

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
Instituto de Geociências e Ciências Exatas
Câmpus de Rio Claro

RICHARD FONSECA FRANCISCO

**AVALIAÇÃO DA VULNERABILIDADE NATURAL À
CONTAMINAÇÃO DO SISTEMA AQUÍFERO BAURU, NA REGIÃO
CENTRO-SUL DO ESTADO DE SÃO PAULO**

Dissertação de Mestrado apresentada ao Instituto de Geociências e Ciências Exatas do Câmpus de Rio Claro, da Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho, como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Geociências e Meio Ambiente.

Orientador: Prof. Dr. Antonio Celso de Oliveira Braga

Rio Claro – SP

2013

RICHARD FONSECA FRANCISCO

**AVALIAÇÃO DA VULNERABILIDADE NATURAL À
CONTAMINAÇÃO DO SISTEMA AQUÍFERO BAURU, NA REGIÃO
CENTRO-SUL DO ESTADO DE SÃO PAULO**

Dissertação de Mestrado apresentada ao Instituto de Geociências e Ciências Exatas do Câmpus de Rio Claro, da Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho, como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Geociências e Meio Ambiente.

Comissão Examinadora

Prof. Dr. Antonio Celso de Oliveira Braga

Prof. Dr. Cesar Augusto Moreira

Prof. Dr. José Luiz Albuquerque Filho

Rio Claro, SP 26 de novembro de 2013.

Resultado: APROVADO

551.49 Francisco, Richard Fonseca
F819a Avaliação da vulnerabilidade natural à contaminação do
Sistema Aquífero Bauru, na região Centro-Sul do Estado de
São Paulo / Richard Fonseca Francisco. - Rio Claro, 2013
116 f. : il., figs., tabs., quadros, mapas

Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual Paulista,
Instituto de Geociências e Ciências Exatas
Orientador: Antonio Celso de Oliveira Braga

1. Águas subterrâneas. 2. Geofísica. 3. Condutância
longitudinal. 4. GOD. 5. Ekv. I. Título.

*À minha mãe Marlene, meu
pai João e à minha irmã
Sheilla, pelo apoio e carinho.*

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, a Deus e ao meu anjo da guarda, por terem me dado forças e inspiração para a realização desse trabalho. Por terem guiado e abençoado meus passos nessa etapa que aqui se encerra, para que outros desafios, aprendizados e conquistas tenham início em minha vida.

À minha mãe Marlene, meu pai João e à minha irmã Sheilla, por terem sonhado mais uma vez esse sonho comigo, depositando suas esperanças mais sinceras em mim, sempre me incentivando e me apoiando nessa jornada.

Ao Prof. Dr. Antonio Celso de Oliveira Braga, por tão gentilmente ter aceitado me orientar nesse trabalho, por sua amizade, ensinamentos e compreensão.

Ao Prof. Dr. José Luiz Albuquerque Filho e ao Prof. Dr. Cesar Augusto Moreira, pelos valiosos conselhos, apontamentos e críticas construtivas durante as bancas do exame geral de qualificação e defesa da dissertação.

Ao IPT pela doação de dados e parceria, na figura dos Geólogos Pesquisadores Régis Gonçalves Blanco e Carlos Alberto Birelli.

À Coordenadoria de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - CAPES pelo apoio financeiro na forma de concessão de bolsa de estudos.

Ao programa de Pós-Graduação em Geociências e Meio Ambiente, pela oportunidade de desenvolver essa pesquisa.

Enfim, a todos que colaboraram, direta ou indiretamente, para o desenvolvimento dessa dissertação.

*"Só quando a última árvore for
derrubada, o último peixe for morto e
o último rio for poluído é que o
homem perceberá que não pode
comer dinheiro."*

Provérbio Indígena

RESUMO

Diante da importância das águas subterrâneas para os diversos usos, particularmente o abastecimento público, e considerando os crescentes impactos nas reservas subterrâneas decorrentes de superexplorações, bem como a degradação da qualidade da água por atividades antrópicas, torna-se imprescindível o estabelecimento de instrumentos de planejamento e gestão do uso dos recursos hídricos subterrâneos. Por essa razão, o objetivo da presente pesquisa é avaliar a vulnerabilidade natural à contaminação do Sistema Aquífero Bauru, na região Centro-Sul do Estado de São Paulo, entre os municípios de Bauru e Marília, por meio da análise e integração de dados geológicos, hidrogeológicos e geofísicos. Para tanto, foram gerados mapas de vulnerabilidade, com a aplicação dos métodos GOD, EKV e Condutância Longitudinal (S), cujos resultados foram comparados qualitativamente. A determinação da vulnerabilidade natural do aquífero envolveu a utilização de informações sobre o grau de confinamento, litologia dos estratos acima da zona saturada, profundidade do nível d'água subterrânea, resistividade elétrica e condutividade hidráulica da zona não saturada. Exceto a caracterização litológica empregada no método GOD, extraída de mapeamento geológico regional na escala de 1:250.000, os demais parâmetros utilizados foram obtidos a partir do processamento e interpretação de dados geofísicos referentes a sondagens elétricas verticais, realizadas pelo Instituto de Pesquisas Tecnológicas (IPT) nas décadas de 1970 e 1980. A resistividade elétrica variou entre 8,0 e 70,0 Ω .m, com valor médio igual a 30,2 Ω .m, indicando comportamento geoeletrico predominantemente correlacionável a materiais areno-argilosos na área de estudo. Baseando-se na correlação com a resistividade elétrica, foram obtidos valores de condutividade hidráulica compatíveis com os frequentemente observados nos sedimentos das formações Adamantina e Marília, situando-se entre $1,2 \times 10^{-5}$ e 0,25 m/d. Os mapas de vulnerabilidade resultantes da aplicação dos métodos GOD e EKV mostraram-se bastante homogêneos, demonstrando que a vulnerabilidade da área varia entre baixa e média, resultados condizentes com os relatados em trabalhos anteriores desenvolvidos em menor escala. Dentre os métodos utilizados, o método S apresentou os melhores resultados, visto que originou um mapa mais detalhado e com maior variabilidade de classes, predominando regiões de baixa vulnerabilidade, e secundariamente, áreas moderadamente vulneráveis. Dessa forma, foi possível concluir que, caso os dados necessários estejam disponíveis, principalmente a resistividade elétrica, é recomendável o uso do método S para avaliar a vulnerabilidade da área de interesse.

Palavras-chave: águas subterrâneas. geofísica. condutância longitudinal. GOD. EKV.

ABSTRACT

Given the importance of groundwater for diverse uses, particularly the public supply, and considering the increasing impacts on underground reserves as a result of overexploitations, as well as the degradation of water quality by anthropogenic activities, it becomes essential to establish tools for planning and management of the use of groundwater resources. For this reason, the aim of this research is to assess the natural vulnerability to contamination of the Bauru Aquifer System, in the South-Central region of the State of São Paulo, between the municipalities of Bauru and Marília, through the analysis and integration of geological, hydrogeological and geophysical data. Therefore, vulnerability maps were generated, using the GOD, EKv and the Longitudinal Conductance (S) methods, whose results were compared qualitatively. The determination of the natural vulnerability of the aquifer involved the use of informations about the degree of confinement, lithology of the strata above the saturated zone, depth to groundwater table, electrical resistivity and hydraulic conductivity of the unsaturated zone. Except the lithological characterization employed in the GOD method, extracted from regional geological mapping on 1:250.000 scale, the others parameters used were obtained from the processing and interpretation of geophysical data relating to vertical electrical soundings, performed by the Institute for Technological Research in the 1970s and 1980s. The electrical resistivity ranged between 8,0 and 70,0 Ω .m, with an average value of 30,2 Ω .m, indicating geoelectrical behavior predominantly correlatable to sand-clayey materials in the study area. Basing on the correlation with the electrical resistivity, were obtained hydraulic conductivity values compatibles with those commonly observed in sediments of the Adamantina and Marília formations, ranging between $1,2 \times 10^{-5}$ and 0,25 m/d. The vulnerability maps arising from the application of the GOD and EKv methods were quite homogeneous, demonstrating that the vulnerability of the area ranges between low and medium, results befitting with those reported in previous studies developed on smaller scale. Among the utilized methods, the S method presented the best results, whereas produced a more detailed map, with greater classes variability, predominating regions of low vulnerability, and secondly, moderately vulnerable areas. Thus, it was concluded that, if the necessary data are available, especially the electrical resistivity, it is recommended to use the S method to evaluate the vulnerability of the area of interest.

