62778	-48,21278	-	Solo laterítico	14	Arenito Bauru	50	Basalto	12	9,60	7	4,4	6
P89	-18,62972	-48,20139	-	Solo laterítico	6	Arenito Bauru	54	Basalto	12	25,34	7	5,5	6

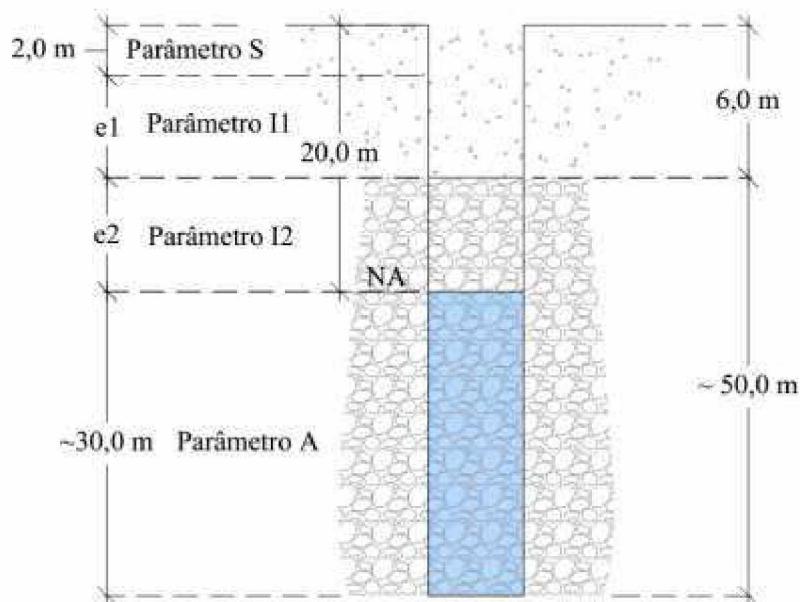
Fonte: Autora (2016)

Pode-se observar na tabela a constância na camada de solo laterítico com 6m em quase todos os pontos do estudo, permitindo que o parâmetro tipo de solo (Sc), que representa a camada superficial fosse considerada constante. Segundo Alamy Filho et al. (2013) essa camada possui uma espessura de até 2m. A determinação desse valor levou em consideração os valores atribuídos na Tabela 6. A caracterização de solo laterítico foi avaliada como argila agregada e/ou contraída. Segundo perfis estratigráficos fornecidos pela SAE (Anexo 1) a caracterização da camada superficial varia de argila pouco arenosa a siltosa, com coloração entre vermelho e amarelo. Com a caracterização em argila agregada e/ou contraída, o valor atribuído de acordo com a Tabela 6 é de 7, constante para toda a superfície analisada.

O parâmetro litotipo que compõe o aquífero (Ac) também apresentou valor constante pois o objeto do trabalho é apenas o aquífero Bauru, portanto, apenas o parâmetro arenito foi avaliado. Com essa consideração, o parâmetro litotipo ficou constante e, conforme dados da Tabela 5, foi classificado em arenito, podendo ser maciço ou acamado, no caso da área de estudo o arenito não é maciço, foi então avaliado como arenito acamado, para tal parâmetro foi usado o valor médio de 6 indicado por Melo Junior (2008) na Tabela 5.

Na avaliação do parâmetro de solo existente na zona vadosa (Ic), existe para cada ponto de estudo uma variação em relação à composição do tipo de material das camadas, a superficial (avaliada em argila) e a camada do arenito. Visando utilizar toda a região entre a camada superficial, considerada com 2m de espessura e o topo do lençol freático, foi realizada uma ponderação considerando a espessura da camada de argila (solo laterítico) e a espessura do arenito em cada ponto, a Figura 27 apresenta como foi realizada a análise do parâmetro Ic em um poço esquemático.

Figura 27 – Análise do Parâmetro I em um Poço Esquemático



Fonte: Autora (2016)

Foi realizada a média ponderada dos dados considerando a espessura da camada de solo laterítico, representada por e1 na Figura 27 (geralmente 4 m nos dados avaliados) e a espessura do arenito, representado por e2 na Figura 27, região limitada pelo nível de água. Cada espessura foi multiplicada pelo respectivo valor atribuído na Tabela 8 e somados, esse valor foi dividido pela espessura total da camada da zona vadosa.

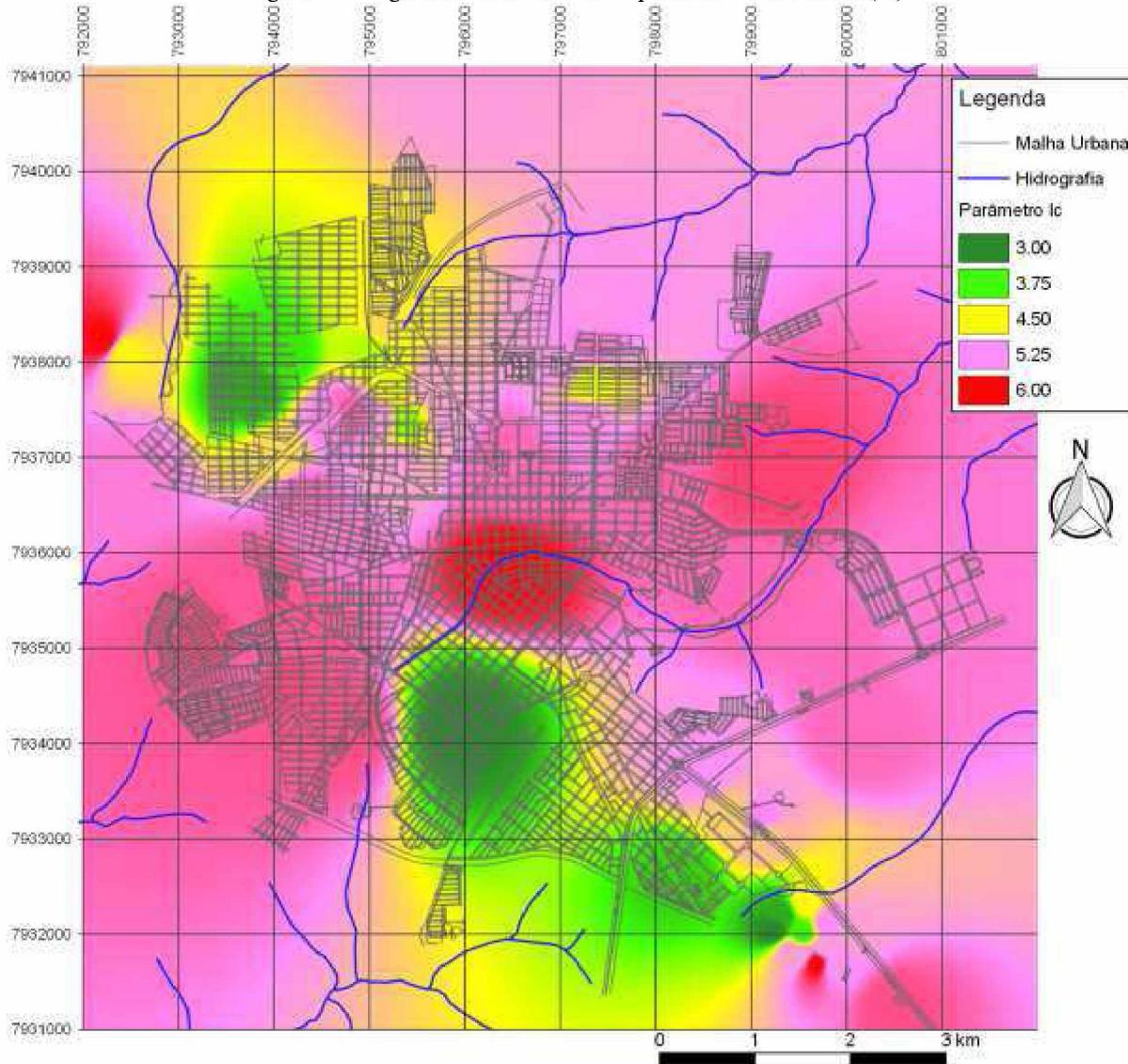
$$I_{médio} = \frac{e_1 \cdot I_1 + e_2 \cdot I_2}{e_1 + e_2} \quad (3)$$

O valor atribuído para a camada superficial foi de 3, valor considerado para um solo tipo silte/argila, o valor imputado para a camada de arenito foi 6, os dois valores correspondem ao valor médio proposto por Melo Junior (2008) na Tabela 8.

A Figura 27 exemplifica um poço modelo e a equação 3 exemplifica a ponderação realizada, no caso do exemplo da figura, o valor de e1 é 4 m, e2 é 14 m, o valor de I1 é 3 e o valor de I2 é 6, o valor do parâmetro I ponderado será 5,33. Para cada ponto de amostra de solo obtido, os valores resultantes para os parâmetros podem ser observados na Tabela 14 coluna do Parâmetro I.

Os dados ponderados para cada ponto, representados na Tabela 14 pela coluna Parâmetro I foram interpolados no QGIS e o resultado final pode ser observado na Figura 28.

Figura 28 – Figura do Parâmetro de Impacto da Zona Vadosa (Ic)



Fonte: Autora (2016)

3.2.1.4. PARÂMETRO T – INCLINAÇÃO DA SUPERFÍCIE

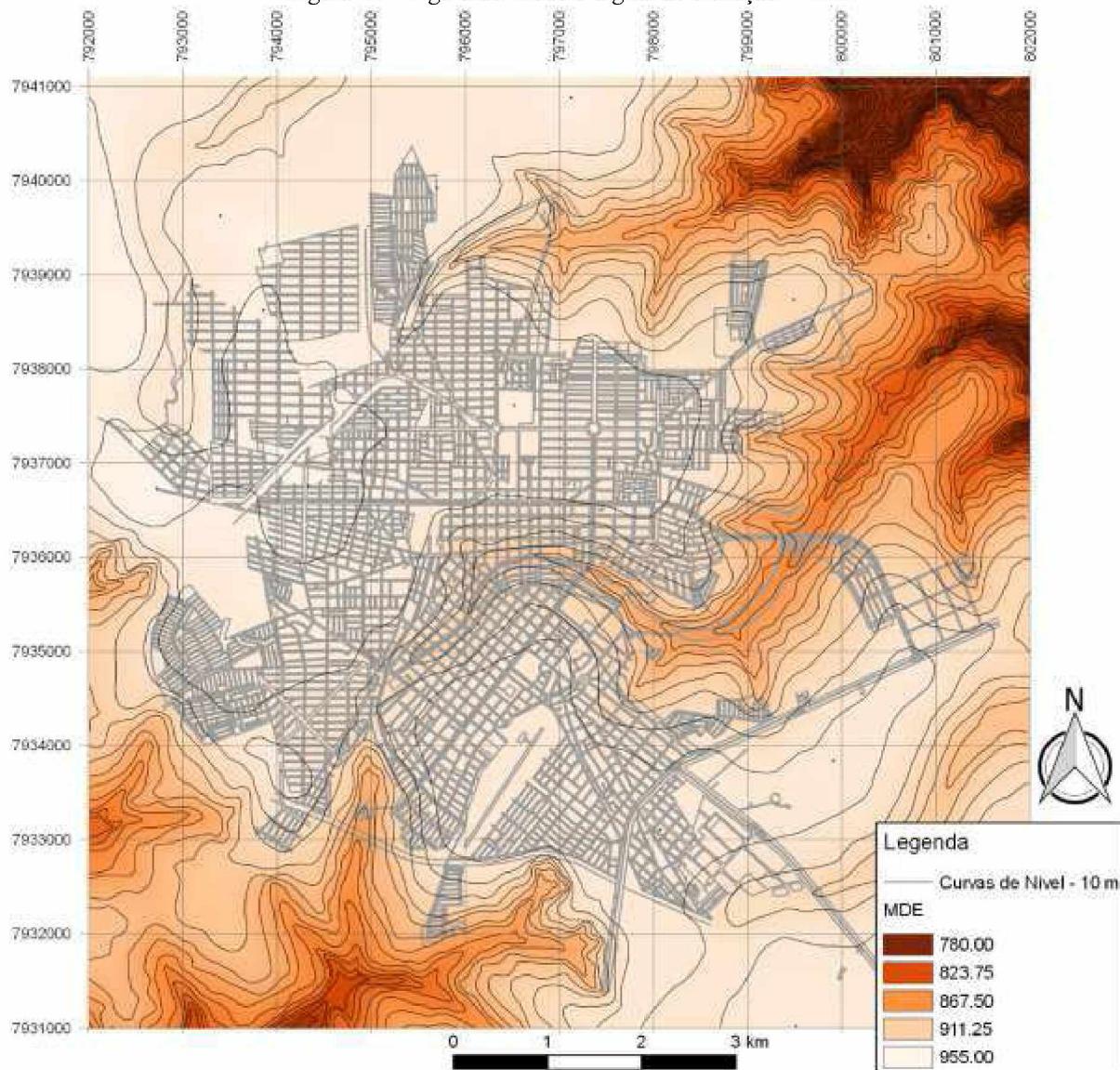
O parâmetro inclinação do relevo determina a possibilidade de um poluente percolar na superfície do solo e isso depende da inclinação da superfície, por exemplo, quando chove em um terreno plano e a água de drenagem está misturada a um determinado poluente, essa água escoará lentamente permitindo percolação da água e do poluente, enquanto que,

num terreno mais acidentado ela escoará rapidamente. Apesar de dificultar a poluição, uma região mais acidentada dificulta a recarga do aquífero.

Para a determinação desse mapa, inicialmente foi necessário extrair as curvas de nível das cartas topográficas, apresentadas na Figura 21 e Figura 22. Devido à falta de informações precisas na planta topográfica com curvas fornecida pela SAE, foi necessária digitalização manual das curvas e seus respectivos valores de altitude. As curvas de nível com equidistância de 10 m podem ser visualizadas na Figura 19, juntamente com a área de estudo do projeto e a hidrografia

A partir das curvas foi possível elaborar o modelo digital de elevação – MDE. Com auxílio do complemento GRASS associado ao QGIS foi feita a rasterização (transformação dos dados vetoriais para matriciais) das curvas e posteriormente a elaboração do MDE, nesse processo é necessário para utilização do GRASS. O resultado do MDE pode ser visto na Figura 29.

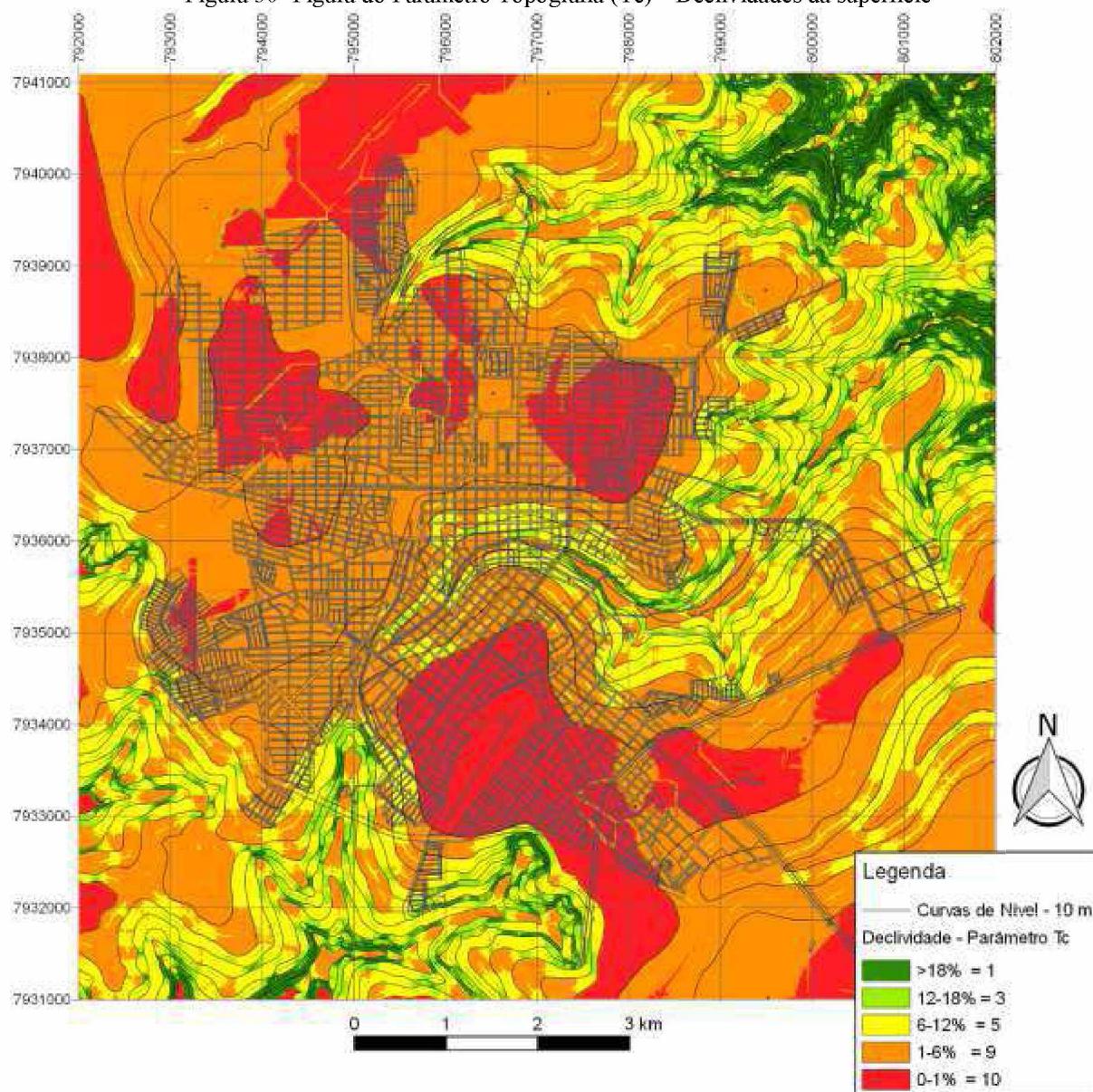
Figura 29 – Figura do Modelo digital de elevação - MDE



Fonte: Autora (2016)

Com o MDE foi possível extrair as declividades da superfície e o resultado desse processo pode ser observado na Figura 30 que apresenta o mapa de declividade reclassificado conforme valores da Tabela 7.

Figura 30- Figura do Parâmetro Topografia (Tc) – Declividades da superfície



Fonte: Autora (2016)

Ocorreram algumas incompatibilidades no MDE e consequentemente no mapa de declividades, na região mais plana podem ser observadas duas regiões circulares, próximas às coordenadas N7938000m; E796000m e N7939000m; E794000m, que indicam declividade mais elevada na região noroeste da figura. São dois locais caracterizados na figura pela cor verde, isso destaca um erro na geração da declividade. O MDE e o mapa de declividade foram gerados várias vezes na tentativa de melhorar esse e outros erros que ocorreram, mas não foi possível corrigir todos os problemas.

3.2.1.5. PARÂMETRO C – CONDUTIVIDADE HIDRÁULICA

Souza (2009) realizou testes de campo para obtenção da condutividade hidráulica do solo superficial e Segantini (2010) utilizou os valores estabelecidos por Velásquez (2004) e Oliveira e Campos (2004). O primeiro trabalho fornece dados da condutividade hidráulica superficial, o segundo utilizou parâmetros de condutividade profunda.

Foi estabelecido na pesquisa a utilização da condutividade hidráulica superficial por representar melhor a possibilidade de percolação no solo de um dado poluente. Caso fossem realizados modelos de fluxo, o parâmetro de condutividade profunda seria mais adequado. Na análise desses dois grupos de dados, observa-se que os dados obtidos por Souza (2009) possuem uma faixa de valores mais altos daqueles apresentados por Segantini (2010), indicando uma movimentação facilitada na região de solo superficial em comparação com o material do aquífero.

Os dados utilizados para elaboração do mapa de condutividade hidráulica estão apresentados na Tabela 15. Para cada valor de K foi atribuído um valor referente ao parâmetro condutividade estabelecido pela Tabela 9, na qual a coluna Cc expõe os valores atribuídos para cada valor de K. A distribuição espacial dos pontos pode ser vista na Figura 31.

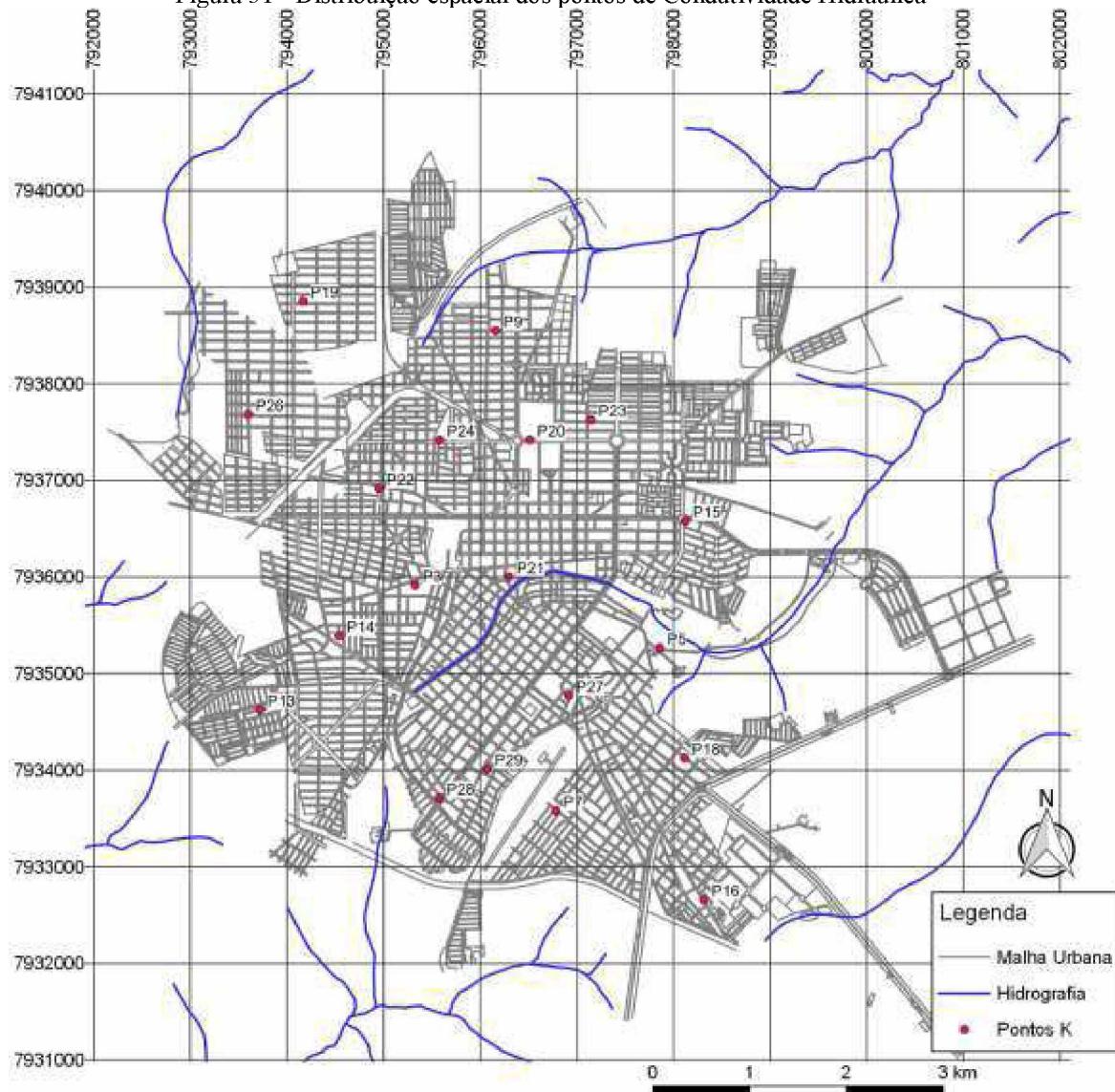
Tabela 15 - Condutividade Hidráulica do solo superficial - K

Id	Coord. E (m)	Coord. N (m)	K (m/d)	Cc
P3	795326	7935917	2,01	1
P5	797856	7935265	6,02	2
P7	796784	7933579	22,95	4
P9	796159	7938550	58,23	8
P13	793720	7934624	1,01	1
P14	794541	7935391	10,66	2
P15	798123	7936579	2,06	1
P16	798316	7932658	1,60	1
P18	798114	7934125	8,96	2
P19	794167	7938855	13,03	4
P20	796511	7937419	10,52	2
P21	796299	7936000	18,60	4
P22	794950	7936916	14,81	4

Id	Coord. E (m)	Coord. N (m)	K (m/d)	Cc
P23	797146	7937628	2,89	1
P24	795578	7937418	25,84	4
P26	793598	7937682	23,82	4
P27	796915	7934770	46,81	8
P28	795574	7933710	27,14	4
P29	796074	7934013	17,79	4

Fonte: Adaptado de Souza (2009)

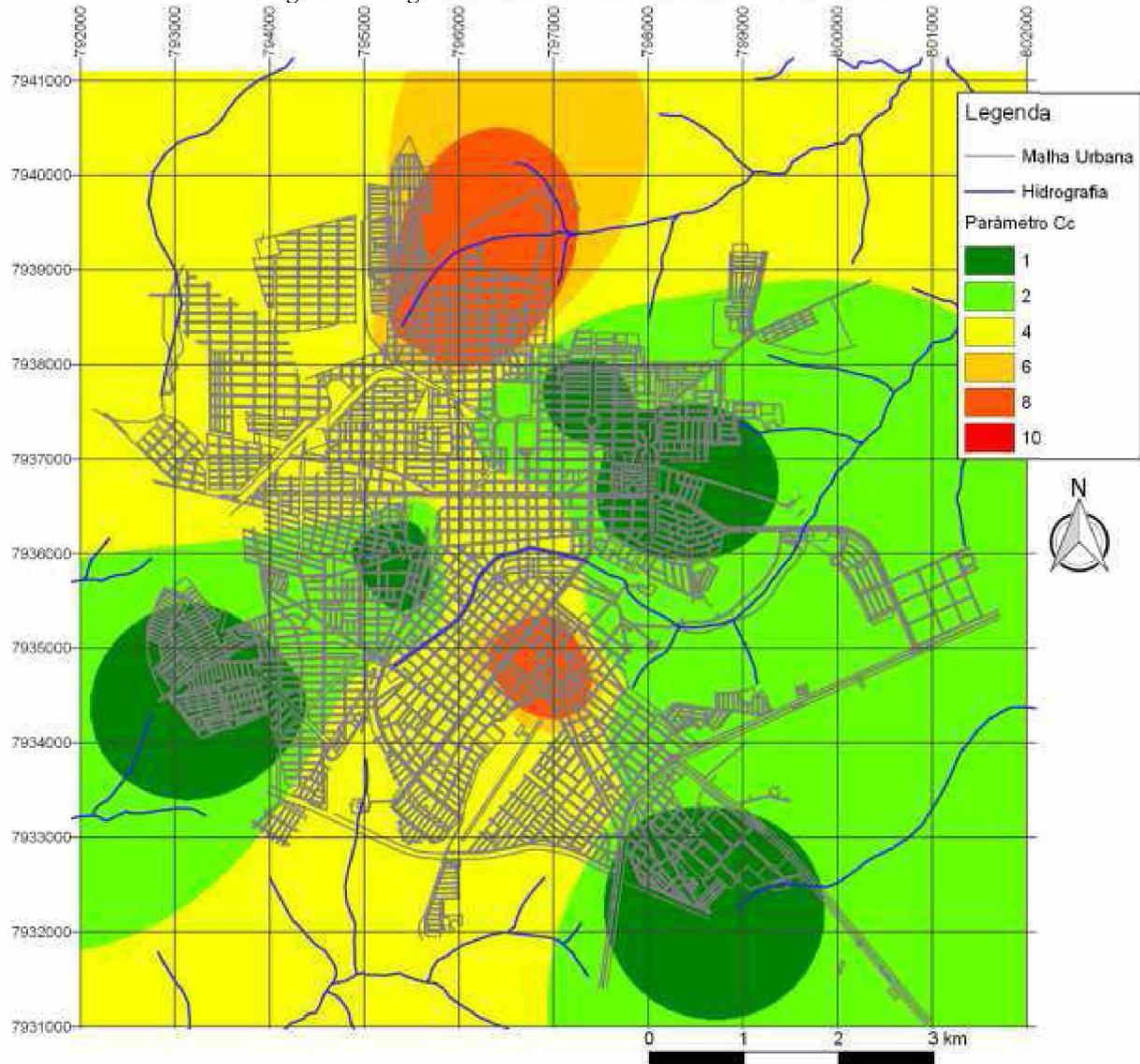
Figura 31 - Distribuição espacial dos pontos de Condutividade Hidráulica



Fonte: Autora (2016)

A partir dos valores da condutividade hidráulica ponderados de acordo com a Tabela 9, valores apresentados na coluna Cc da Tabela 15 temos o mapa com o parâmetro de condutividade hidráulica, interpolado usando o programa QGIS, na Figura 32.

Figura 32 – Figura do Parâmetro Condutividade Hidráulica Cc



Fonte: Autora (2016)

3.2.2. MÉTODO GOD

O método GOD foi elaborado conforme apresentado no Capítulo 2 (item 2.1.3.1.2). Nos itens que seguem será descrito como foram elaborados os mapas dos parâmetros e o resultado do método.

3.2.2.1. PARÂMETRO G – OCORRÊNCIA DE ÁGUA SUBTERRÂNEA

O parâmetro ocorrência da água subterrânea foi considerado como um valor constante em razão de toda a área de estudo estar sobreposta a um aquífero livre. Foi fixado para esse item a definição de área não confinada, cujo peso é 1, valor mais alto na consideração de vulnerabilidade. A escolha desse valor está em acordo com Alamy Filho et al. (2013).

3.2.2.2. PARÂMETRO O – LITOLOGIA ACIMA DO AQUÍFERO

Na determinação do parâmetro litologia acima do aquífero foram utilizados os mesmos dados do parâmetro Ic, empregado no método DRASTIC, sendo considerada a camada abaixo de 2 m de profundidade e acima do nível do lençol freático. Os dados foram ajustados aos valores estabelecidos na Figura 8. A camada que representa solo laterítico foi classificada como argila, valor atribuído de 0,3, e a camada do Arenito Bauru recebeu o valor de 0,7 determinado para arenitos.

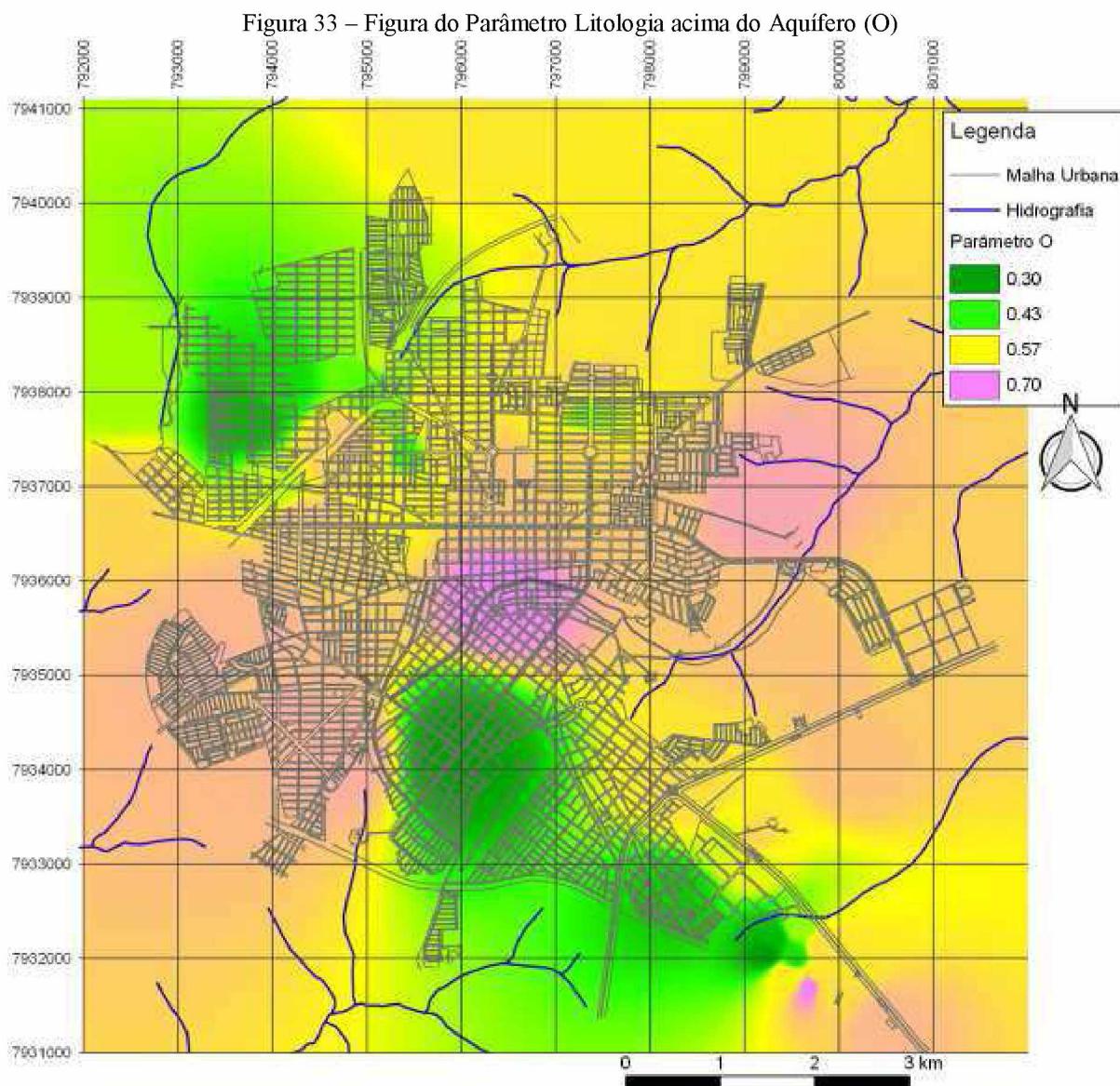
Para cada ponto analisado foi feito o mesmo procedimento usado no parâmetro Ic do método DRASTIC, usando a Equação 3, foi realizada uma ponderação de cada ponto em função da camada de solo existente. A Tabela 16 apresenta os valores ponderados na coluna parâmetro O.