Keywords: groundwater. geophysics. longitudinal conductance. GOD. EKv.

SUMÁRIO

	Página
CAPÍTULO 1 – APRESENTAÇÃO	14
1.1 INTRODUÇÃO E JUSTIFICATIVAS	14
1.2 OBJETIVOS	16
CAPÍTULO 2 – CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO	17
2.1 ASPECTOS GERAIS.....	17
2.2 RECURSOS HÍDRICOS	19
2.3 CONTEXTO GEOLÓGICO E HIDROGEOLÓGICO	24
2.3.1 O Grupo Bauru no Estado de São Paulo	24
2.3.2 Geologia Local.....	26
2.3.3 O Sistema Aquífero Bauru	30
2.4 VULNERABILIDADE E ÁREAS CONTAMINADAS.....	33
CAPÍTULO 3 – FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	36
3.1 HIDROGEOLOGIA	36
3.1.1 Base Conceitual	36
3.1.2 Tipos de Aquíferos	41
3.2 GEOFÍSICA.....	43
3.2.1 Generalidades.....	44
3.2.2 Método da Eletrorresistividade e a Técnica da Sondagem Elétrica Vertical	46
3.2.2.1 Parâmetros Dar Zarrouk.....	50
3.3 VULNERABILIDADE NATURAL DOS AQUÍFEROS.....	52
3.3.1 Conceitos Básicos	52
3.3.2 Métodos para a Avaliação da Vulnerabilidade Natural de Aquíferos	55
3.3.2.1 Considerações Gerais	55
3.3.2.2 Método GOD.....	58
3.3.2.3 Método EKv.....	61
3.3.2.4 Método da Condutância Longitudinal Unitária (S).....	62
3.4 GEOPROCESSAMENTO E A CARTOGRAFIA DE VULNERABILIDADE	63

CAPÍTULO 4 – MATERIAIS E MÉTODOS	68
4.1 MATERIAIS	68
4.2 PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS	69
4.2.1 Delimitação da Área de Estudo e Definição da Escala de Trabalho	71
4.2.2 Elaboração da Caracterização da Área de Estudo	74
4.2.3 Elaboração da Fundamentação Teórica	75
4.2.4 Coleta, Organização e Tratamento dos Dados	76
<i>A) Processamento e Reinterpretação de SEVs</i>	<i>76</i>
<i>B) Elaboração do Mapa das Formações Geológicas</i>	<i>77</i>
4.2.5 Estimativa da Condutividade Hidráulica Vertical da Zona Não Saturada	77
4.2.6 Estruturação do Banco de Dados Geográficos	78
4.2.7 Geração e Integração dos Mapas Temáticos	79
<i>A) Método GOD</i>	<i>79</i>
<i>B) Método EK_v</i>	<i>81</i>
<i>C) Método da Condutância Longitudinal Unitária (S)</i>	<i>82</i>
4.2.8 Redação da Discussão dos Resultados	83
4.2.9 Redação das Considerações Finais e Recomendações	83
CAPÍTULO 5 – RESULTADOS E DISCUSSÕES	84
5.1 RESISTIVIDADE DA ZONA NÃO SATURADA	84
5.2 CONDUTIVIDADE HIDRÁULICA VERTICAL DA ZONA NÃO SATURADA	85
5.3 MAPEAMENTO DA VULNERABILIDADE A PARTIR DO MÉTODO GOD	87
5.4 MAPEAMENTO DA VULNERABILIDADE A PARTIR DO MÉTODO EK_v	90
5.5 MAPEAMENTO DA VULNERABILIDADE A PARTIR DO MÉTODO (S)	93
5.6 COMPARAÇÃO ENTRE OS RESULTADOS	94
CAPÍTULO 6 – CONSIDERAÇÕES FINAIS E RECOMENDAÇÕES	96
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	99
BIBLIOGRAFIA CONSULTADA	113
ANEXO A – Dados cadastrais das SEVs utilizadas na pesquisa.	114

LISTA DE FIGURAS

	Página
Figura 1 - Mapa de localização da área de estudo.....	18
Figura 2 - Unidades de Gerenciamento de Recursos Hídricos (UGRHs) abrangidas pela área de estudo.	20
Figura 3 - Número de pontos monitorados por sistema aquífero (2010-2012).	22
Figura 4 - Proposta clássica de subdivisão estratigráfica dos sedimentos cretáceos suprabasálticos. .	25
Figura 5 - Relações entre as unidades litoestratigráficas do Grupo Bauru nos diferentes compartimentos do Estado de São Paulo.	26
Figura 6 - Mapa das formações geológicas existentes na área de estudo.....	27
Figura 7 - Modelo conceitual hidrogeológico do Sistema Aquífero Bauru.	30
Figura 8 - Divisão hidroestratigráfica do Sistema Aquífero Bauru no Estado de São Paulo.	32
Figura 9 - Áreas contaminadas, de alta vulnerabilidade e áreas potenciais de restrição, controle de captação e uso das águas subterrâneas.	35
Figura 10 - Distribuição de água na Terra.....	37
Figura 11 - Ciclo hidrológico.....	37
Figura 12 - Distribuição da água no subsolo.....	39
Figura 13 - Síntese dos processos de atenuação de contaminantes nas águas subterrâneas.....	40
Figura 14 - Tipos de aquíferos quanto à porosidade.	42
Figura 15 - Classificação dos aquíferos segundo seus níveis de pressão.	43
Figura 16 - Geofísica e suas principais áreas de atuação.	44
Figura 17 - Principais métodos geofísicos aplicados.	45
Figura 18 - Determinação da resistividade elétrica dos materiais.....	47
Figura 19 - Arranjo para medidas de resistividade.	47
Figura 20 - Faixas de variação nos valores de resistividade de materiais naturais.	48
Figura 21 - Técnica da SEV - Arranjo <i>Schlumberger</i>	49
Figura 22 - Seção geométrica e os parâmetros <i>Dar Zarrouk</i>	50
Figura 23 - Esquema conceitual do risco (perigo) à contaminação das águas subterrâneas.	54
Figura 24 - Sistema GOD para avaliação da vulnerabilidade do aquífero à contaminação.	59
Figura 25 - Elaboração de um mapa de vulnerabilidade pelo método GOD.....	59
Figura 26 - Condutância longitudinal unitária e a vulnerabilidade natural de aquíferos livres.....	63
Figura 27 - Arquitetura de sistemas de informação geográfica.....	64
Figura 28 - Tipos de representação de dados geográficos.....	65
Figura 29 - Fluxograma das etapas de trabalho.....	70