Tabela 16 – Dados parâmetro Caracterização do Aquífero quanto à Litologia (O)

Id	Latitude	Longitude	Parâmetro O	Id	Latitude	Longitude	Parâmetro O
P1	-18,63764	-48,17528	0,63	P56	-18,68472	-48,15722	0,59
P3	-18,64547	-48,20792	0,62	P57	-18,68306	-48,15806	0,59
P4	-18,62667	-48,20389	0,44	P58	-18,68139	-48,15528	0,58
P14	-18,63408	-48,20083	0,44	P59	-18,68367	-48,16042	0,58
P16	-18,64886	-48,16536	0,63	P60	-18,68325	-48,16153	0,33
P18	-18,65211	-48,21350	0,65	P61	-18,67983	-48,16244	0,64
P19	-18,65472	-48,21319	0,64	P62	-18,65517	-48,21558	0,62
P20	-18,65194	-48,15167	0,61	P63	-18,62611	-48,18194	0,61
P21	-18,65361	-48,15556	0,63	P64	-18,63306	-48,18250	0,59
P22	-18,65833	-48,21250	0,65	P65	-18,62389	-48,18194	0,58
P23	-18,65472	-48,21861	0,65	P66	-18,63014	-48,19842	0,63
P24	-18,62833	-48,18500	0,59	P67	-18,64086	-48,21075	0,58
P25	-18,63389	-48,20778	0,61	P68	-18,63756	-48,20128	0,63
P26	-18,68081	-48,15783	0,39	P69	-18,65581	-48,21533	0,64
P27	-18,68139	-48,16308	0,60	P70	-18,65347	-48,21111	0,64
P28	-18,67883	-48,16017	0,30	P71	-18,65569	-48,21461	0,64
P29	-18,68156	-48,16039	0,50	P72	-18,64889	-48,21389	0,63
P35	-18,64672	-48,19044	0,70	P74	-18,63325	-48,20600	0,64
P37	-18,62772	-48,22867	0,51	P75	-18,65111	-48,21556	0,63
P38	-18,62667	-48,20389	0,48	P76	-18,63642	-48,19089	0,63
P40	-18,67250	-48,16417	0,55	P77	-18,63919	-48,18972	0,62
P41	-18,72069	-48,12158	0,62	P78	-18,63828	-48,19047	0,70
P44	-18,66278	-48,15519	0,63	P79	-18,68444	-48,15889	0,65
P45	-18,60111	-48,19458	0,59	P80	-18,66289	-48,20564	0,53
P46	-18,68806	-48,15139	0,64	P81	-18,63750	-48,21278	0,59
P47	-18,64269	-48,16033	0,66	P82	-18,63400	-48,20242	0,33
P48	-18,63833	-48,16472	0,61	P83	-18,63089	-48,21567	0,49
P49	-18,67083	-48,16475	0,61	P84	-18,63028	-48,18222	0,36
P50	-18,63875	-48,22775	0,62	P85	-18,67611	-48,17194	0,30
P51	-18,65269	-48,14714	0,60	P86	-18,66250	-48,19472	0,59
P52	-18,66631	-48,17014	0,53	P87	-18,63361	-48,19583	0,38
P53	-18,62544	-48,20319	0,54	P88	-18,62778	-48,21278	0,49
P54	-18,67081	-48,16722	0,63	P89	-18,62972	-48,20139	0,63
P55	-18,65711	-48,21531	0,60				

Fonte: Autora (2016)

A Figura 33 apresenta o resultado da interpolação dos valores apresentados na Tabela 16, coluna parâmetro O. Pode-se observar a faixa de valores entre 0,3 e 0,7.



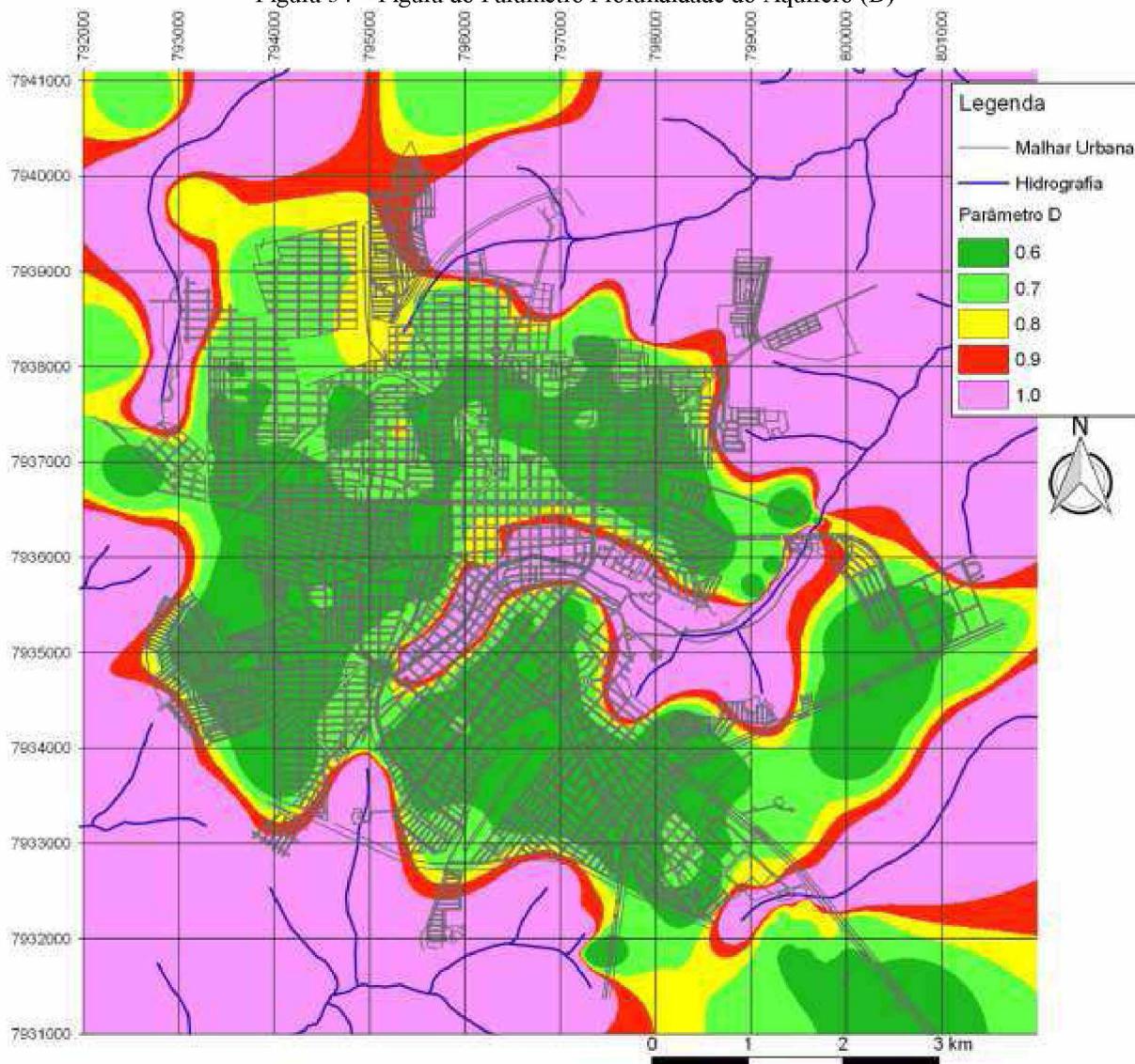
Fonte: Autora (2016)

3.2.2.3. PARÂMETRO D – PROFUNDIDADE DO AQUÍFERO

Na determinação do parâmetro de profundidade do aquífero, foram usados os mesmos dados do parâmetro D do método DRASTIC, os valores precisaram ser reinterpolados para se adequarem à faixa de valores do método, conforme Figura 8. O resultado do

procedimento realizado no QGIS pode ser observado na Figura 34 que apresenta o mapa do parâmetro D.

Figura 34 – Figura do Parâmetro Profundidade do Aquífero (D)



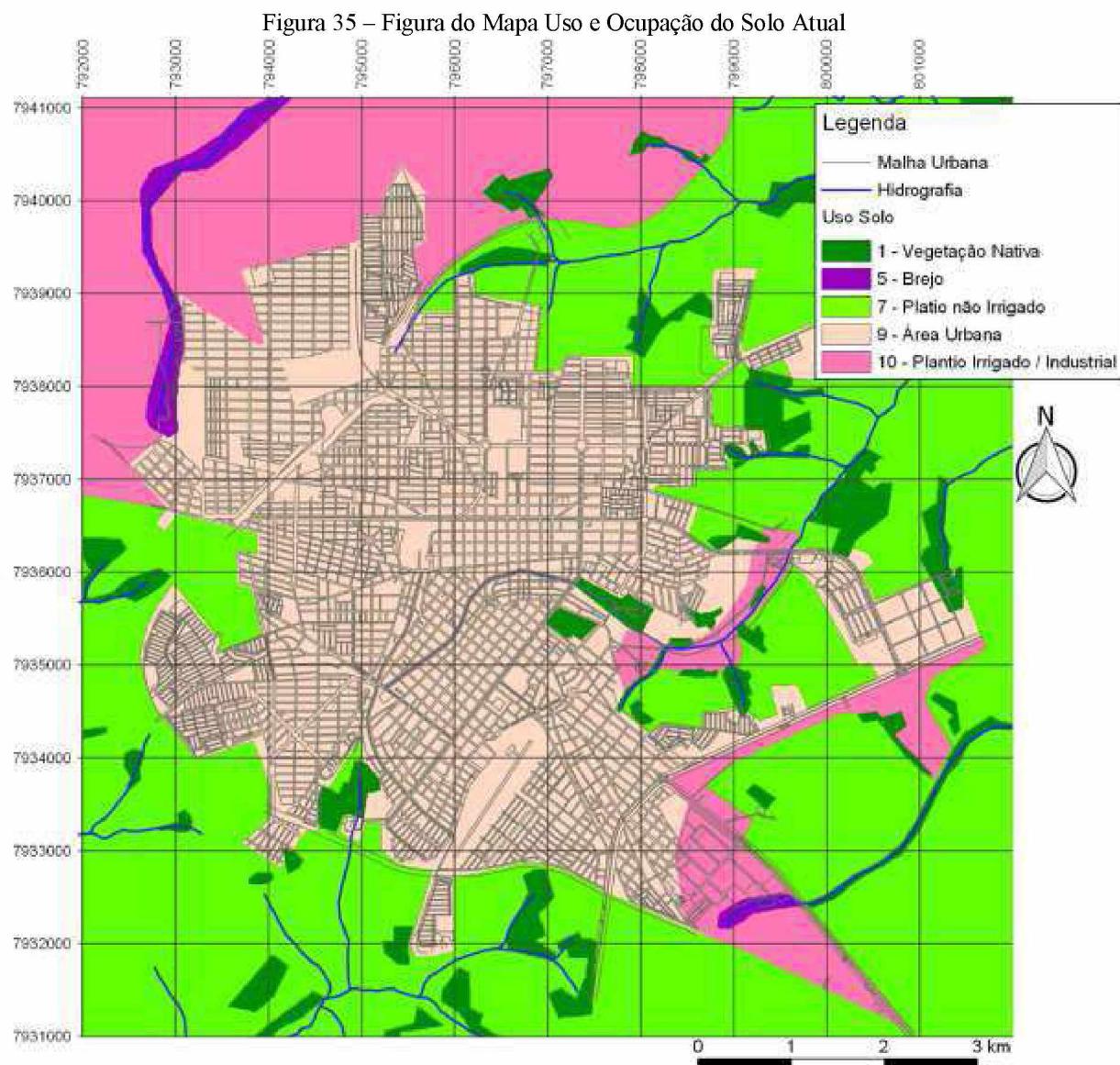
Fonte: Autora (2016)

3.2.3. USO E OCUPAÇÃO DO SOLO

Na caracterização do uso e ocupação do solo, foram identificadas as áreas residenciais, áreas industriais, plantio irrigado, plantio não irrigado, brejos e áreas não cultivadas. O mapa do uso e ocupação do solo atual foi elaborado com auxílio de imagens de satélite disponíveis pelo Google Earth e mapa urbano do município atualizado pela Prefeitura

Municipal de Araguari, contendo os novos loteamentos aprovados e ainda não implantados.

O mapa de uso e ocupação do solo pode ser apreciado na Figura 35, os valores foram atribuídos conforme Tabela 12, o valor 1 corresponde às áreas não cultivadas (vegetação), o valor 5 aos brejos, o valor 7 às áreas de plantio não irrigadas, 9 foi atribuído à área urbana e 10 às áreas de plantio irrigado e áreas industriais.



Fonte: Autora (2016)

3.2.4. MAPA DE EXPANSÃO - PLANO DIRETOR

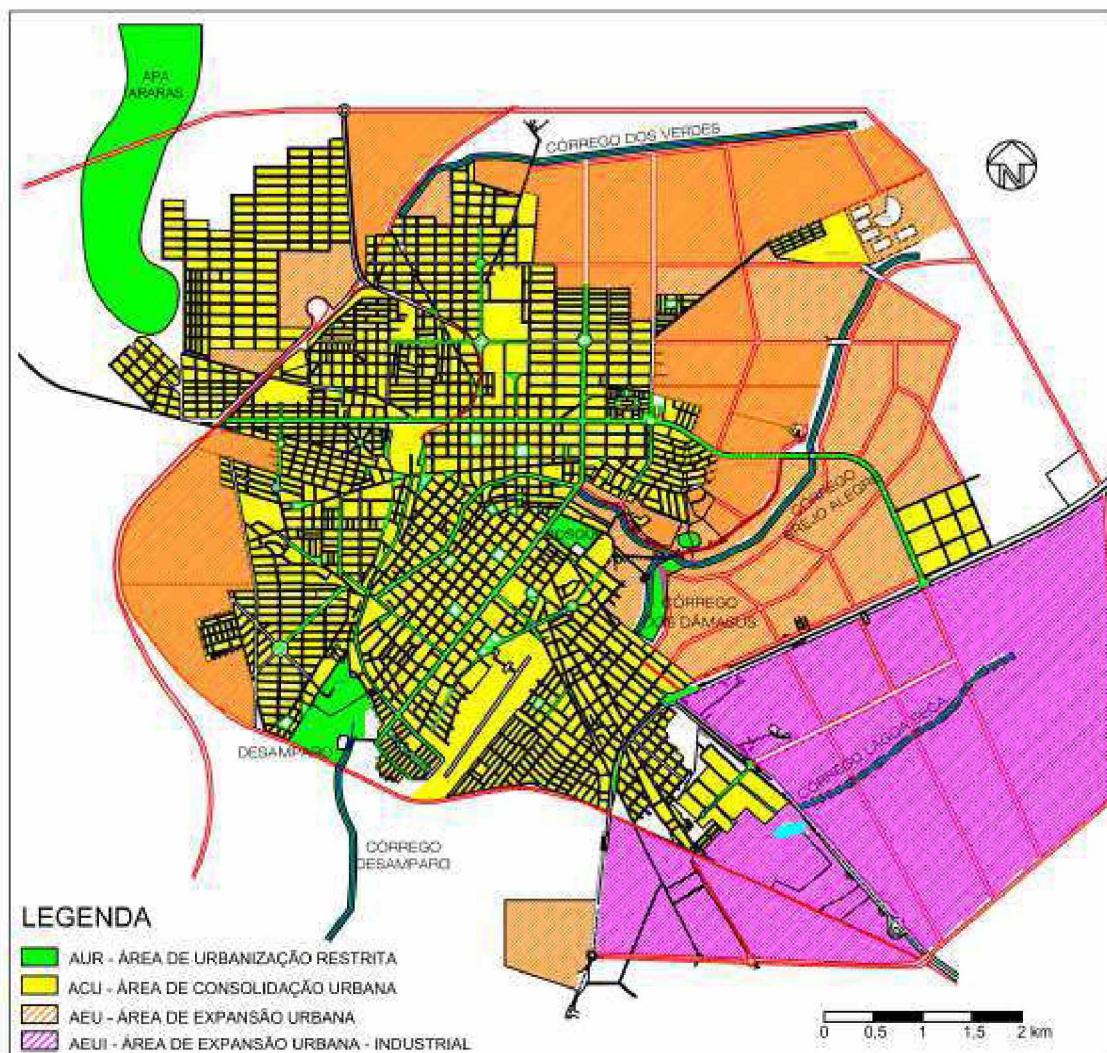
Na Lei complementar 034/2004, que dispõe sobre o Plano Diretor Urbano – PDU do município de Araguari, estão estabelecidos os parâmetros de expansão da cidade tendo em vista aspectos sociais, políticos e econômicos. Este documento dispõe sobre os requisitos para ocupação de novas áreas. Com relação ao planejamento ambiental, a lei define o meio ambiente como elemento fundamental do sistema de planejamento e desenvolvimento sustentável do município. Os anexos dessa legislação delimitam as futuras áreas de crescimento do município e a vocação de cada região, são definidas áreas de expansão industrial, residencial e aquelas que devem ser protegidas.

A Figura 36 é uma adequação do Mapa 4, anexo da Lei 034/2004, que prevê as futuras áreas de expansão residencial e industrial. Em amarelo estão representadas as áreas urbanas já consolidadas, em verde as áreas de proteção (denominadas urbanização restrita), as de hachura laranja estão as futuras áreas de expansão urbana e hachura rosa as futuras áreas de expansão industrial. As denominadas áreas de urbanização restrita, segundo o PDU, compreende: áreas de preservação, áreas lindeiras, áreas de exploração mineral, áreas de preservação dos mananciais hídricos de abastecimento, áreas de nascentes e áreas verdes.

No Mapa 4, proposto pela legislação do PDU, estão caracterizadas como áreas de urbanização restrita as áreas de praças, canteiros centrais de avenidas, o bosque John Kennedy, a região de brejo da cabeceira das Araras, uma vegetação remanescente na região do desemparo e áreas de preservação permanente no córrego Desamparo, córrego dos Verdes, córrego dos Dâmasus, córrego Lagoa Seca e córrego Brejo Alegre (na região ainda não urbanizada).

Como o mapa foi elaborado em 2004, ao longo desse período várias áreas já se tornaram urbanizadas, como pode ser evidenciado nas sobreposições das imagens de satélite, Figura 15, Figura 16 e Figura 17. A tendência de crescimento proposta pelo plano diretor tem sido seguida (em sua maioria), evidenciando um crescimento conforme proposto pela legislação.

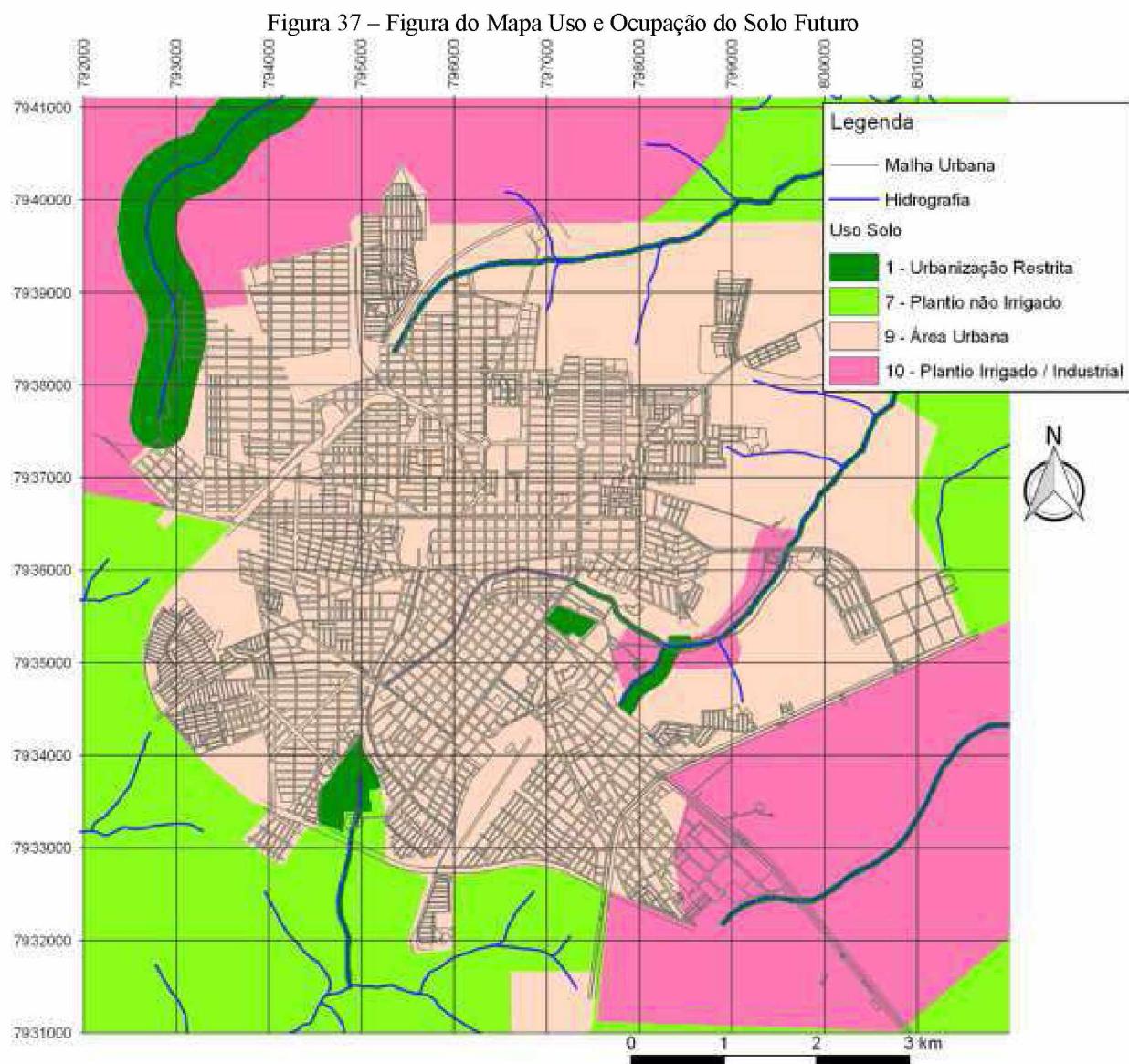
Figura 36 – Figura das Áreas de Urbanização



Fonte: Adaptado de PMA; Lei complementar 034/2004 (sem escala)

Durante a elaboração do mapa de uso e ocupação do solo futuro, foram identificadas algumas divergências entre o mapa do PDU e o mapa atualizado fornecido pela municipalidade. No entanto, como o foco do trabalho é a delimitação das áreas de expansão, essas foram feitas através do mapa do PDU e utilizando sempre como mapa base o atualizado da malha urbana.

A partir do mapa apresentado na Figura 36 foi elaborado o mapa de uso e ocupação futuro, tendo sido incorporado nesse mapa uma segunda área industrial, próxima ao córrego Brejo Alegre, região já consolidada com empresas de curtume e matadouros. A Figura 37 ilustra o mapa de uso e ocupação futuro.



Fonte: Autora (2016)

Não foram consideradas no mapa de uso e ocupação, Figura 37, as áreas verdes previstas pelo PDU nas praças e canteiros centrais, isso foi feito pois grande parte dessas áreas não possui vegetação de forma significativa, além de existirem áreas impermeabilizadas nesses locais.

CAPÍTULO 4

RESULTADOS E CONCLUSÕES

“no caminho incerto da vida, o mais importante é decidir.”
Cora Coralina

4.1. RESULTADOS

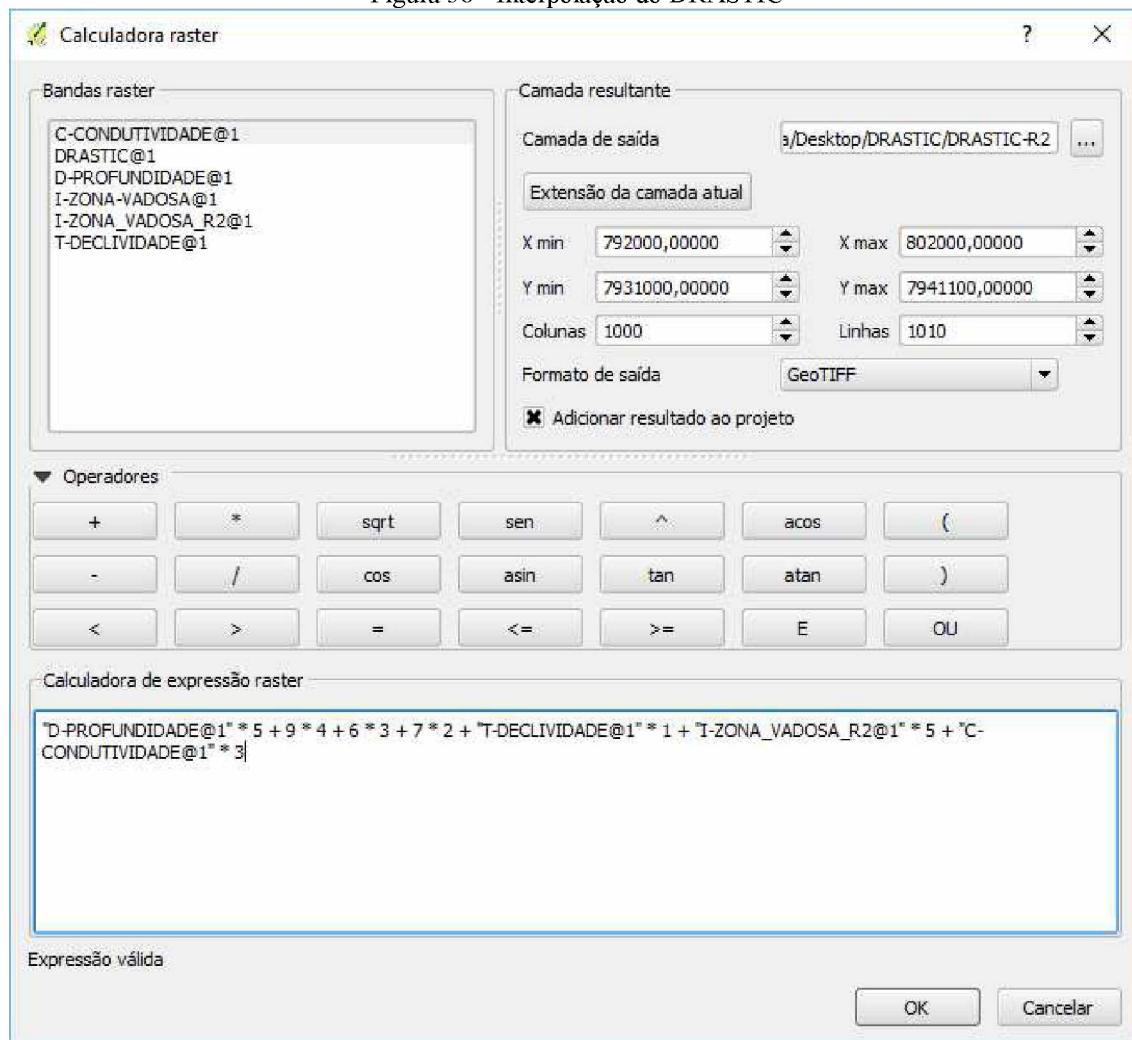
Os resultados gerados pela pesquisa estão apresentados em diversos mapas, são eles:

- Mapa de vulnerabilidade elaborado pelo método DRASTIC;
- Mapa de vulnerabilidade elaborado pelo método GOD;
- Mapa de risco a partir do método DRASTIC combinado com o mapa do uso e ocupação do solo atual – Cenário 1;
- Mapa de risco a partir do método DRASTIC combinado com o mapa de expansão previsto no Plano Diretor – Cenário 2;

4.1.1. DRASTIC

Com todos os mapas gerados em ambiente SIG, a elaboração do mapa de vulnerabilidade contou com o uso da calculadora raster, ferramenta do QGIS. A Figura 38 apresenta a tela desse procedimento. Nela foram definidos o local e nome do arquivo a ser gerado e escrita a equação no campo calculadora de expressão raster. Para que esse procedimento fosse aplicado de forma correta, todos os arquivos de entrada deveriam conter malhas e limites iguais.

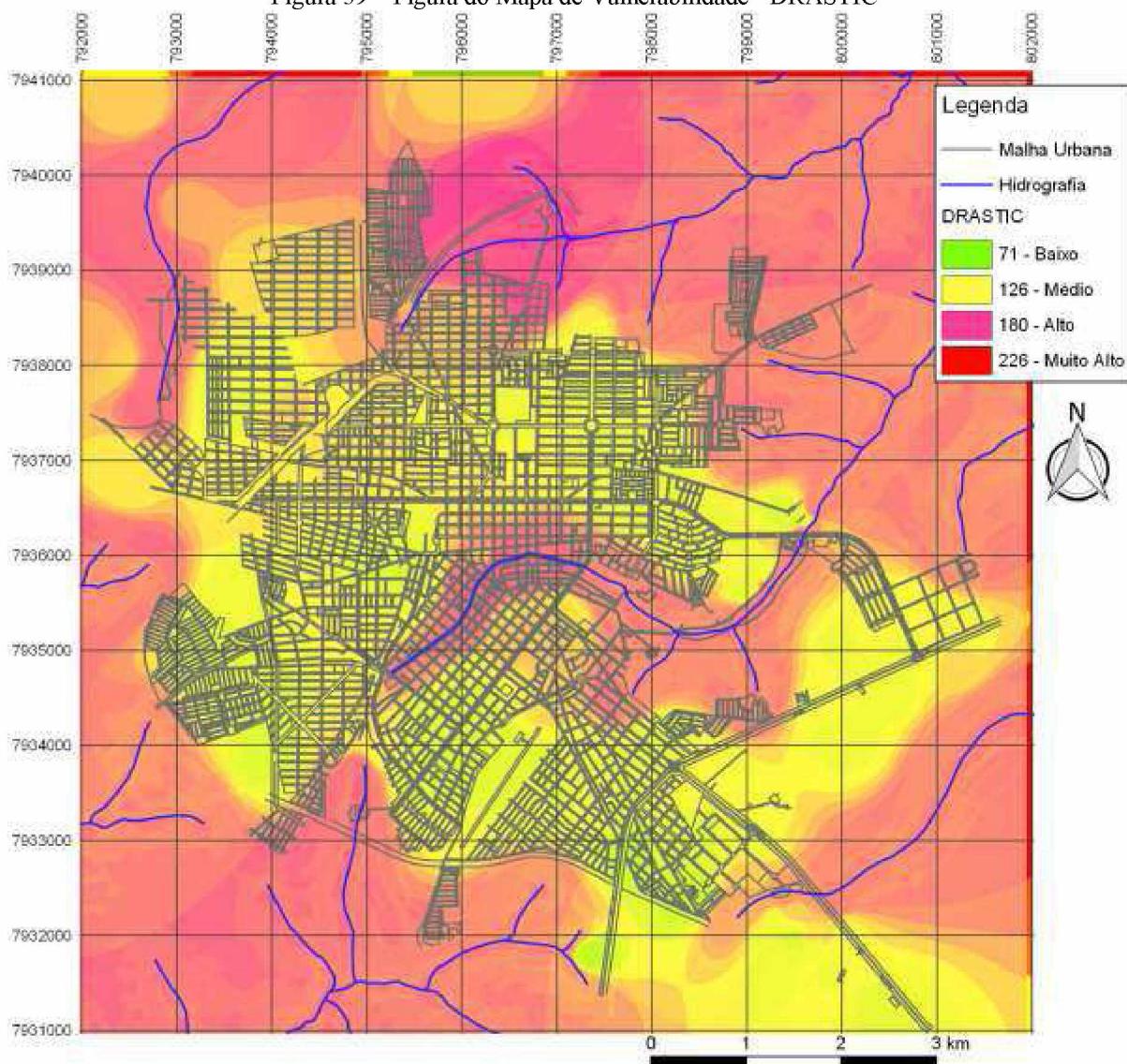
Figura 38 - Interpolação do DRASTIC



Fonte: Autora (2016)

Os valores usados nessa etapa foram aqueles definidos pelo método DRASTIC, segundo a Equação 1. A cada parâmetro foi atribuído um peso e estes foram somados, resultando no mapa de vulnerabilidade do método DRASTIC. A Figura 39 apresenta o resultado dessa sequência de cálculo. Observa-se que os valores variaram da coloração amarelo à rosa, avaliados segundo o DRASTIC em vulnerabilidade baixa a alta, respectivamente. O valor mínimo calculado pelo método foi 113 e o máximo 172 e a maior parte da área de estudo foi classificada em vulnerabilidade média.

Figura 39 – Figura do Mapa de Vulnerabilidade - DRASTIC

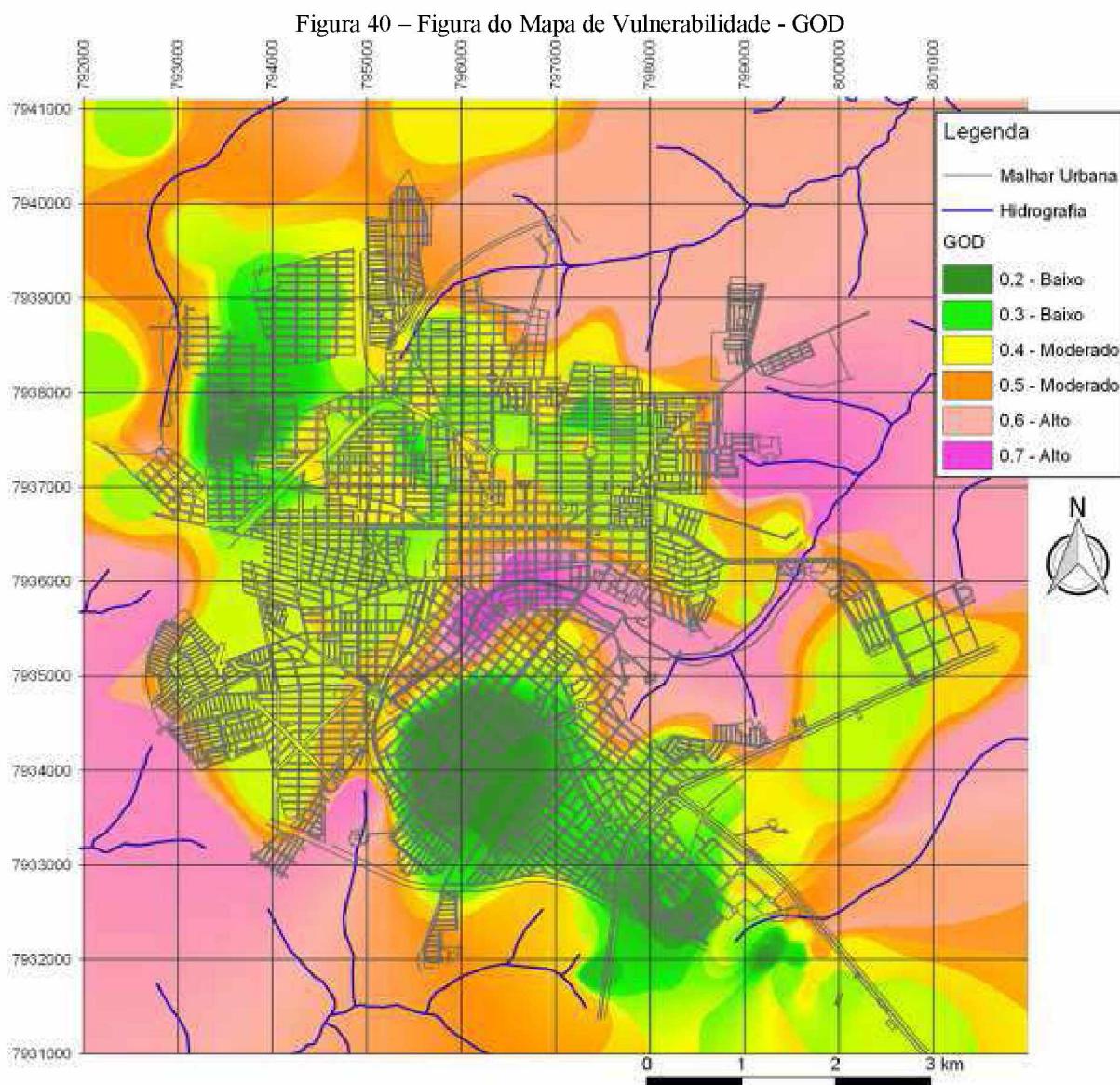


Fonte: Autora (2016)

Pode-se observar nas bordas do mapa uma coloração diferenciada, isso ocorre em todos os dados interpolados em função do efeito de borda. Todos os mapas apresentam alteração nos limites mais externos gerados, alguns com mais intensidade que outros. Isso se deve ao fato de não existirem valores para esses locais, no entanto para minimizar a influência desse efeito nos resultados, foi considerada uma área de estudo maior do que a área de interesse, isto é, a malha urbana do município.

4.1.2. GOD

Foi utilizada a calculadora raster presente no QGIS. Os mapas de profundidade e litologia foram multiplicados e o parâmetro G é constante e igual a 1, portanto esse parâmetro não interferiu no método. O resultado da álgebra de mapas pode ser verificado na Figura 40 que apresenta o resultado desse procedimento, verifica-se um índice de vulnerabilidade baixo a alto.