Figura 30 - Localização das SEVs utilizadas na área de estudo.	72
Figura 31 - Níveis de avaliação da vulnerabilidade e do perigo de contaminação das águas subterrâneas.....	73
Figura 32 - Histograma da distribuição dos valores de resistividade da zona não saturada.	84
Figura 33 - Relação entre as resistividades elétricas e a litologia da área de estudo.	85
Figura 34 - Relação entre a condutividade hidráulica (K_v) e a litologia da área de estudo.	86
Figura 35 - Distribuição espacial do parâmetro O na área de estudo.....	87
Figura 36 - Distribuição espacial do parâmetro D na área de estudo.....	88
Figura 37 - Mapa de vulnerabilidade resultante da aplicação do método GOD.	89
Figura 38 - Espessuras da zona não saturada e os índices estabelecidos pelo método EKv.	90
Figura 39 - Valores de condutividade hidráulica e os índices estabelecidos pelo método EKv.	91
Figura 40 - Mapa de vulnerabilidade obtido com a aplicação do método EKv.	92
Figura 41 - Mapa de vulnerabilidade resultante da aplicação do método S.....	93
Figura 42 - Comparação entre os mapas GOD, EKv e S.	95

LISTA DE TABELAS

	Página
Tabela 1 - Distribuição de água na Terra.	36
Tabela 2 - Indexação atribuída aos valores da espessura da zona não saturada.	61
Tabela 3 - Intervalos de condutividade hidráulica vertical e seus respectivos índices.	62
Tabela 4 - Índices de vulnerabilidade para o método EKv.	62
Tabela 5 - Relação entre os parâmetros geoeletricos e os índices de vulnerabilidade do método S. ...	63
Tabela 6 - Relação de dados utilizados na pesquisa.	68
Tabela 7 - Estimativa da escala de trabalho em função da quantidade de SEVs e das dimensões da área da pesquisa.	74
Tabela 8 - Correlação entre a resistividade elétrica e a condutividade hidráulica para os principais tipos de sedimentos inconsolidados.	78
Tabela 9 - Relação entre as classes de vulnerabilidade obtidas no método GOD e a área total.	89
Tabela 10 - Relação entre as classes de vulnerabilidade obtidas no método EKv e a área total.	92
Tabela 11 - Classes de vulnerabilidade obtidas no método S e a área total.	94

LISTA DE QUADROS

	Página
Quadro 1 - Municípios pertencentes à área de estudo.	17
Quadro 2 - Pontos de amostragem na área de estudo e seus respectivos valores de IQA.....	21
Quadro 3 - Relação de áreas contaminadas cadastradas na área de estudo.....	34
Quadro 4 - Distribuição vertical das águas subterrâneas.	40
Quadro 5 - Síntese dos principais métodos para a avaliação de vulnerabilidade de aquíferos.	57
Quadro 6 - Definição prática das classes de vulnerabilidade de um aquífero.....	60

CAPÍTULO 1 – APRESENTAÇÃO

Nesse capítulo, é abordada a importância das águas subterrâneas para o abastecimento público de muitos municípios brasileiros, inclusive os principais impactos ambientais decorrentes da superexploração dos aquíferos e do uso inadequado do solo, inserindo nesse contexto a área de estudo. Além disso, é discutida a relevância da elaboração de pesquisas com enfoque na avaliação de vulnerabilidade do Sistema Aquífero Bauru, indicando as principais justificativas que impulsionaram o desenvolvimento desta pesquisa.

1.1 INTRODUÇÃO E JUSTIFICATIVAS

Ao longo das últimas décadas, a expansão das atividades agrícolas e industriais, aliada ao aumento populacional verificado em diversos núcleos urbanos do país, incrementou a demanda por água potável para o abastecimento público e privado, comprometendo a quantidade e qualidade das águas superficiais e subterrâneas.

No Brasil, estima-se que do total de municípios, 47% são totalmente abastecidos por mananciais superficiais, 39% por águas subterrâneas e 14% pelos dois tipos de mananciais (abastecimento misto). No Estado de São Paulo, mais de 50% dos núcleos urbanos, localizados majoritariamente na parte oeste, são abastecidos exclusivamente por recursos hídricos subterrâneos (ANA, 2010).

Na área de estudo desta pesquisa, que abrange o Sistema Aquífero Bauru (SAB) localizado na região Centro-Sul do Estado de São Paulo, são elevados os níveis de dependência de aquíferos para o abastecimento público, sendo que os municípios de Gália, Águas de Santa Bárbara, Piratininga, Espírito Santo do Turvo, Alvinlândia e Lucianópolis são totalmente dependentes das águas subterrâneas, devido ao comprometimento das águas superficiais (CETESB, 2012a).

Em grande parte dos casos, a crescente demanda conduz à utilização das águas subterrâneas sem planejamento prévio e estudos detalhados sobre a recarga e vazão global segura, que não provoque a superexploração do aquífero. Como consequências, podem ocorrer a diminuição da quantidade de água que abastece os rios, seca de nascentes, esgotamento de reservatórios, rebaixamento do nível freático e indução de contaminação por intrusão salina em regiões costeiras (HIRATA, 1993; MMA, 2007).

Além disso, devem ser consideradas as questões relativas à contaminação das águas subterrâneas, tendo como principais fontes de contaminação: as fossas sépticas, esgotos

domésticos e industriais, vazamentos em depósitos subterrâneos de produtos químicos e combustíveis, lixões, poços profundos mal instalados e/ou abandonados, cemitérios, inclusive o uso indiscriminado de fertilizantes e defensivos agrícolas (KULKAMP et al., 2003).

Por isso, é crescente o número de áreas contaminadas no Estado de São Paulo, bem como os impactos ambientais decorrentes. Segundo a Companhia Ambiental do Estado de São Paulo (CETESB), em 2011 as áreas já declaradas contaminadas totalizavam 4.131, cuja maioria se concentra no município de São Paulo e Região Metropolitana de São Paulo (RMSP), na Unidade de Gerenciamento de Recursos Hídricos (UGRHI) do Alto Tietê. Estima-se que o número de áreas contaminadas registradas tende a aumentar, considerando a continuidade das ações de fiscalização e licenciamento ambiental (CETESB, 2011).

Ainda que não se verifique alta incidência de áreas contaminadas no Sistema Aquífero Bauru, de um modo geral, já se observa no mesmo registros de contaminação, devido a concentrações de nitrato acima dos padrões de potabilidade para o consumo humano. Proveniente de esgotos domésticos e do uso inadequado de fertilizantes no campo, o nitrato em excesso foi detectado em diversos poços tubulares profundos e cacimbas, localizados em áreas urbanas e rurais de muitos municípios paulistas, tais como: Bauru, Presidente Prudente, São José do Rio Preto, Fernandópolis, Votuporanga, entre outros (IRITANI et al., 2011).

Nesse sentido, a importância da realização de estudos de vulnerabilidade é inquestionável, visto que a remediação de uma área tende sempre a ser difícil e impraticável em diversas situações, sob o âmbito financeiro, técnico e operacional. Portanto, o processo sistemático de mapeamento da vulnerabilidade de aquíferos representa uma ação preventiva extremamente eficaz, pois seus resultados permitem priorizar e direcionar esforços tecnológicos e financeiros em regiões mais vulneráveis, subsidiando o Poder Público na tomada de decisões referentes à gestão e uso racional das águas subterrâneas.

Contudo, ainda são insuficientes os trabalhos com enfoque na avaliação da vulnerabilidade natural de aquíferos no Brasil, mesmo no Estado de São Paulo, que é pioneiro nesse tipo de pesquisa, cujo principal trabalho desenvolvido foi o “*Mapeamento da Vulnerabilidade e Risco de Poluição das Águas Subterrâneas no Estado de São Paulo*” (IG/CETESB/DAEE, 1997), elaborado na escala de 1:500.000, porém disponibilizado aos usuários na escala regional de 1:1.000.000.