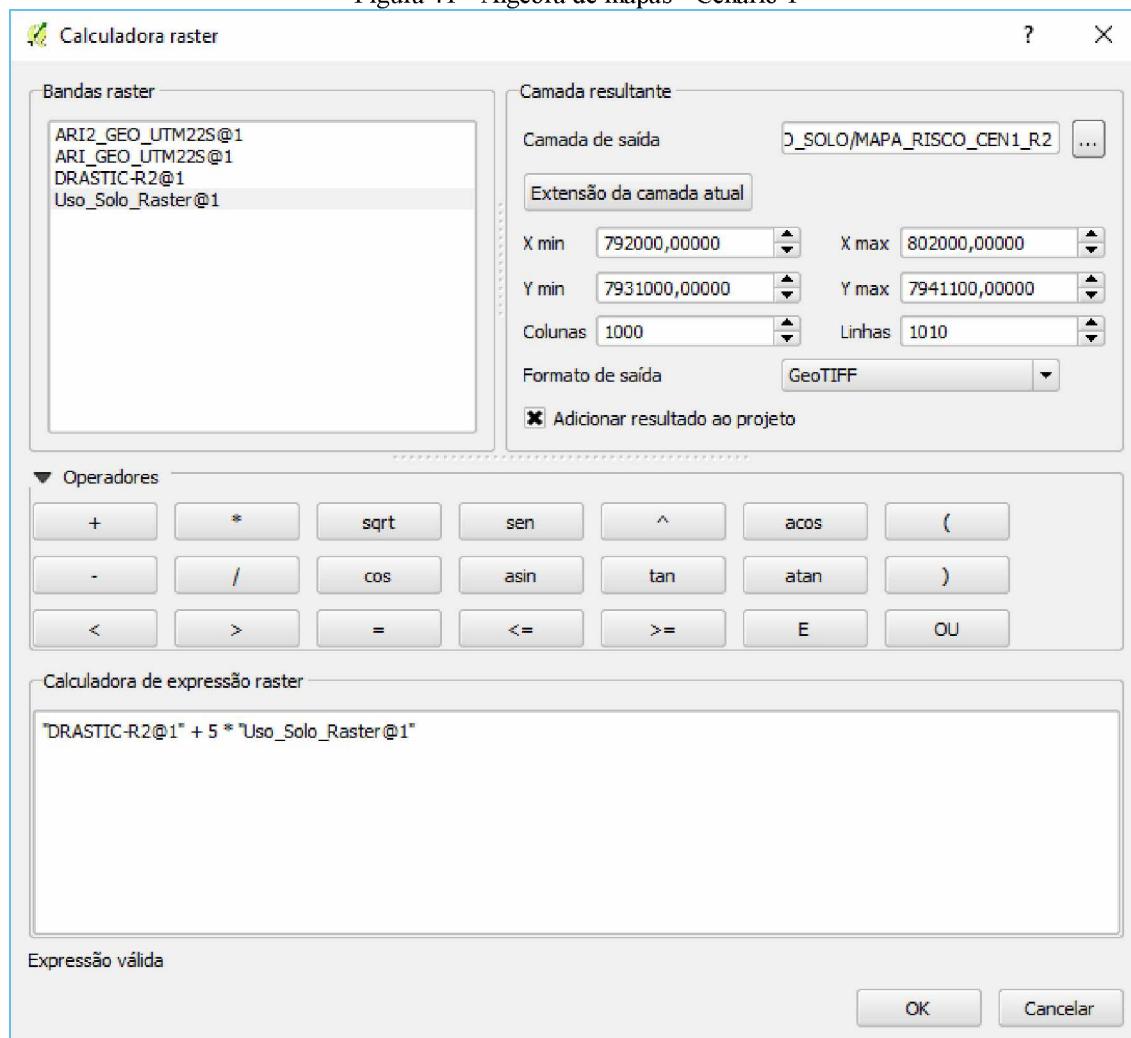


Fonte: Autora (2016)

4.1.3. PRIMEIRO CENÁRIO

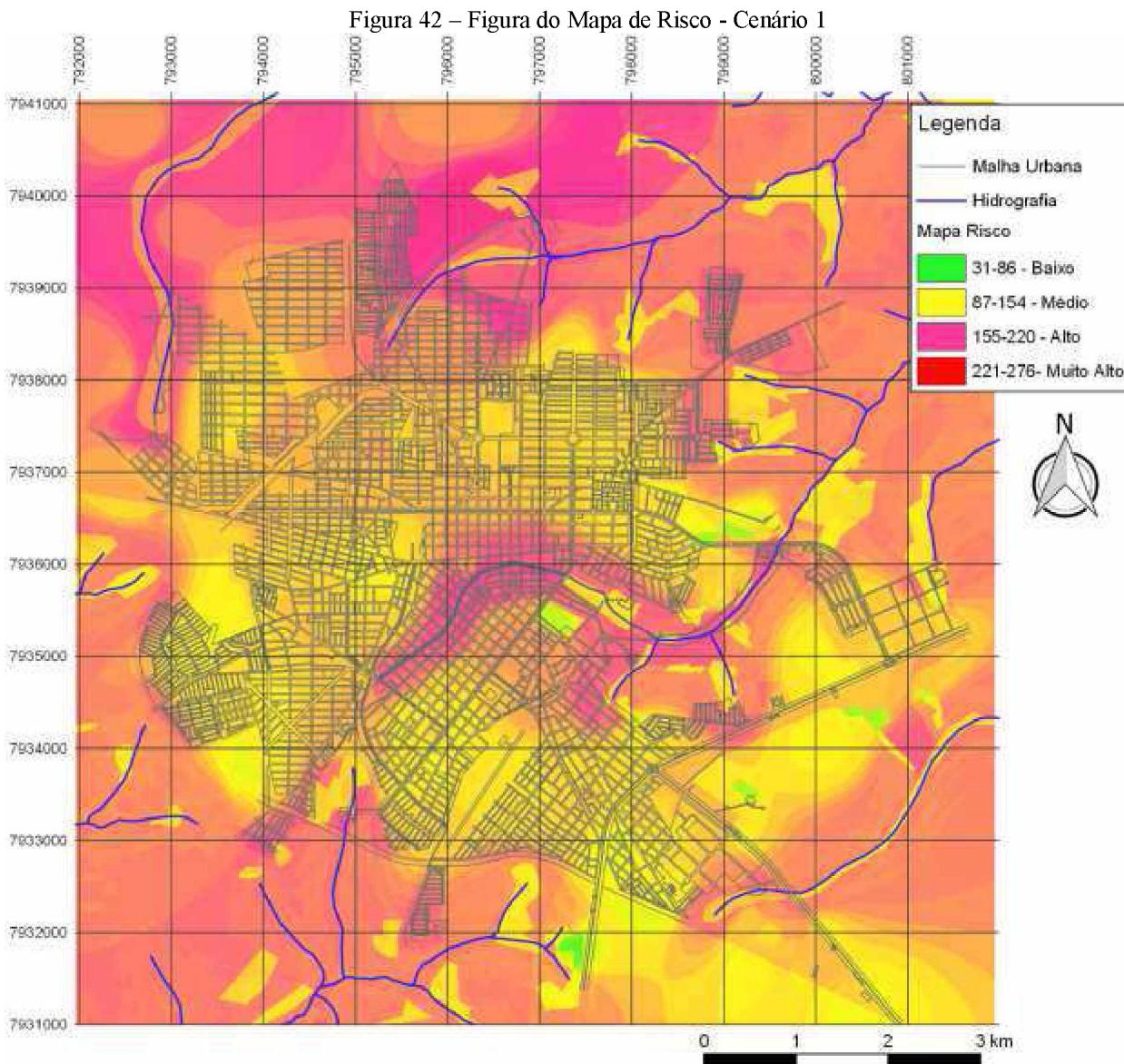
No primeiro cenário foi realizada a aplicação da análise de risco proposta por Al-Adamat, Foster e Baban (2003); Farjad et al. (2012) e Chenini, Zghibi e Kouzana (2015), uma combinação do método DRASTIC com o uso e ocupação do solo. Esse mapa apresenta as regiões de maior chance de poluição em função do tipo de uso da superfície, combinado com a vulnerabilidade intrínseca do aquífero resultante do DRASTIC, determinado por parâmetros inerentes à região e à formação do manancial hídrico. A combinação do mapa resultante do DRASTIC com o uso e ocupação do solo foi realizada conforme Figura 41, que representa a aplicação da Equação 2 na calculadora raster do QGIS.

Figura 41 - Álgebra de mapas - Cenário 1



Fonte: Autora (2016)

A Figura 42 apresenta o mapa de risco previsto para o primeiro cenário. A faixa de valores foi de 104 a 227, indicando uma variação de risco médio a alto em quase toda a área de estudo. Observa-se claramente nesse mapa o efeito de borda, discutido anteriormente.



Fonte: Autora (2016)

Na Figura 42, fica evidenciado pela coloração rósea que as regiões de maior risco estão situadas no entorno dos cursos hídricos e na região da Cabeceira das Araras. Pode-se observar no entorno de alguns cursos hídricos remanescentes de vegetação nativa que resultaram num valor de risco menor do que aqueles trechos sem tal vegetação.

A metodologia usada nessa pesquisa visa auxiliar o tomador de decisão fornecendo subsídios no processo decisório, espera-se que o mapa de risco possa contribuir na escolha e delimitação de áreas que precisam de monitoramento e proteção.

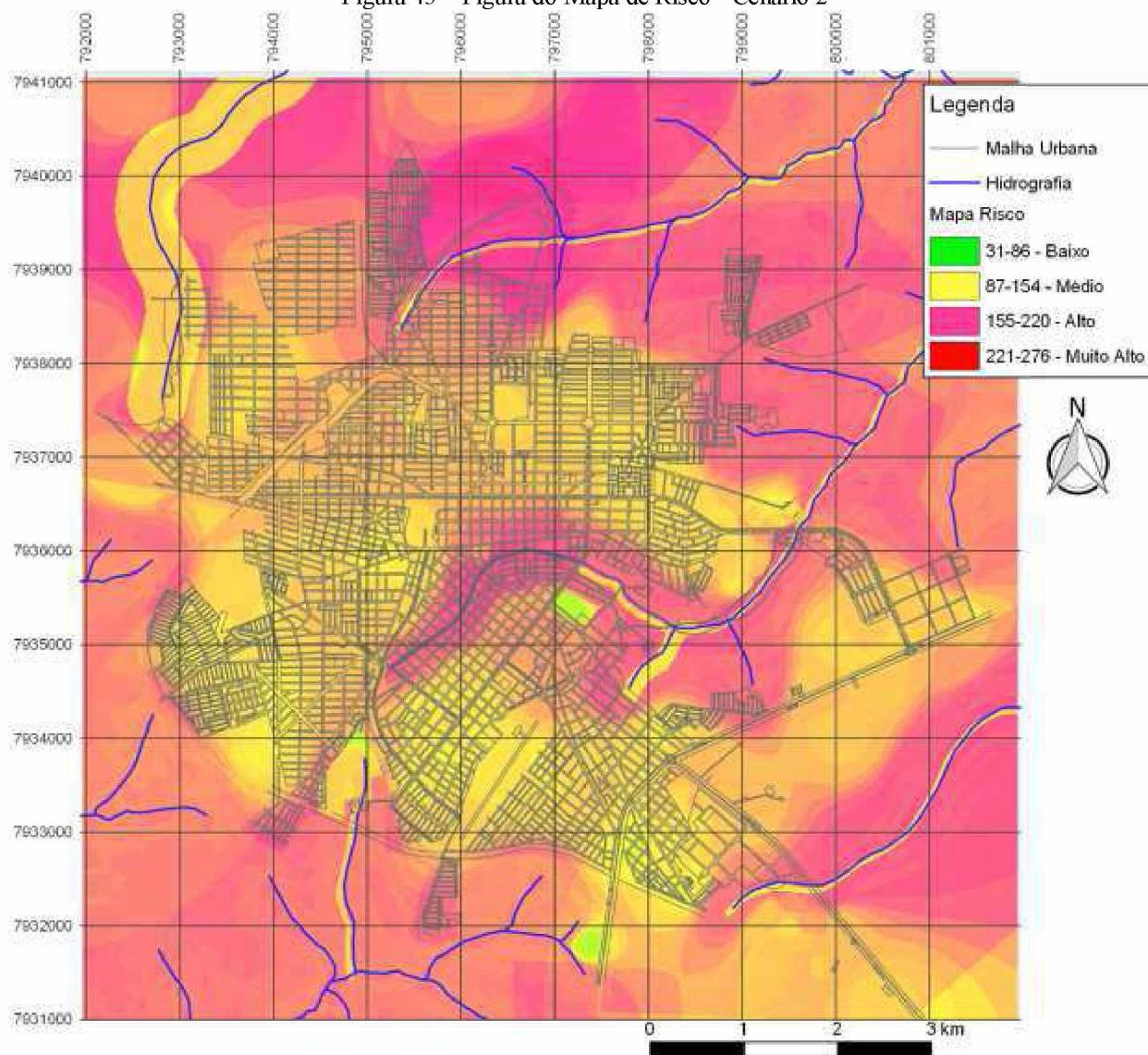
4.1.4. SEGUNDO CENÁRIO

O segundo cenário foi elaborado pela composição do mapa de vulnerabilidade elaborado pelo método DRASTIC e o uso e ocupação do solo futuro, previsto pelo plano diretor, conforme metodologia aplicada por Al-Adamat, Foster e Baban (2003); Farjad et al. (2012) e Chenini, Zghibi e Kouzana (2015).

O resultado desse processo de elaboração do cenário 2 está apresentado na Figura 43. A faixa de valores nesse cenário foi de 126 a 227, correspondendo a um risco que varia de médio a alto em quase toda a área.

O segundo cenário foi proposto na tentativa de vislumbrar áreas que possam estar em desacordo com a expansão prevista pelo Plano Diretor Urbano do Município. Identificação de áreas sensíveis onde futuramente possam ser instaladas empresas com atividades potencialmente poluidoras e que poderão ser a causa de uma poluição da fonte de abastecimento do município. A busca pela identificação dessas áreas propiciou a geração de uma ferramenta capaz de nortear a gestão municipal, de forma técnica, apoiando o processo decisório e visando a manutenção da qualidade da água do Aquífero Bauru em Araguari.

Figura 43 – Figura do Mapa de Risco - Cenário 2



Fonte: Autora (2016)

A não preservação das áreas verdes existentes no município intensifica o incremento no risco de poluição do Aquífero Bauru, no entorno dos córregos tem-se os valores de risco mais altos. No geral, a ampliação da malha urbana sem a preservação das áreas verdes prejudica o Aquífero, o norteador do Plano Diretor do município deve ser o Aquífero Bauru e para que isso ocorra de forma adequada a preservação das áreas de preservação permanente é fundamental.

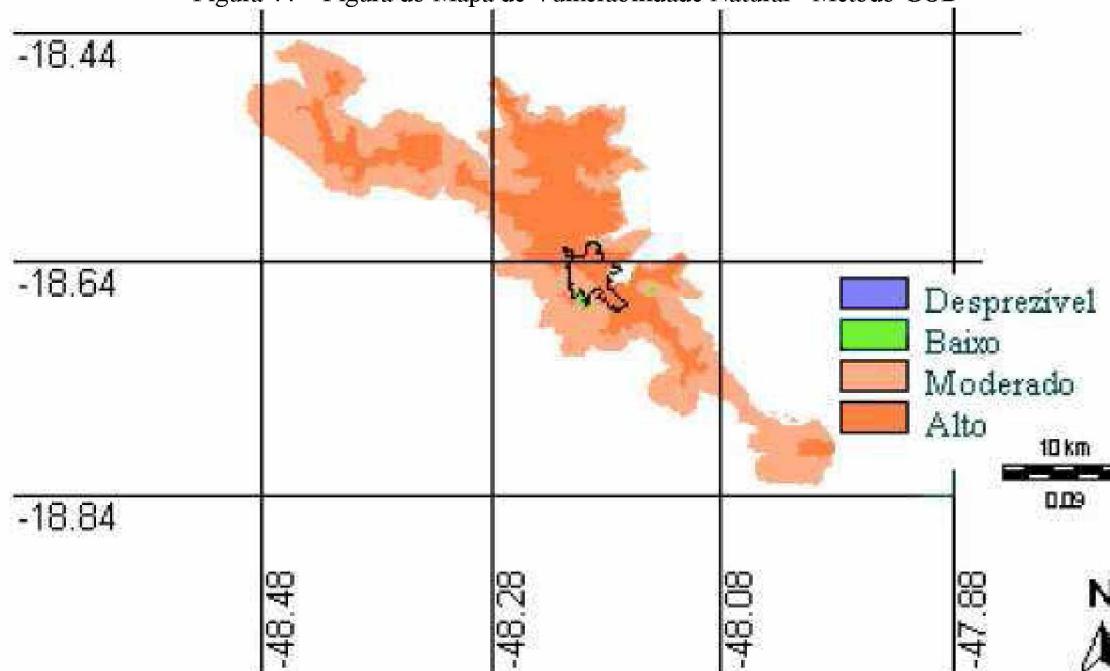
4.2. CONCLUSÕES

4.2.1. COMPARATIVO MÉTODO GOD

Afim de validar o método GOD para avaliação da vulnerabilidade intrínseca aplicado neste trabalho, buscou-se realizar uma análise dos resultados obtidos nessa pesquisa com o resultado obtido por outros autores, na mesma região de interesse. Dentre os autores que utilizaram o método GOD, destacam-se os trabalhos do Fondo de Universidades (2006) e Alamy Filho et al. (2013).

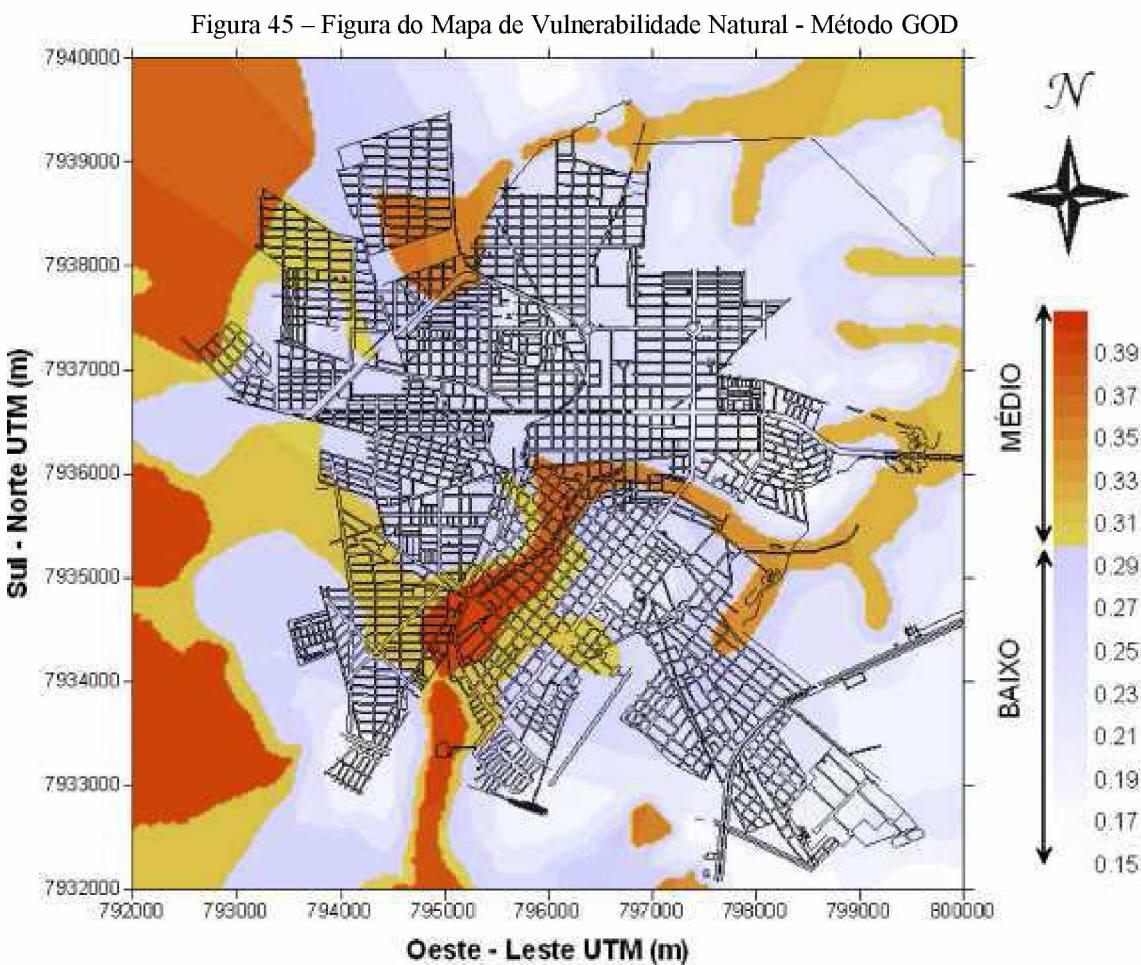
O trabalho realizado pelo Fondo de Universidades (2006), cujo resultado pode ser visto na Figura 44, teve uma área de abrangência maior do que o presente estudo, a despeito da diferença de escala. Ainda assim pode-se observar que o resultado apresenta valores para a vulnerabilidade entre moderado e alto, pequenos pontos apresentaram vulnerabilidade baixa.

Figura 44 – Figura do Mapa de Vulnerabilidade Natural - Método GOD



Fonte: Fondo de Universidades (2006)

O relatório de Alamy Filho et al. (2013) possui uma escala de trabalho que se aproxima do estudo aqui proposto. Os valores encontrados na aplicação do método GOD foi uma vulnerabilidade entre baixo a médio. O resultado do mapa de vulnerabilidade natural pode ser observado na Figura 45.



Fonte: Alamy Filho et al. (2006)

Na Figura 40, que apresenta o resultado do método GOD do presente estudo, podem ser observadas faixas de vulnerabilidade entre 0,2 e 0,7 indicando valores de baixa a alta vulnerabilidade. Os trabalhos não apresentam resultados iguais, ainda assim, percebe-se que, tanto em Alamy Filho et al. (2013) quanto na Figura 40 as regiões mais vulneráveis são aquelas próximas aos cursos hídricos, principalmente pela intercomunicação com o

lençol freático. Comparando com o resultado do Fondo de Universidades (2006) percebe-se que tanto a Figura 40, quanto a Figura 44 apresentaram vulnerabilidade alta.

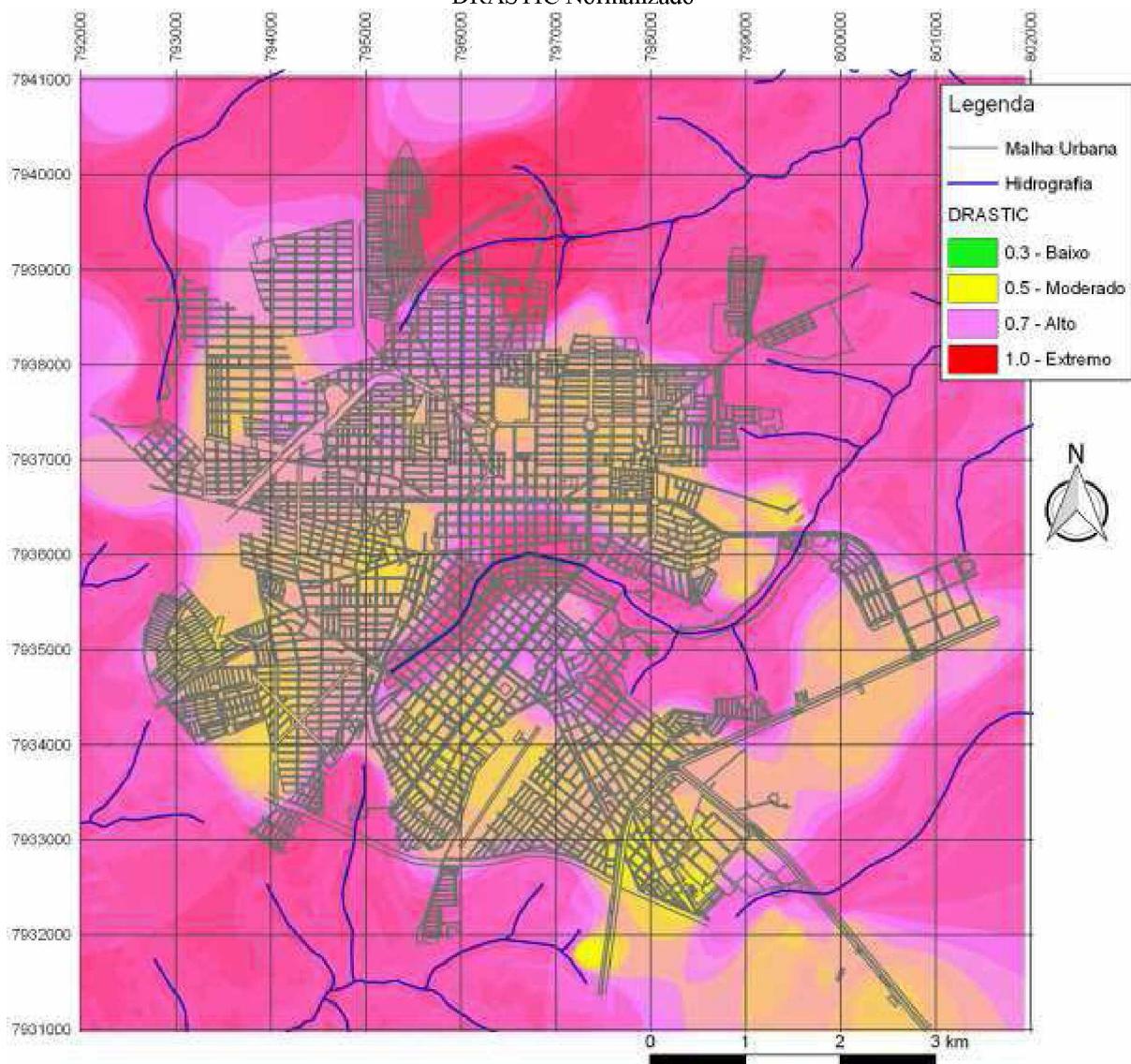
Como a quantidade de pontos amostrais utilizados no presente estudo, na área urbana, é maior do que os trabalhos aqui utilizados como comparativo, acredita-se que isso seja um refinamento da metodologia para avaliação da vulnerabilidade no Aquífero Bauru, na cidade de Araguari, apresentando áreas mais vulneráveis e melhor definidas à medida que mais pontos de dados são acrescentados. Estima-se ainda que a inserção de mais dados nas regiões mais pobres de informação possa contribuir para melhorar o resultado de análise de vulnerabilidade.

4.2.2. COMPARATIVO ENTRE OS MÉTODOS DRASTIC E GOD

Afim de comparar o resultado gerado pelo método DRASTIC com o resultado do método GOD, foi realizado uma normalização dos valores da escala de vulnerabilidade no mapa DRASTIC para que os valores se adequassem às faixas de valores do GOD. O resultado dessa normalização pode ser visto na Figura 46. Na Figura 47 está apresentado o resultado do método GOD, agora com a mesma escala de cores usada no DRASTIC normalizado.

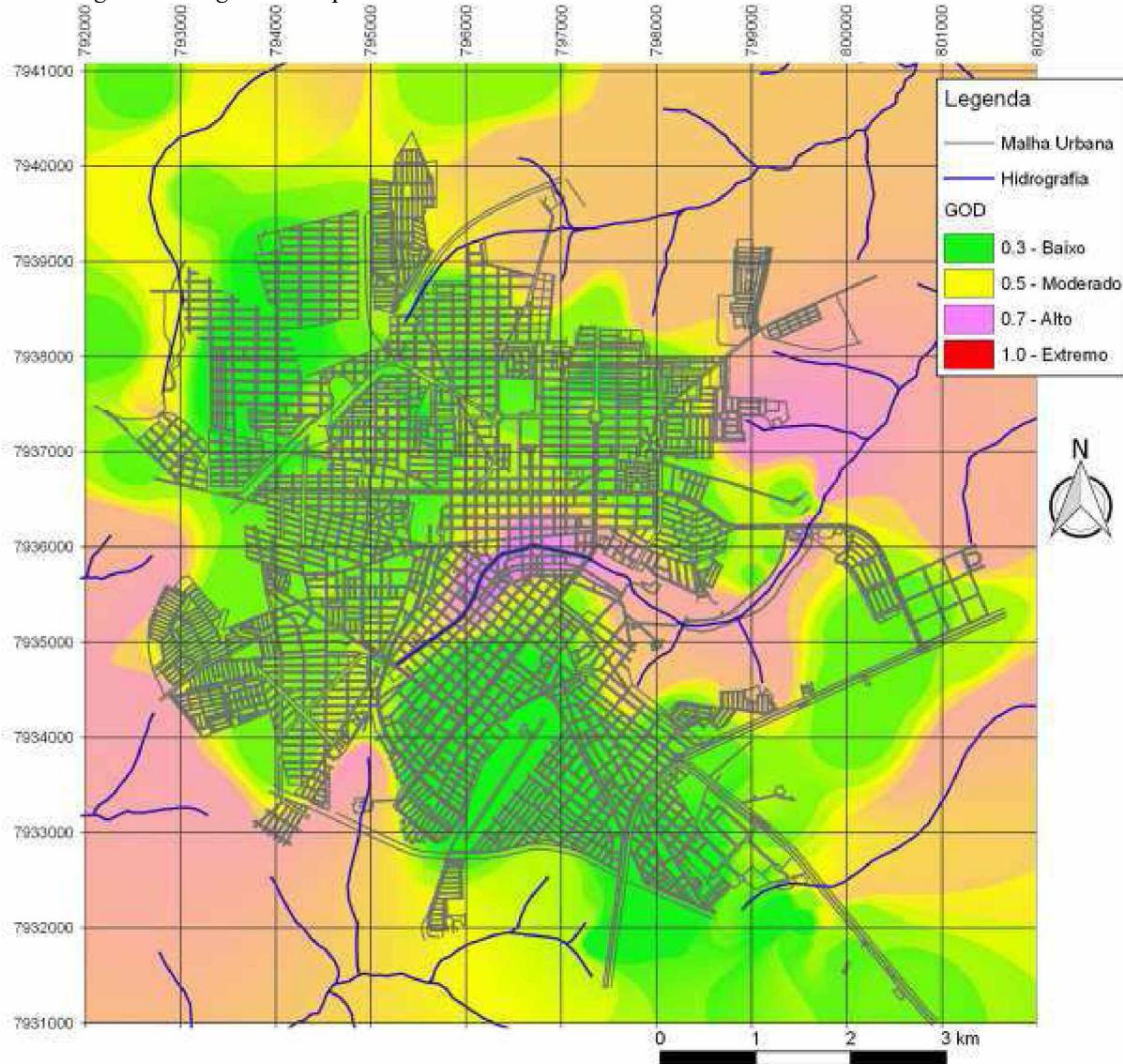
A normalização do método DRASTIC foi realizada considerando equivalentes os valores 0 do método GOD e 26 do DRASTIC, consequentemente tem-se a equivalência dos valores 1 do GOD com 226 do DRASTIC. Os valores intermediários foram definidos por interpolação.

Figura 46 – Figura do Mapa de Vulnerabilidade Intrínseca usando as faixas de valores do GOD - DRASTIC Normalizado



Fonte: Autora (2016)

Figura 47 – Figura do Mapa de Vulnerabilidade Intrínseca GOD usando escala de cores DRASTIC



Fonte: Autora (2016)

Observa-se que os valores índices do DRASTIC normalizado são maiores do que aqueles apresentados no mapa do método GOD, isso fica evidenciado pelo comparativo de áreas da Tabela 17. Enquanto o DRASTIC apresenta 76% da área com vulnerabilidade alta, o método GOD possui 49% evidenciando que o método DRASTIC é mais rigoroso.

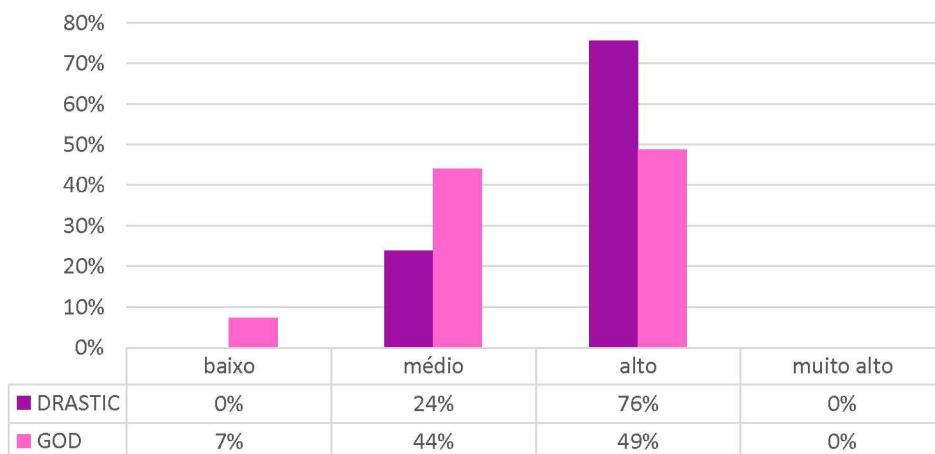
Tabela 17 - Comparativo de áreas DRASTIC x GOD

Vulnerabilidade	DRASTIC (% da área)	GOD (% da área)
Baixo	0%	7%
Médio	24%	44%
Alto	76%	49%
Muito Alto	0%	0%

Fonte: Autora (2016)

A Figura 48 apresenta uma visualização da vulnerabilidade em formato de gráfico para a área total de estudo, 101 km². Os dois métodos não apresentaram vulnerabilidade muito alta e apenas o GOD apresentou 7% da área com vulnerabilidade baixa. O método GOD apresentou equivalência entre as vulnerabilidades média e alta, 44 e 49% respectivamente, o DRASTIC apresentou 24% da área com vulnerabilidade média.

Figura 48 - Comparativo método DRASTIC x GOD



Fonte: Autora (2016)

Ainda que os métodos sejam diferentes, pode-se visualizar regiões mais vulneráveis que são correspondentes nos dois mapas, como as áreas no entorno dos córregos que representam regiões mais vulneráveis. O método DRASTIC apresentou valores maiores e, quando se compara a dificuldade de implementação do método DRASTIC em relação ao resultado com regiões mais vulneráveis, acredita-se que a complexidade do modelo seja recompensada pelo resultado.

Buscando validar e comparar os resultados obtidos pelos métodos DRASTIC e GOD, está apresentado na Figura 6 um comparativo entre três métodos, realizado por Alamy Filho et al. (2013). Nesse comparativo, pode-se observar que o resultado do método Híbrido apresenta maior quantidade de áreas vulneráveis e os métodos GOD e EKv apresentaram picos de vulnerabilidade, atingindo maiores valores nas regiões próximas aos cursos hídricos. O método híbrido é o que mais se aproxima dos resultados apresentados no presente estudo, em função da faixa de áreas vulneráveis. Ainda assim, o método DRASTIC atingiu maiores valores quando comparado com os demais.

4.2.3. AVALIAÇÃO DOS CENÁRIOS

Foram elaborados dois cenários que evidenciam o risco de poluição do Aquífero Bauru na malha urbana de Araguari, cujos resultados desses mapas estão apresentados na Figura 42 e Figura 43. O aumento do risco no cenário 2, elaborado a partir do mapa de expansão previsto do PDU, pode ser observado pela mudança da coloração que deixou de ser amarela, portanto, mais amena, e passou a ser mais rosada com maior risco. A principal mudança pode ser observada na supressão das áreas verdes hoje existentes no entorno da malha urbana, pois com a redução dessas áreas, o risco aumenta. Pode-se observar o contrário, o benefício da vegetação quando preservada. O mapa do plano diretor prevê área verde no entorno dos córregos, isso não retrata a situação atual, com áreas de preservação permanente pouco significativas, mas a implementação dessas áreas reduz o risco à poluição.