Até o presente momento, são escassas as pesquisas desenvolvidas acerca da vulnerabilidade natural do Sistema Aquífero Bauru, mesmo que já seja reconhecida a sua importância para o abastecimento de um conjunto de municípios com milhares de consumidores. Ademais, o principal estudo existente foi apresentado numa escala pouco

detalhada, restringindo a possibilidade de aplicação no planejamento e gestão do uso de recursos hídricos subterrâneos em âmbito municipal. Portanto, é recomendável a elaboração de novas pesquisas pormenorizadas, que resultem em mapas de vulnerabilidade mais confiáveis, precisos e a custos e prazos adequados às possibilidades das comunidades.

Nesse contexto, a realização do presente trabalho se mostra relevante, já que seus resultados poderão direcionar a elaboração de políticas públicas de uso e ocupação territorial, que assegurem a quantidade e contribuam para a proteção da qualidade das águas subterrâneas na área de estudo. Além disso, será possível fornecer subsídios aos usuários, órgãos ambientais de controle, comunidade científica e ao Poder Público acerca dos tipos de dados disponíveis que devem ser usados na avaliação de vulnerabilidade, inclusive a maneira como essas informações podem ser integradas, considerando-se as peculiaridades geológicas e hidrogeológicas da área de estudo.

1.2 OBJETIVOS

A presente pesquisa teve como objetivo principal avaliar a vulnerabilidade natural à contaminação do Sistema Aquífero Bauru, na região Centro-Sul do Estado de São Paulo, entre os municípios de Bauru e Marília, por meio da análise e integração de dados geológicos, hidrogeológicos e geofísicos.

Especificamente, buscou-se:

- Inventariar e sistematizar dados geológicos, hidrogeológicos e geofísicos relativos à área de estudo;
- Comparar os resultados obtidos a partir da utilização dos métodos GOD e EKv;
- Aplicar, experimentalmente, um novo método de avaliação de vulnerabilidade natural de aquíferos, baseado no parâmetro *Dar Zarrouk* denominado Condutância Longitudinal (S), comparando-o com aqueles anteriormente citados; e
- Contribuir para a difusão e consolidação do Sistema de Informação Geográfica (SIG) e do Geoprocessamento como ferramentas de análise espacial, direcionadas ao mapeamento da vulnerabilidade natural de aquíferos.

CAPÍTULO 2 – CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO

No presente capítulo, são apresentados os aspectos gerais relativos à área de estudo, tais como: localização, clima, relevo, tipos de solos, atividades econômicas desenvolvidas e o uso do solo. Ademais, são abordados temas mais específicos e imprescindíveis à compreensão desta pesquisa, como a situação dos recursos hídricos e o contexto geológico e hidrogeológico, em âmbito regional e local.

2.1 ASPECTOS GERAIS

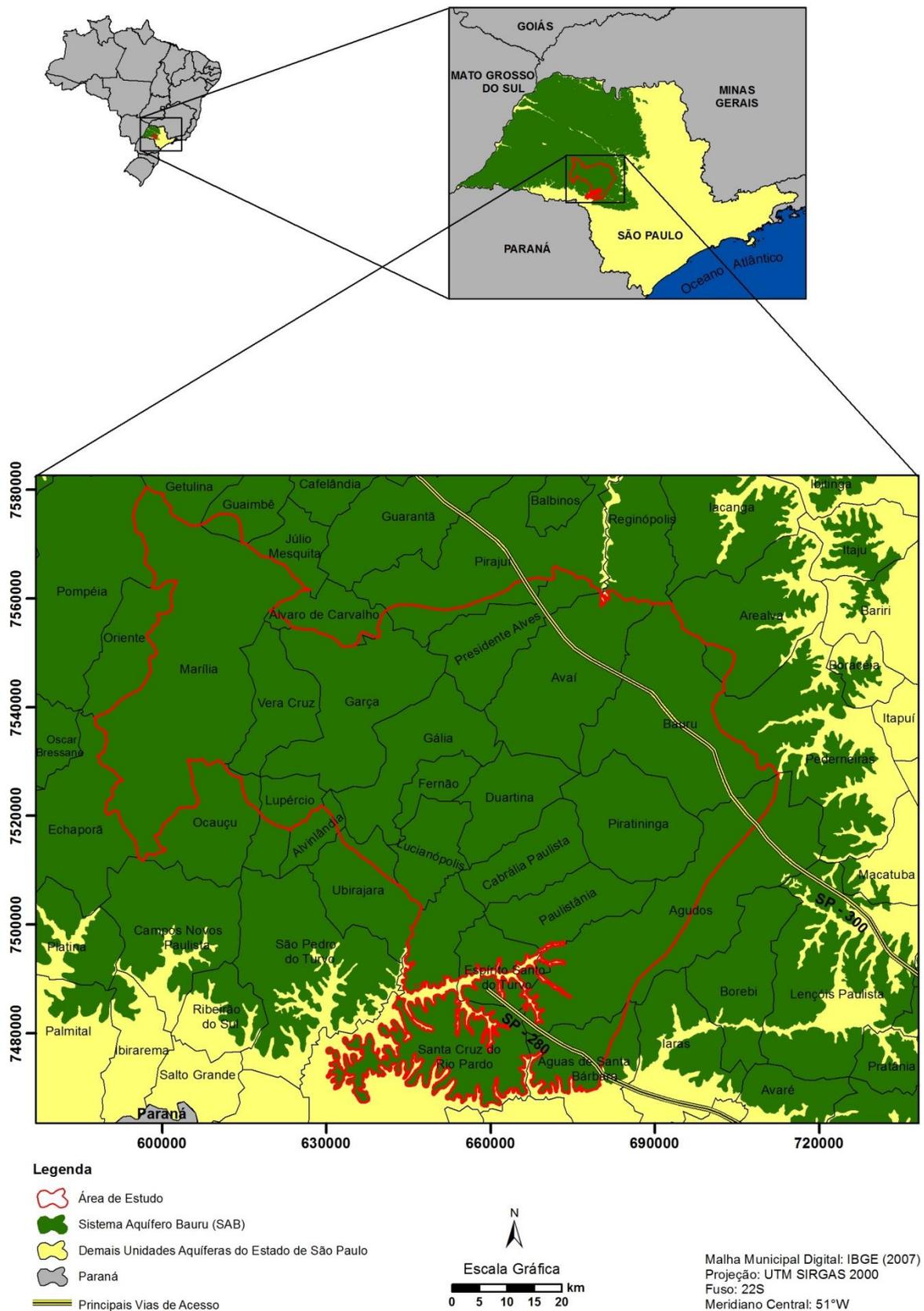
A área de estudo situa-se na região Centro-Sul do Estado de São Paulo, nos domínios do Sistema Aquífero Bauru (SAB). Possui superfície de aproximadamente 7.086 km² e tem como principais vias de acesso as rodovias estaduais Presidente Castelo Branco (SP - 280) e Marechal Rondon (SP - 300). Abrange total e parcialmente municípios pertencentes às Regiões Administrativas de Bauru, Marília e Sorocaba (Quadro 1 e Figura 1).

Quadro 1 - Municípios pertencentes à área de estudo.

<i>Municípios</i>	<i>Região</i>	<i>Nível de Abrangência</i>
Bauru	Bauru	Total
Marília	Marília	Total
Piratinunga	Bauru	Total
Gália	Marília	Total
Garça	Marília	Total
Avaí	Bauru	Total
Presidente Alves	Bauru	Total
Vera Cruz	Marília	Total
Paulistânia	Bauru	Total
Cabrália Paulista	Bauru	Total
Duartina	Bauru	Total
Fernão	Marília	Total
Lucianópolis	Bauru	Total
Agudos	Bauru	Parcial
Ocaçu	Marília	Parcial
Lupércio	Marília	Parcial
Alvinlândia	Marília	Parcial
Ubirajara	Bauru	Parcial
Santa Cruz do Rio Pardo	Marília	Parcial
Espírito Santo do Turvo	Marília	Parcial
Águas de Santa Bárbara	Sorocaba	Parcial
Guaimbê	Bauru	Parcial
Arealva	Bauru	Parcial
Pirajuí	Bauru	Parcial
Álvaro de Carvalho	Marília	Parcial

Fonte: SEADE (2013).