A Tabela 18 apresenta um comparativo percentual das áreas de risco entre os dois cenários e retratam a equivalência entre ambos. O primeiro cenário apresentou 96% da área com risco alto de poluição e o segundo 97%. Apesar do cenário 2 apresentar área urbanizada maior, a inclusão das áreas verdes no entorno dos córregos manteve o risco praticamente constante. Temos então que se a expansão prevista no PDU ocorrer sem a devida preservação das áreas de preservação permanente ao invés de manter o risco, no futuro este será maior.

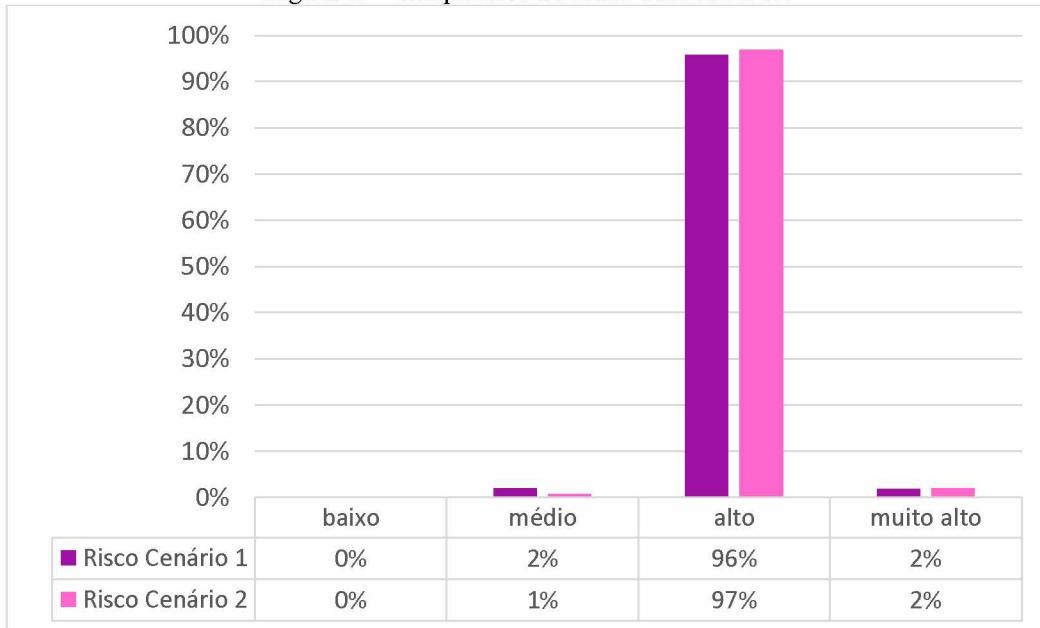
Tabela 18 - Comparativo de áreas de Risco dos Cenários 1 e 2

Risco	Cenário 1	Cenário 2
Baixo	0%	0%
Médio	2%	1%
Alto	96%	97%
Muito Alto	2%	2%

Fonte: Autora (2016)

A Figura 49 apresenta o risco em formato de gráfico, no qual o percentual de risco médio e muito alto foram de 2% no primeiro cenário e 1 e 2% respectivamente no segundo cenário. Percebe-se um acréscimo de aproximadamente 20% em relação à vulnerabilidade intrínseca do método DRASTIC que possui 76% da área de estudo com vulnerabilidade alta, Tabela 17 e Figura 47. Isso indica que a utilização da superfície atual e futura implica em acréscimo de risco ao aquífero, a vulnerabilidade específica apresentou valores mais altos que a vulnerabilidade intrínseca em aproximadamente 20% da área de estudo.

Figura 49 - Comparativo de Risco Cenários 1 e 2

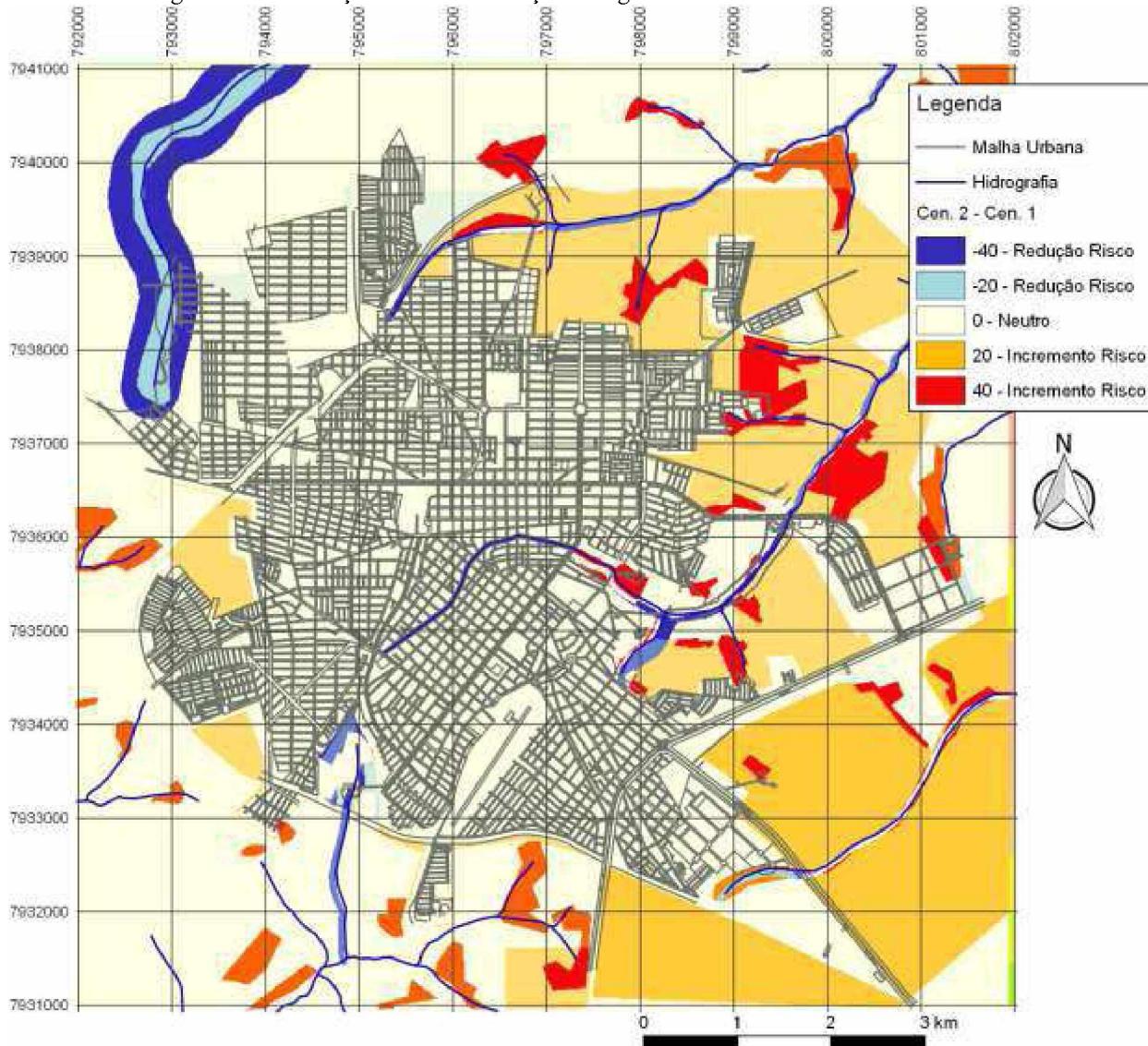


Fonte: Autora (2016)

Com intuito de melhorar a visualização das diferenças entre esses os dois cenários, apresenta-se na Figura 50 a diferença entre o cenário 2 e o cenário 1. Em vermelho pode-se observar a região que teve piora do risco entre os cenários, ou seja, houve um acréscimo

de risco em 40 pontos no índice de risco, correspondendo à supressão das áreas verdes, em azul tem-se o que reduziu o risco, ou seja houve uma melhora do índice de risco entre os cenários 1 e 2 em 40 pontos, resultado do aumento das áreas verdes no entorno dos córregos. Ainda se vê que o aumento da região urbana e da região industrial acarretam acréscimo de risco nessas áreas.

Figura 50 - Diferença de Risco à Poluição da Água Subterrânea entre Cenário 2 e Cenário 1



Fonte: Autora (2016)

O mapa da Figura 50 representa numericamente a melhora ou piora entre os cenários propostos pelo estudo, indicados por incremento ou redução no risco de forma quantitativa. O resultado futuro é o cenário 2 portanto foi usado como referência e dele foi realizada a subtração, pixel a pixel, dos valores gerados pelo cenário 1. Os valores

negativos que foram expressos com a coloração azul escura e clara representam uma redução do valor final do risco, portanto uma melhora no cenário de poluição. Os valores positivos, apresentados em laranja e vermelho, representam um acréscimo no valor final do risco, implicando em um maior risco à poluição da água subterrânea para essas regiões. Parte da área de estudo se manteve constante entre um cenário e outro, não apresentando melhora nem piora com relação ao risco, essas áreas foram classificadas em neutras.

A região onde observa-se um acréscimo do risco é resultado da supressão das áreas verdes hoje existentes no município não previstas no PDU, além da expansão do setor residencial e industrial. A redução do risco se deu como resultado da implementação de áreas verdes nas áreas de preservação permanente dos córregos. Pode-se observar que a quantidade de área que sofreu piora, regiões em laranja e vermelho, é maior do que a de melhora, regiões em azul.

A Tabela 19 apresenta os percentuais da área conforme Figura 50, um total de 4% da área de estudo teve melhora numa proposta de implementação do Cenário 2 em detrimento do Cenário 1 e 28% sofreu piora com a implantação desse futuro cenário. As áreas verdes geram redução do risco enquanto a ampliação dos setores comercial e industrial oferecem acréscimo de risco ao aquífero.

Tabela 19 – Relação da área em relação à situação da diferença entre o Cenário 2 e Cenário 1

Situação	Área
Redução Risco em 40 pontos	2%
Redução Risco em 20 pontos	2%
Neutro	68%
Incremento Risco em 20 pontos	22%
Incremento Risco em 40 pontos	6%

Fonte: Autora (2016)

4.2.4. CONCLUSÕES

Logicamente, não se deve impedir o desenvolvimento do município em detrimento do risco ao aquífero, mas é interessante evitar que esse crescimento atinja áreas propensas à poluição, como o entorno dos córregos. Aliado a isso é importante o tratamento do esgoto

gerado pelo município e criação de áreas verdes que propiciem redução de risco nas áreas mais suscetíveis de poluição. A manutenção das áreas verdes hoje existentes já propicia um equilíbrio, não implicando um maior risco ao aquífero, o Plano Diretor deve incorporar essas áreas e transformá-las em áreas de ocupação restrita.

No presente estudo foram avaliados dois modelos de vulnerabilidade intrínseca, métodos DRASTIC e GOD, o primeiro é mais complexo e difícil de ser implementado por haver a necessidade de 7 parâmetros, o segundo é mais prático em termos de número de dados a serem obtidos. Apesar da dificuldade de elaboração, o primeiro se mostrou mais rigoroso em termos de resultados, apresentando uma maior vulnerabilidade. Dependendo da área de estudo o primeiro modelo pode se tornar um empecilho, no entanto, na área aqui abordada a disponibilidade de dados é relativamente facilitada pela quantidade de poços perfurados e em funcionamento. Recomenda-se, sempre que possível, a utilização do método DRASTIC em detrimento do GOD.

Ainda relativo ao estudo aqui observado, foram realizadas duas análises de risco, evidenciadas por dois cenários que utilizaram o resultado do método DRASTIC associados ao uso e ocupação do solo atual e futuro. O primeiro cenário utilizou o uso e ocupação do solo atual, resultando no risco de poluição atual do aquífero; já o segundo cenário utilizou o uso e ocupação do solo previsto no PDU, resultando em um risco futuro. Nesses dois cenários avaliados, observou-se uma grande importância das áreas verdes principalmente nas áreas de preservação permanente, estas se apresentam esparsas e mal preservadas no cenário atual, mas previstas de serem recuperadas no cenário futuro trazem uma expectativa de redução do risco à poluição do aquífero Bauru. No cenário futuro observou-se também um aumento do risco em função da expansão das áreas residenciais e industriais.

É fundamental o reconhecimento por parte dos órgãos municipais em Araguari da importância do Aquífero Bauru para o município, todo o desenvolvimento e manutenção das atividades dependem desse manancial. Planos de proteção e recuperação de áreas verdes são interessantes para reduzir o risco de poluição do aquífero, principalmente num cenário futuro de expansão das áreas residenciais e industriais.

É recomendável a implementação do projeto do parque linear que prevê a revitalização e preservação do córrego Brejo Alegre. Projeto elaborado já há vários anos e ainda não executado. Aconselha-se ainda a execução da estação de tratamento de esgoto, projeto também já existente e não executado, com estimativa de implantação próximo ao aterro sanitário, isso melhoraria a qualidade da água do córrego Brejo Alegre que atualmente recebe esgoto sem tratamento. Monitorar e garantir o funcionamento adequado das estações de tratamento do Distrito Industrial, Bairro Novo Horizonte e Bairro São Sebastião, garantindo assim a manutenção dos cursos hídricos nessas regiões.

Recomenda-se a criação de áreas verdes no processo de expansão do município e preservação das praças existentes. Fica evidente nos resultados que é grande a amenização do risco em função da existência de áreas com vegetação preservada. A região do córrego Araras é bem desprovida de áreas verdes e apresenta-se em todos os resultados como área mais crítica da região de estudo. Destaca-se a importância de implantação das áreas de preservação permanente prevista no mapa de expansão do PDU.

Nos modelos utilizados a metodologia se apresenta com parâmetros bem definidos e delimitados, isso facilita a implementação dos modelos e padroniza os resultados para estudos comparativos. No entanto, cada área de estudo é única e, portanto, cada uma deveria ter esses parâmetros reavaliados para melhor se adequar à área de estudo.

Outro ponto importante da metodologia estudada nesta pesquisa é que esta apresenta um caráter mais generalista, não avaliando um poluente específico. Considera-se importante o resultado mais ampliado pois este facilita a delimitação de áreas que devam ser objeto de exploração mais pontual, norteando trabalhos de estudo e preservação, além de possibilitar o auxílio no processo de expansão e gerenciamento do risco no município. A partir dos resultados aqui apresentados, tem-se que as áreas no entorno dos córregos devam ser objeto de estudos constantes por se tratarem de áreas mais sensíveis à poluição. Nesse aspecto destaca-se o Córrego Brejo Alegre que recebe a maior parte do esgoto doméstico da cidade sem tratamento.

Por fim, é importante visar a manutenção do lençol freático e a qualidade do manancial na legislação que norteia o crescimento da cidade. O PDU deve ser guiado pela existência

e importância do aquífero, recomenda-se assim, a revisão do PDU inserindo como fator determinante a vulnerabilidade e o risco do Aquífero Bauru na região de Araguari.

4.2.5. TRABALHOS FUTUROS

Nesta área de pesquisa não existem conclusões definitivas, por isso, em todo trabalho que envolva aspectos dinâmicos como o crescimento de uma cidade, este sempre estará sujeito a melhorias e mudanças. O presente estudo se insere em uma pequena parcela de pesquisa na área de vulnerabilidade e risco à poluição de um aquífero livre e raso sotoposto à malha urbana.

Vislumbrando futuros trabalhos que possam se originar dessa pesquisa e dos dados aqui coletados, estão listados abaixo alguns problemas e dificuldades que foram encontrados ao longo desse estudo:

- Identificar e monitorar o consumo de água dos poços usados para abastecimento urbano, nem todos os poços possuem hidrômetros e nem todos os poços usados pela SAE estão localizados no banco de dados da superintendência;
- Identificar os poços que estão com processo de outorga junto ao IGAM para melhorar os dados de poços, realizar o monitoramento desses, ainda que anualmente;
- Dentre os parâmetros usados, aqueles que apresentaram mais problemas, foram os de solos, aparentemente valores muito constantes. Seria necessário um estudo mais aprofundado com acompanhamento de perfuração de poços no município ou perfuração de pontos de sondagem e monitoramento visando a melhoria dos dados que se apresentaram muito similares entre si;
- A análise de sensibilidade do método DRASTIC proposta por Farjad et al. (2012) poderia resultar em pesos diferentes do proposto pela metodologia e consequentemente poderiam ocorrer outros resultados de vulnerabilidade e risco em relação aos apresentados por este trabalho;

- Considerando o resultado de risco, as regiões próximas aos cursos hídricos merecem monitoramento. Uma análise de fluxo de poluição nessas regiões, considerando poluentes pontuais, como postos de combustíveis, poderá servir como previsão à poluição futura.

CAPÍTULO 5

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABAS. **Aqüífero Guarani:** Educação Ambiental para a sua preservação na região do Planalto dos Guimarães. [S.l.]: ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE ÁGUAS SUBTERRÂNEAS, 2007.

ADIAT, K. A. N.; NAWAWI, M. N. M.; ABDULLAH, K. Assessing the accuracy of GIS-based elementary multi criteria decision analysis as a spatial prediction tool - A case of predicting potential zones of sustainable groundwater resources. **Journal of Hydrology**, 29 Março 2012. 75-89.

AL-ADAMAT, R. A. N.; FOSTER, I. D. L.; BABAN, S. M. J. Groundwater vulnerability and risk mapping for the Basaltic aquifer of the Azraq basin of Jordan using GIS, Remote sensing and DRASTIC. **Science Direct**, 6 Agosto 2003. 303-324.

ALAMY FILHO, J. E. et al. **Monitoramento do Aquífero Bauru na Zona Urbana de Araguari/MG: da obtenção de dados primários à simulação numérica do escoamento das águas subterrâneas.** Universidade Federal de Uberlândia. Uberlândia, p. 230. 2013. (PROJETO FAPEMIG PROCESSO APQ-00878-09).

ALAMY FILHO, J. E.; BORGES, E. H. C.; OLIVEIRA, A. L. D. Diagnóstico da qualidade da água do Aquífero Bauru na área urbana de Araguari, MG. **Ciência e Engenharia**, Uberlândia, 2013. 125-135.

ALAMY FILHO, J. E.; SEGANTINI, D. O. Mapeamento do sistema Aquífero Bauru subjacente à cidade de Araguari, MG. **XVI Congresso Brasileiro de Águas Subterrâneas e XVII Encontro Nacional de Perfuradores de Poços**, 2010.

ALAMY FILHO, J. E.; SEGANTINI, D. O. Um modelo híbrido para simulação de escoamento em aquíferos situados em zonas urbanas. **XXIV Congreso Latinoamericano de Hidráulica**, Punta del Este, 2010. 139-151.

AMHARREF, M.; BERNOUSSI, A. S. Vulnérabilité et risque de pollution des eaux souterraines. **Actes des JSIRAU**, Hanoi, 6-9 Novembro 2007. 10.

AUGE, M. **Vulnerabilidad de Acuíferos:** Conceptos y Métodos. Buenos Aires: Universidad de Buenos Aires, 2004.

BARROS, J. G. D. C. Rema Brasil, 2008. Disponível em: <<http://remabrasil.org:8080/virtual/r/remaatlantico.org/sul/Members/suassuna/campanh>

as/as-aguas-subterraneas-ou-as-aguas-que-brotam-das-pedras>. Acesso em: 25 Março 2015.

BATISTA, M. E. M. **Desenvolvimento de um Sistema de Apoio à Decisão para Gestão Urbana Baseado em Indicadores Ambientais**. Dissertação de Mestrado. ed. João Pessoa: Universidade Federal da Paraíba, 2005.

BERTOL, G. A. **Avaliação da Recarga Anual no Aquífero Bauru no município de Araguari, MG**. Dissertação de Mestrado. ed. Belo Horizonte: Universidade Federal de Minas Gerais, 2007.

CAPUCCI, E. et al. **Poços Tubulares e Outras Captações de Águas Subterrâneas**. Rio de Janeiro: Departamento de Recursos Minerais do Estado do Rio de Janeiro, 2001.

CHENINI, I.; ZGHIBI, A.; KOUZANA, L. Hydrogeological investigations and groundwater vulnerability assessment and mapping for groundwater resource protection and management: State of the art and a case study. **Journal of African Earth Sciences**, p. 11-26, Maio 2015. ISSN doi 10.1016/j.jafrearsci.2015.05.008.

CLEARY, R. W. **Águas Subterrâneas**. [S.l.]: Associação Brasileira de Recursos Hídricos - ABRH, 1989.

COTA, S. et al. Simulação matemática de fluxo de água subterrânea do Aquífero Bauru no município de Araguari, MG. **XVII Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos**, 2007.

CPRM. **Sistema Aquífero Bauru-Caiuá no Estado de Minas Gerais: Bacia Sedimentar do Paraná**. Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais. Belo Horizonte, p. 35. 2012.

DEPARTMENT OF GEOGRAPHY. Disponível em: <<http://www.geo.hunter.cuny.edu/aierulli/gis2/lectures/lecture5/boo.gif>>. Acesso em: 31 Agosto 2015.

FARJAD, B. et al. Groundwater intrinsic vulnerability and risk mapping. **Institution of Civil Engineers Publishing**, v. 165, p. 441-450, Janeiro 2012. ISSN doi 10.1680/wama.10.00018.

FONDO DE UNIVERSIDADES. **Avaliação dos recursos hídricos do Sistema Aquífero Guarani no município de Araguari, MG**. Universidade Federal de Minas Gerais. Belo Horizonte, p. 326. 2006.

FOSTER, S. S. D.; HIRATA, R. C.; ROCHA, G. A. Riscos de poluição de águas subterrâneas: uma proposta metodológica de avaliação regional. **Anais do 5º Congresso Brasileiro de Águas Subterrâneas**, São Paulo, 1988. 175-185.

GIBOSHI, M. L.; RODRIGUES, L. H. A.; NETO, F. L. Sistema de suporte à decisão para recomendação de uso e manejo da terra. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 10, n. 4, p. 861-866, 2006.

GIS PRIMER. Disponível em: <<http://gis.nic.in/gisprimer/images/vector.gif>>. Acesso em: 31 Agosto 2015.

GONÇALVES, T. D. **Geoprocessamento como Ferramenta de Apoio à Gestão dos Recursos Hídricos Subterrâneos do Distrito Federal**. Dissertação de Mestrado. ed. Brasília: Instituto de Geociências, 2007.

GOOGLE EARTH. Disponível em: <<https://www.google.com/earth/>>. Acesso em: 7 Setembro 2015.

IBGE. Disponível em: <<http://cidades.ibge.gov.br/xtras/perfil.php?codmun=310350>>. Acesso em: 31 Agosto 2015.

JUNIOR, H. R. D. M. **Método DRASTIC**: Uma proposta de Escala para Normatização dos Índices Finais de Vulnerabilidade. XV Congresso Brasileiro de Águas Subterrâneas. Natal: [s.n.], 2008.

LONGLEY, P. A. et al. **Sistemas e Ciência da Informação Geográfica**. 3^a. ed. Porto Alegre: Bookman, 2013.

MALCZEWSKI, J. **GIS and Multicriteria Decision Analysis**. [S.l.]: Jhon Wiley & Sons, 1999.

MALCZEWSKI, J.; RINNER, C. **Multicriteria Decision Analysis in Geographic Information Science**. New York: Springer, 2015.

MARDHEL, V.; PINSON, S. **Analyse de la Vulnérabilité intrinsèque des eaux souterraines autour des sites BASOL du bassin Adour-Garonne**. Ministère de l'Énergie, de l'Énergie, du Développement durable et de l'Aménagement du territoire. Paris, p. 86. 2008.

MINARDI, P. S. P. et al. Técnicas isotópicas aplicadas em estudos hidrogeológicos no município de Araguari, MG. **XV Congresso Brasileiro de Águas Subterrâneas**, 2008.

MIRANDA, D. S. et al. Uso de Sistemas de Informação Geográfica (SIG) na modelagem da vulnerabilidade de aquífero livre: comparação entre os métodos GOD e EKV na bacia do Rio Coxim, São Gabriel do Oeste, MS, Brasil. **Geociências - UNESP**, São Paulo, 2015. 312-322.

MIRANDA, M. C. **Modelagem e Simulação do Escoamento em Aquíferos Livres Sotopostos a Zonas Urbanas**. Universidade Federal de Uberlândia. Uberlândia, p. 106. 2012.

MMA. **Águas Subterrâneas**: Um recurso a ser conhecido e protegido. Contrato 6000.0027020.06.2. ed. Brasília: Ministério do Meio Ambiente, 2007.

OLEAGA, A.; PACHECO, F.; FELLER, M. **Projeto para Proteção Ambiental e Desenvolvimento Sustentável do Sistema Aquífero Guarani**. Consórcio Guarani. [S.l.], p. 92. 2009.

- OLIVEIRA, L. A. D.; CAMPOS, J. E. G. Sequencia conglomeratica do membro Araguari - Grupo Bauru - norte do triângulo mineiro. **Geociências - UNESP**, São Paulo, 2003. 43-51.
- OLIVEIRA, L. A. D.; CAMPOS, J. E. G. Parâmetros Hidrogeológicos dos Sistema Aquífero Bauru na Região de Araguari/MG: Fundamentos para a Gestão do Sistema de Abastecimento de Água. **Revista Brasileira de Geociências**, v. 34, p. 213-218, Junho 2004.
- PMA. **Lei Complementar 034/04:** Plano Diretor de Desenvolvimento Urbano. Araguari: Prefeitura Municipal de Araguari, 2004.
- PREFEITURA MUNICIPAL DE ARAGUARI. **Lei complementar 034/04.** Araguari, p. 53. 2004.
- RODRIGUES, L. M. C. **População, Projeção e Gestão dos Recursos Hídricos:** Uma Metodologia de Informação Geográfica para o Apoio à Decisão. Tese de Doutorado. ed. Lisboa: Universidade Nova de Lisboa, 2012.
- ROMANO, A. W.; PAIVA, C. T. **Relatório Hidrogeológico SAE.** Araguari. 2001.
- ROSA, R.; BRITO, J. L. S. **Introdução ao Geoprocessamento:** Sistema de Informação Geográfica. Uberlândia: Edufu, 1996.
- RUFINO, I. A. A. **Gestão de Recursos Hídricos em Ambientes Urbanos Costeiros:** Modelagem e Representação do Conhecimento em Sistemas de Informação Geográfica. Tese de Doutorado. ed. Campina Grande: UFCG, 2004.
- SAE. Disponível em: <<http://www.saearaguari.com.br/2013/relatorios.php>>. Acesso em: 31 Agosto 2015.
- SCHMIDT, M. A. R. **Sistemas de Informações Geográficas:** Introdução e Aplicação em Recursos Hídricos. Notas de Aula. ed. Uberlândia: Universidade Federal de Uberlândia, 2013.
- SEGANTINI, M. D. O. **Mapeamento do Aquífero Bauru situado sob a zona urbana de Araguari, MG.** Dissertação de Mestrado. ed. Uberlândia: Universidade Federal de Uberlândia, 2010.
- SIMÃO, A. C. R. **Planeamento e Gestão de Sistemas de Abastecimento de Água com Recurso à Tecnologia dos SIG.** Dissertação de Mestrado. ed. Coimbra: Faculdade de Ciências de Tecnologia, 2000.
- SOUZA, N. A. D. **Vulnerabilidade à poluição das águas subterrâneas - Um estudo do aquífero Bauru na zona urbana de Araguari, MG.** Dissertação de Mestrado. ed. Uberlândia: UFU, 2009.
- STANFORD UNIVERSITY LIBRARIES. Disponível em: <https://lib.stanford.edu/files/u2966/GIS_layers.jpg>. Acesso em: 31 Agosto 2015.

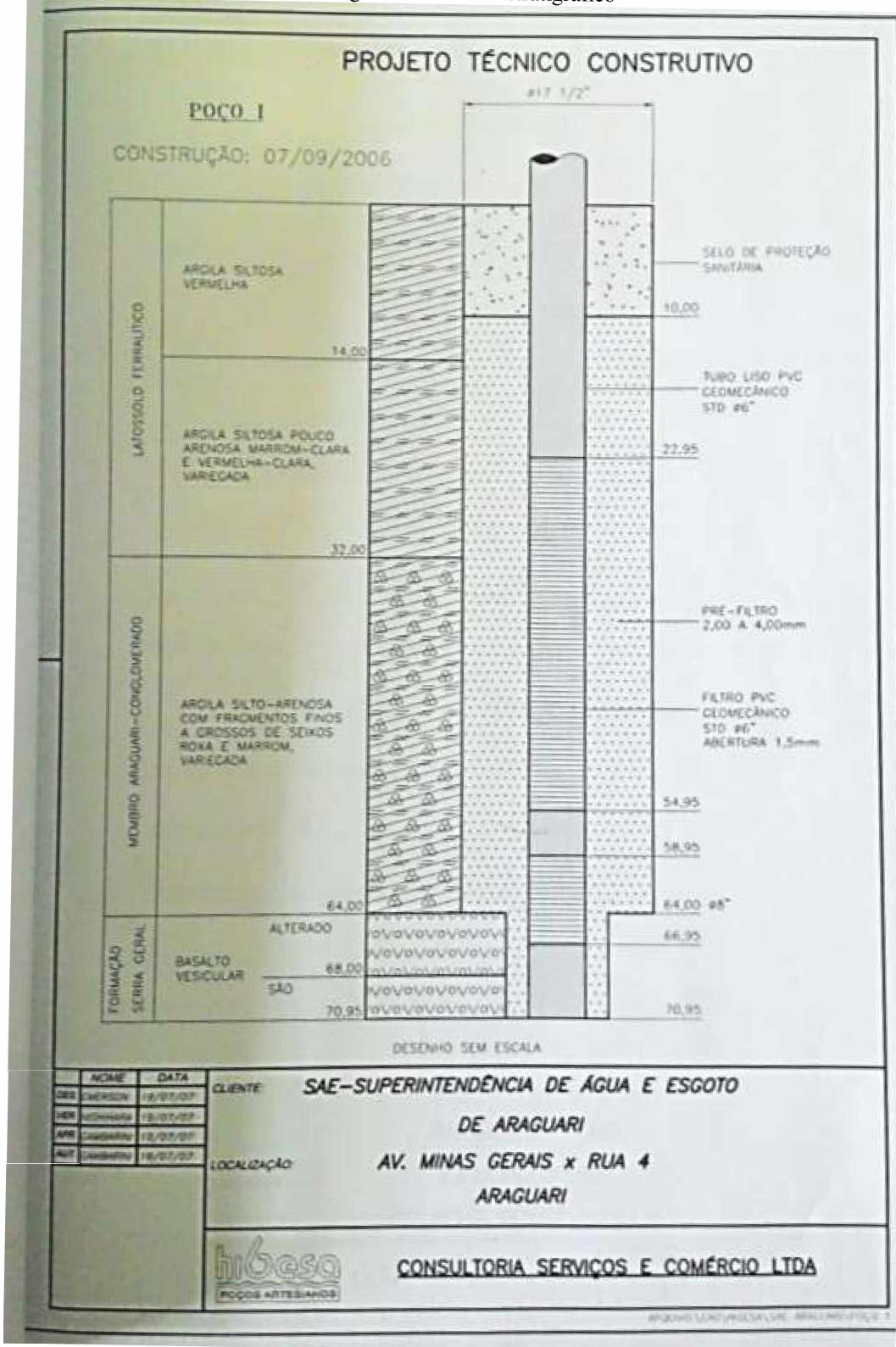
UNESCO. **Water for a sustainable world.** UNESCO. Paris, p. 139. 2015. (ISBN 978-92-3-100071-3).

VELÁSQUEZ, L. N. M. et al. Caracterização hidrogeológica dos Aquíferos Bauru e Serra Geral e avaliação das reservas do Aquífero Bauru no município de Araguari, Minas Gerais. **XV Congresso Brasileiro de Águas Subterrâneas**, 2008.

VIEIRA, J. M. P. Sistemas de Apoio à Decisão na Gestão de Recursos Hídricos. **Revista Engenharia Civil, Universidade do Minho**, Azurém, n. 7, p. 17, 2000.

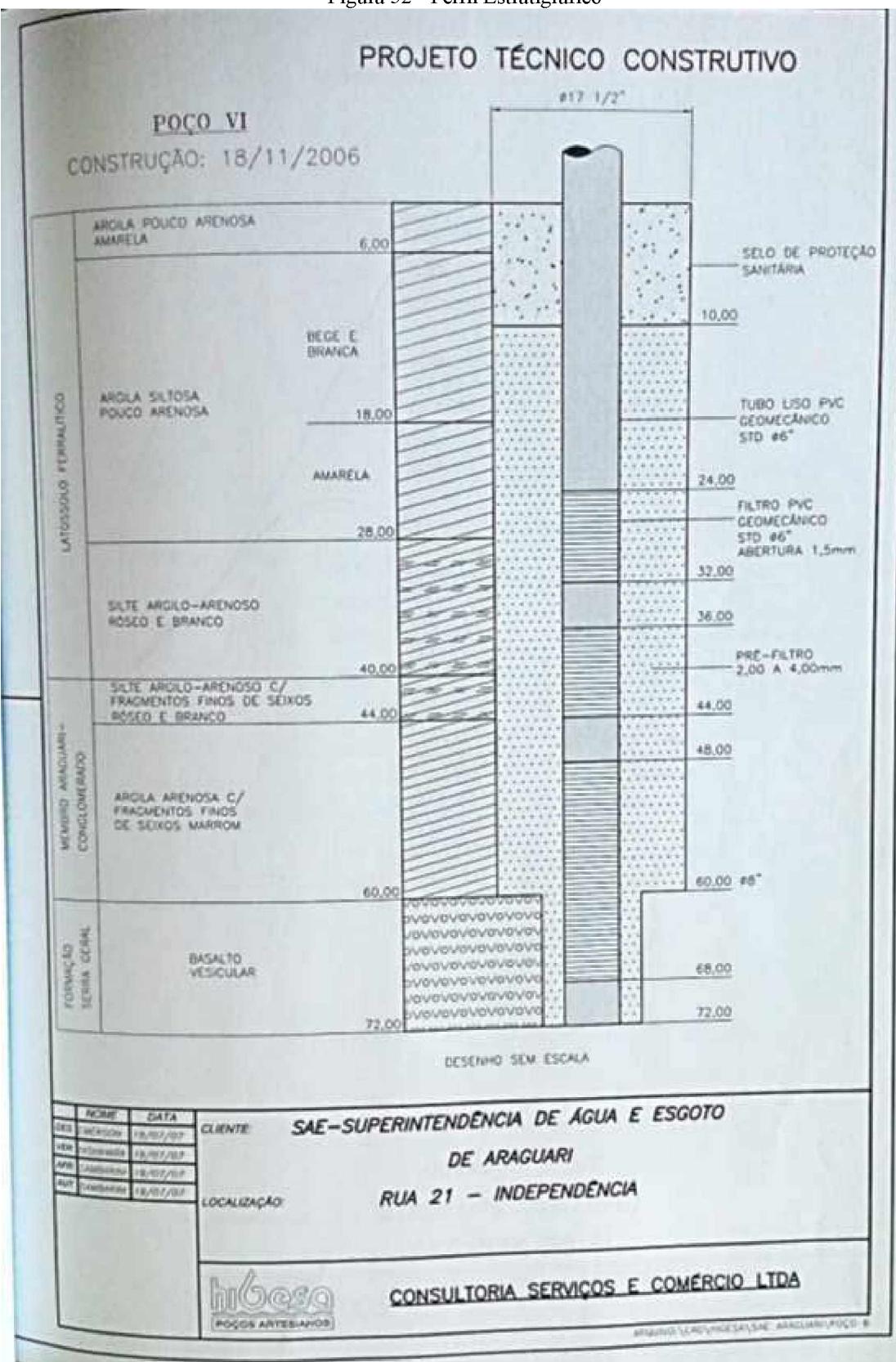
ANEXO 1

Figura 51 - Perfil Estratigráfico



Fonte: Acervo SAE (2015)

Figura 52 - Perfil Estratigráfico



Fonte: Acervo SAE (2015)