Figura 1 - Mapa de localização da área de estudo.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Segundo a classificação climática de Köeppen, o tipo de clima dominante na maior parte da área de estudo é o Cwa, caracterizado pelo clima tropical de altitude, com chuvas no verão e seca no inverno, com a temperatura média do mês mais quente superior a 22°C (SETZER, 1966).

Com relação à geomorfologia, a área de estudo situa-se na unidade morfoestrutural da Bacia Sedimentar do Paraná, no compartimento da Província do Planalto Ocidental Paulista, a qual ocupa praticamente 50% da área total do Estado de São Paulo (ALMEIDA, 1964). De modo geral, o relevo dessa unidade morfoescultural é levemente ondulado, onde predomina colinas amplas e baixas com topos aplainados.

Nesse planalto, é possível identificar variações fisionômicas regionais, que resultaram na delimitação de unidades geomorfológicas diferenciadas, como o Planalto Centro-Ocidental; Patamares Estruturais de Ribeirão Preto e os Planaltos Residuais de Batatais/Franca, São Carlos, Botucatu e Marília (PONÇANO et al., 1981).

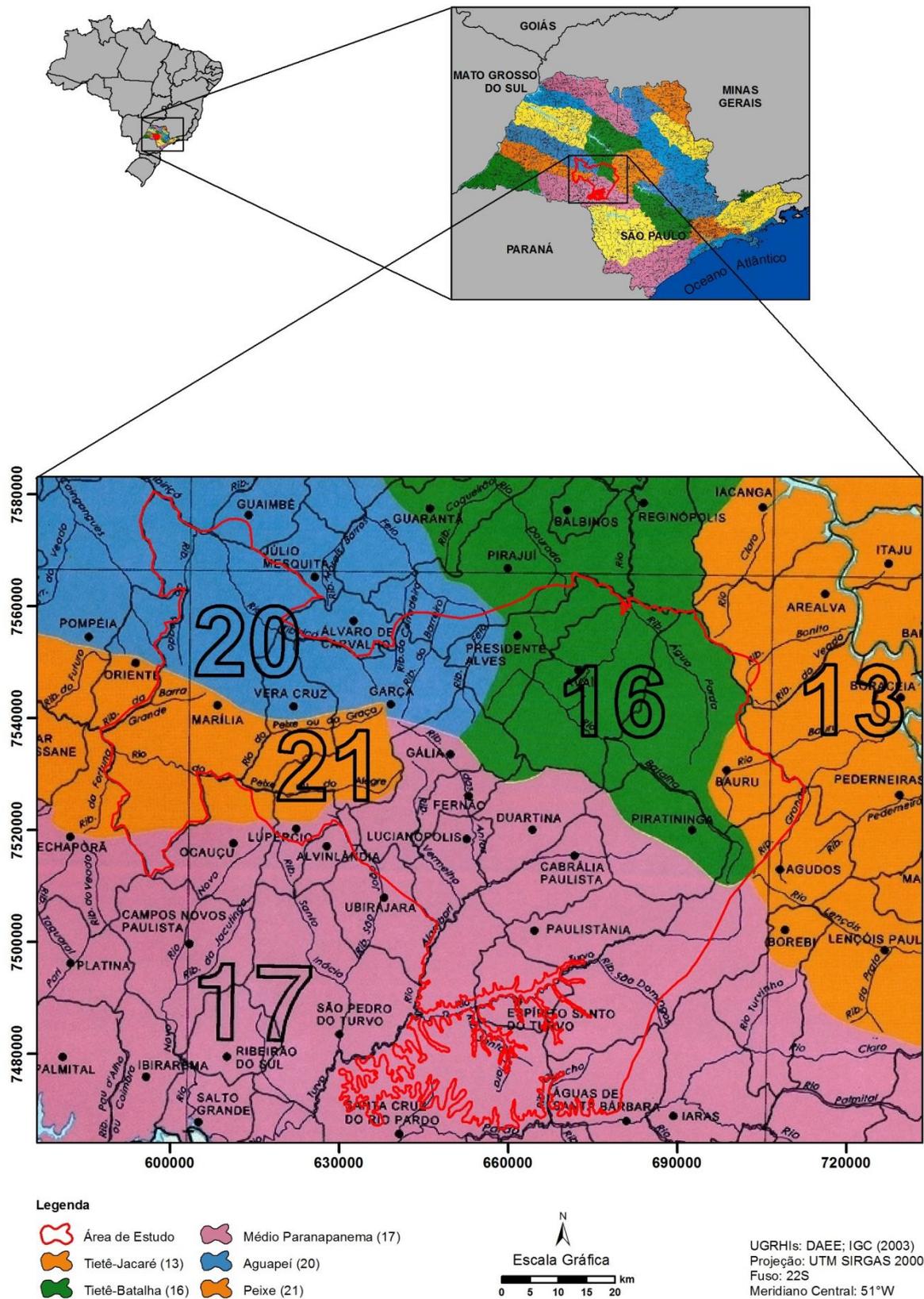
Na área de estudo, predominam o Latossolo Vermelho-Amarelo e o Argissolo Vermelho, sendo que ambos apresentam textura média arenosa. Esses solos provêm do intemperismo físico-químico dos arenitos do Grupo Bauru, e são altamente sujeitos a processos erosivos em regiões mais íngremes e desprovidas de cobertura vegetal (SALOMÃO, 1994).

No que se refere às atividades econômicas, nas áreas urbanas destacam-se os setores de serviços e comércio, como fontes indutoras da economia regional. As atividades industriais se concentram nos ramos mecânico, alimentício e agroindustrial sucroalcooleiro, desenvolvidos principalmente nos municípios de Marília e Bauru. Nas áreas rurais, a agricultura é a atividade mais expressiva, destacando-se as lavouras de café e cana-de-açúcar, que atualmente ocupam espaços que antes eram destinados a pastagens para a pecuária extensiva (CBH/AP, 2011; CBH/MP, 2011; CBH/TB, 2010; CBH/TJ, 2012).

2.2 RECURSOS HÍDRICOS

A área de estudo abrange parcialmente cinco Unidades de Gerenciamento de Recursos Hídricos (UGRHIs), quais sejam: Tietê-Jacaré (13); Tietê-Batalha (16); Médio Paranapanema (17); Aguapeí (20) e Peixe (21), de acordo com a Figura 2. Os principais cursos d'água que cruzam a área de estudo são os rios: Feio ou Aguapeí, Batalha, Bauru, Peixe e Turvo.

Figura 2 - Unidades de Gerenciamento de Recursos Hídricos (UGRHIs) abrangidas pela área de estudo.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Em linhas gerais, os principais fatores responsáveis pela deterioração da qualidade das águas superficiais na área de estudo são a utilização indiscriminada de fertilizantes, sobretudo no cultivo da cana-de-açúcar, o lançamento de esgotos domésticos *in natura* nos corpos d'água receptores, bem como a insuficiência de sistemas de coleta, afastamento e tratamento desses efluentes, contribuindo também para a contaminação das águas subterrâneas.

Em 2012, os municípios de Marília, Bauru, Pirajuí, Paulistânia, Agudos e Águas de Santa Bárbara apresentaram porcentagens de tratamento de esgotos domésticos inferiores a 10%. De acordo com o Indicador de Coleta e Tratabilidade de Esgoto da População Urbana de Municípios (ICTEM), os municípios supramencionados apresentaram os piores índices, com classificação na faixa de valores entre 0 e 2,5, numa escala de 0 a 10. A nota do ICTEM reflete a relação entre o investimento realizado em saneamento básico e a porcentagem de coleta e tratamento de esgotos, associada à eficiência de remoção de carga orgânica (CETESB, 2012b).

Na área de estudo, existem apenas seis pontos de monitoramento da qualidade das águas superficiais (Quadro 2), distribuídos nas UGRHIs 16, 20 e 21 e concentrados nos municípios de Bauru e Marília. Contudo, essa pequena quantidade é considerada suficiente para o monitoramento da qualidade, com base nas pressões antrópicas existentes (CETESB, 2012b).

Uma das maneiras utilizadas para medir a qualidade das águas superficiais é o Índice de Qualidade das Águas (IQA), calculado por meio da integração de variáveis que indicam o lançamento de efluentes sanitários no corpo d'água, fornecendo uma visão geral sobre determinado curso d'água ou reservatório. As variáveis de qualidade avaliadas pelo IQA são: temperatura, pH, oxigênio dissolvido, demanda bioquímica de oxigênio, *Escherichia coli* ou coliformes termotolerantes, nitrogênio total, fósforo total, sólidos totais e turbidez.

Em síntese, os resultados do IQA para os pontos amostrados na área de estudo indicaram qualidade boa para quatro dos seis pontos amostrados, sendo que dos pontos de amostragem remanescentes, um apresentou IQA ótimo e o outro IQA regular (Quadro 2).

Quadro 2 - Pontos de amostragem na área de estudo e seus respectivos valores de IQA.

UGRHI	Corpo Hídrico	Código CETESB	Tipo	Local de Amostragem	Município	Lat. S	Long. W	IQA
16	Rio Batalha	BATA 02050	Rede Básica	Na captação de Bauru	Bauru	22° 22' 51"	49° 06' 55"	Boa
20	Córrego Água do Norte	ANOR 02300	Rede Básica	No represamento do manancial de captação de Marília	Marília	22° 12' 28"	49° 54' 39"	Boa
	Res.	CASC	Rede	Manancial de	Marília	22°	49°	Boa

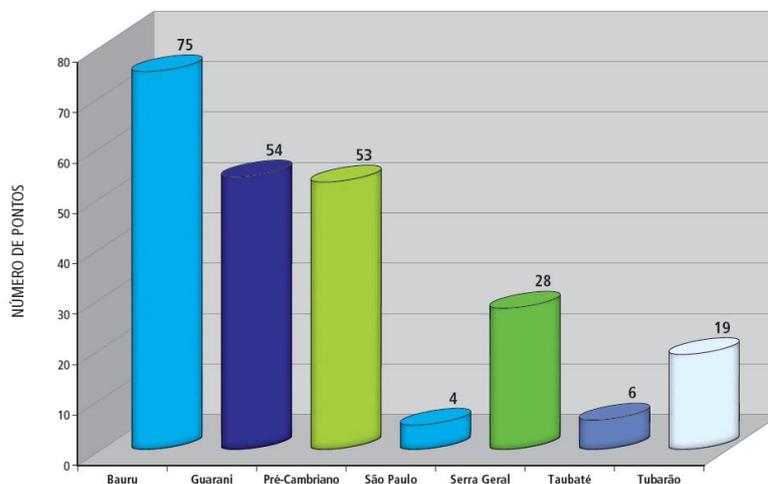
UGRHI	Corpo Hídrico	Código CETESB	Tipo	Local de Amostragem	Município	Lat. S	Long. W	IQA
21	Cascata	02050	Básica	captação de Marília, no Bairro Maria Isabel	Marília	12° 48''	55° 22''	
	Rio Tibiriçá	TBIR 03300	Rede Básica	Ponte na Rodovia BR-153, no trecho que liga Marília a São José do Rio Preto		22° 03' 40''	49° 54' 04''	Boa
	Res. do Arrependido	ARPE 02800	Rede Básica	No reservatório do Rio Arrependido, na captação de Marília	Marília	22° 19' 09''	50° 01' 21''	Ótima
	Rio do Peixe-UGRHI 21	PEIX 02100	Rede Básica	Ponte na rodovia que liga Marília a Assis	Marília	22° 18' 16''	50° 03' 00''	Regular

Fonte: CETESB (2012b).

Desde a década de 1990, a CETESB elabora relatórios sobre a qualidade das águas subterrâneas brutas para abastecimento público do Estado de São Paulo. A avaliação da qualidade dos aquíferos se baseia em dados coletados pela Rede de Monitoramento da Qualidade das Águas Subterrâneas, a qual evoluiu ao longo do tempo, com a ampliação do número de pontos de amostragem, abrangendo uma quantidade maior de aquíferos e de parâmetros monitorados.

Atualmente, o Sistema Aquífero Bauru possui 75 pontos de monitoramento da qualidade das águas subterrâneas (Figura 3) (CETESB, 2012a). Sem dúvida, é o aquífero livre mais monitorado do Estado de São Paulo, devido à grande área exposta, aos impactos ambientais adversos impostos e à importância para o abastecimento público de muitos municípios da região.

Figura 3 - Número de pontos monitorados por sistema aquífero (2010-2012).



Fonte: CETESB (2012a).

Todavia, a densidade de pontos de amostragem ainda é pequena, considerando a amplitude da área avaliada. Por essa razão, a rede de monitoramento necessita ser ampliada, para oferecer um panorama geral da qualidade das águas em locais não amostrados, fornecendo um volume de dados maior aos gestores públicos municipais.

Na área de estudo, existem apenas dois pontos de monitoramento do SAB, um localizado no município de Gália (UGRHI 17) e outro em Bauru (UGRHI 13), o qual apresenta concentrações de nitrato e de coliformes fecais em desconformidade com os padrões de potabilidade estabelecidos pela Portaria nº 2.914, de 12 de dezembro de 2011 (BRASIL, 2011).

Com relação à qualidade das águas do SAB, os relatórios da CETESB (1996, 1998, 2001, 2004, 2010) indicaram a contaminação das águas subterrâneas, sobretudo, por concentrações anômalas de nitrato que muitas vezes excedem os valores de potabilidade (10 mg/L N-NO₃⁻), corroborando a tendência de aumento das concentrações desse poluente, registrada durante toda a década de 1990.

Em contrapartida, o relatório da CETESB (2012a), referente ao triênio 2010-2012, classificou como boa a qualidade das águas subterrâneas para o consumo humano, apontando uma estabilização dos altos níveis de nitrato em grande parte do SAB. Por outro lado, nas UGRHIs 16 e 20 ainda persiste a tendência de aumento das concentrações de nitrato.

Segundo Reynolds-Vargas et al. (2006), o nitrato é o contaminante mais frequente em aquíferos de todo o mundo, cujas principais fontes antrópicas difusas, fornecedoras de compostos nitrogenados são: aplicação de fertilizantes orgânicos e sintéticos nitrogenados, utilização de fossas sépticas ou negras, vazamentos das redes coletoras de esgoto e a influência de rios contaminados na zona de captação de poços. Por isso, o nitrato é utilizado mundialmente como indicador de poluição das águas subterrâneas, em virtude da sua alta mobilidade, podendo atingir extensas áreas (VARNIER et al., 2010).

No Brasil, a carência de saneamento nas zonas urbanas vem resultando em elevadas concentrações de nitrato nas águas subterrâneas, além da presença de bactérias patogênicas e de vírus. Ademais, nas duas últimas décadas houve um grande aumento das áreas cultivadas, onde o uso intensivo de fertilizantes nitrogenados, orgânicos ou sintéticos, favoreceu o aparecimento de nitrato nas águas subterrâneas de áreas rurais, devendo também ser consideradas outras fontes, como a criação de animais (MMA, 2006).

Alguns estudos realizados comprovaram que as áreas urbanas de diversos municípios do Estado de São Paulo estão convivendo com esse problema, incluindo grandes centros

contidos na área de estudo, como Bauru (GIAFFERIS; OLIVEIRA, 2006; HIRATA, 2000; VARNIER et al., 2012) e Marília (VARNIER et al., 2012).

Varnier et al. (2012) estabeleceram a correspondência entre as concentrações mais elevadas de nitrato e as áreas mais antigas e densamente ocupadas de núcleos urbanos, onde há a presença de fossas desativadas e redes coletoras de esgotos obsoletas, com maior possibilidade de vazamentos. Desse modo, foi possível avaliar as tendências de incremento nas concentrações de nitrato nas águas subterrâneas, ao longo do tempo e espaço, frente aos padrões de ocupação urbana nos municípios de Bauru, Marília e Presidente Prudente.

2.3 CONTEXTO GEOLÓGICO E HIDROGEOLÓGICO

Nesse item, são exibidas as principais características do Grupo Bauru no Estado de São Paulo, no que se refere à localização, composição litológica, descrição das unidades estratigráficas e hidroestratigráficas, bem como os fatores que determinam as propriedades hidrodinâmicas do Sistema Aquífero Bauru.

2.3.1 O Grupo Bauru no Estado de São Paulo

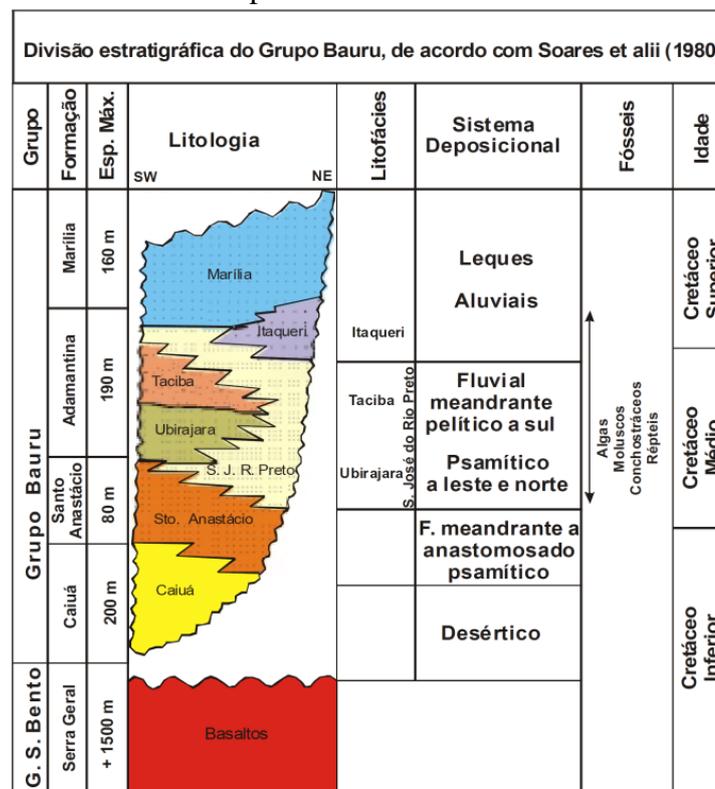
Localizado no Planalto Ocidental Paulista, o Grupo Bauru perfaz uma superfície de 117.000 km², que corresponde a aproximadamente 47% do território paulista (DAEE, 1990).

No Estado de São Paulo, os sedimentos do Grupo Bauru repousam sobre os basaltos da Formação Serra Geral, por meio de discordância erosiva (ALMEIDA et al., 1981; BRANDT NETO et al., 1977; RICOMINI et al., 1981; SOARES et al., 1980). Localmente, as rochas do Grupo Bauru se assentam sobre sedimentos das formações Botucatu e Pirambóia, como por exemplo, a região de Bauru e Agudos. A espessura média desses sedimentos é de 100 metros, ultrapassando 300 metros na região do Planalto Residual de Marília (PAULA e SILVA; CAVAGUTTI, 1992; SUGUIO et al., 1977).

As rochas do Grupo Bauru são constituídas, predominantemente, por sedimentos siliciclásticos continentais, depositados na porção centro-sul da Plataforma Sul-Americana, durante o último episódio significativo de sedimentação dessa unidade geotectônica, acompanhadas de magmatismo alcalino em pontos dispersos da Bacia do Paraná, como Lajes/SC, Iporá/GO e Taiúva/SP. Litologicamente, essa sucessão é caracterizada por arenitos, arenitos argilosos, carbonáticos ou não, siltitos, lamitos e argilitos, apresentando pontualmente conglomerados e camadas calcárias (DAEE, 1976).

Soares et al. (1980) compilaram diversos trabalhos anteriores que versavam sobre o mapeamento regional, propondo a primeira divisão formal da estratigrafia do Grupo Bauru, considerada clássica e amplamente aceita pela comunidade científica. Nessa proposição, a unidade Bauru foi elevada à categoria de Grupo, subdividindo-o nas formações Caiuá, Santo Anastácio, Adamantina (incluindo as litofácies Ubirajara, Taciba e São José do Rio Preto) e Marília, cuja base correspondia às litofácies Itaqueri (Figura 4).

Figura 4 - Proposta clássica de subdivisão estratigráfica dos sedimentos cretáceos suprabasálticos.



Fonte: Soares et al. (1980).

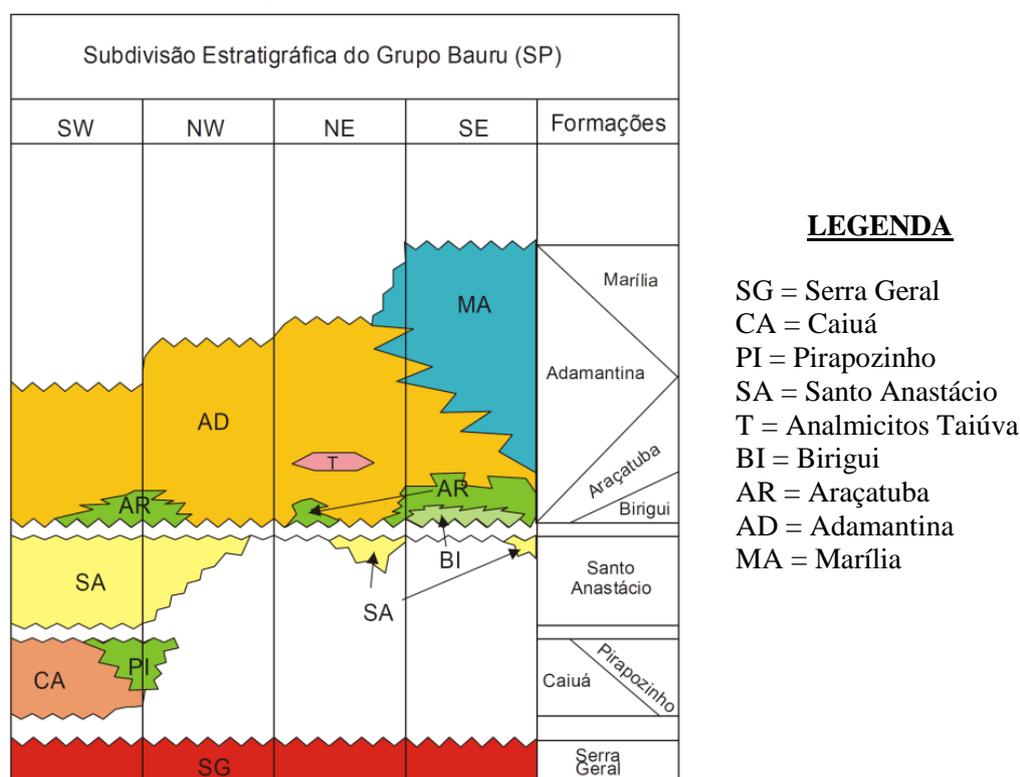
No entendimento de Fernandes (1992), o processo de sedimentação dessa sequência estratigráfica, ocorrido num cenário de evolução geológica diferenciada na Bacia do Paraná e delimitado por discordâncias erosivas de caráter continental no topo e na base, seria a justificativa para a individualização desses depósitos numa unidade geotectônica independente, denominada de “Bacia Bauru”.

A deposição na Bacia Bauru iniciou-se com a sedimentação do arenito Caiuá, na região do Pontal do Paranapanema, estendendo-se em seguida no sentido norte e nordeste, com a sedimentação dos arenitos Santo Anastácio e Adamantina. Por último, formaram-se embaciamentos localizados, onde se depositou a Formação Marília (ALMEIDA et al., 1981).

O estudo de litofácies através de descrição faciológica e estudos geofísicos de subsuperfície têm mostrado grande variabilidade dos depósitos sedimentares do Grupo Bauru, gerando redefinições de formações ou a proposição de novas unidades.

A partir de perfilagens geofísicas de poços e da descrição de amostras de calhas, Paula e Silva (2003) e Paula e Silva et al. (2005) propuseram a manutenção da subdivisão clássica de Soares et al. (1980), adicionando ao Grupo Bauru duas novas unidades: as formações Pirapozinho e Birigui, além de incluir a Formação Araçatuba (Figura 5), proposta de divisão estratigráfica adotada para a elaboração do presente estudo.

Figura 5 - Relações entre as unidades litoestratigráficas do Grupo Bauru nos diferentes compartimentos do Estado de São Paulo.

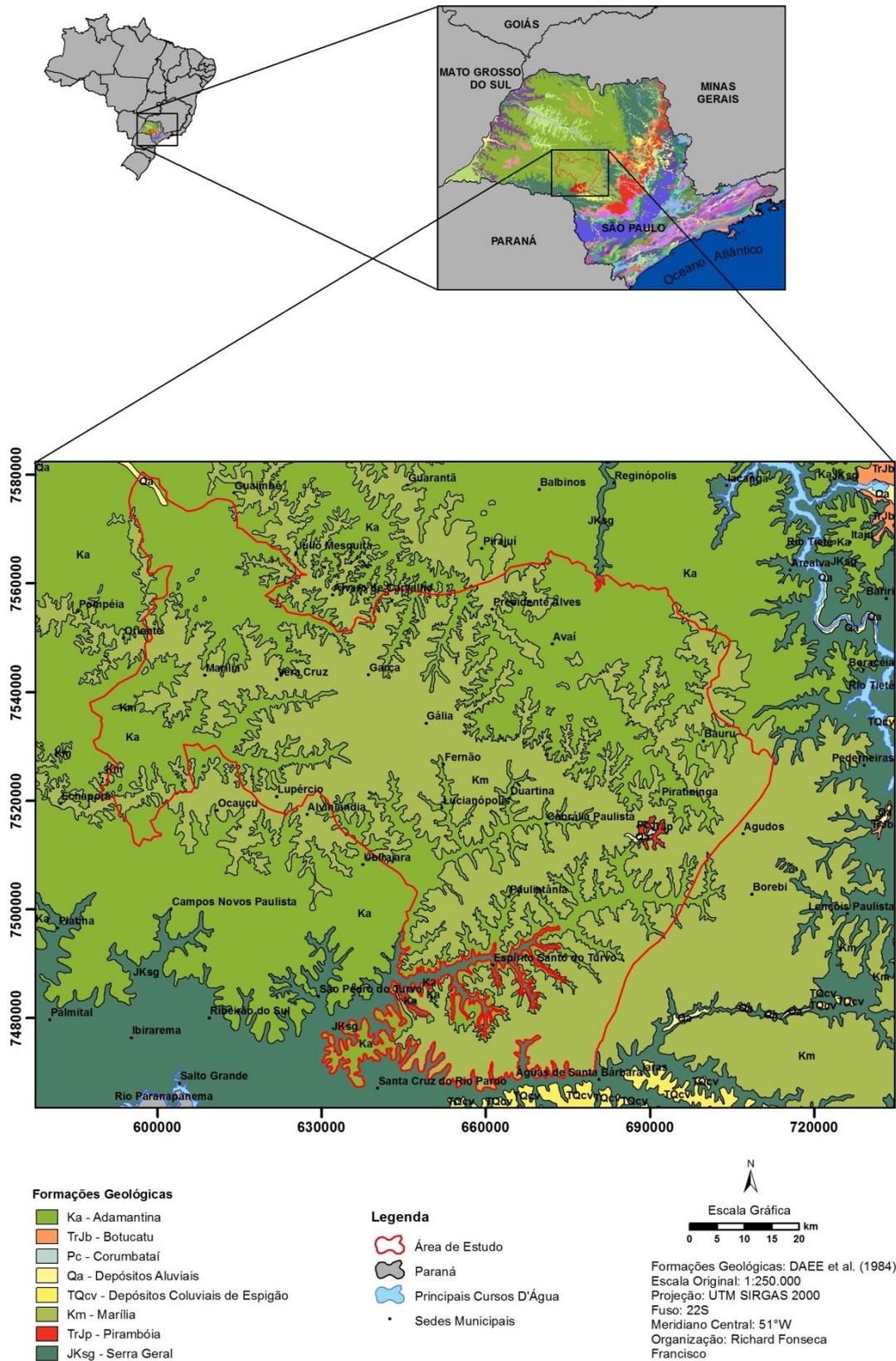


Fonte: Paula e Silva (2003).

2.3.2 Geologia Local

De acordo com o Mapa Geológico do Estado de São Paulo (DAEE et al., 1984), na área de estudo predominam as formações Adamantina e Marília. Localmente, são encontrados depósitos aluvionares, restritos às planícies dos principais cursos d’água. Secundariamente, ocorrem pequenos afloramentos das formações Pirambóia e Corumbataí, concentrados no município de Piratininga (Figura 6).

Figura 6 - Mapa das formações geológicas existentes na área de estudo.



Fonte: Adaptado de DAEE et al. (1984).

A Formação Corumbataí integra o conjunto de rochas do Grupo Passa Dois, constituindo-se em sua seção superior por uma sequência de argilitos e arenitos finos, argilosos, regular a bem classificados, esverdeados, arroxeados e avermelhados, recobrimo-se em discordância pela Formação Pirambóia (MEZZALIRA et al., 1981). Cabe ressaltar que a Formação Corumbataí é correlata à Formação Estrada Nova, sendo os dois nomes considerados sinônimos. Na porção basal, apresenta siltitos, argilitos e folhetos cinzentos a roxo-acinzentados nos afloramentos, podendo conter cimentação calcária (GONÇALVES, 1986).

Pertencente ao Grupo São Bento, a Formação Pirambóia compreende uma sucessão predominantemente arenosa, de granulação fina a média, teor de argila crescente em direção à base, com ocorrência local de arenitos grossos a conglomeráticos e presença de intercalações pouco espessas de lamitos avermelhados, mais frequentes nas porções basais (SOARES, 1975).

A porção superior da Formação Pirambóia foi caracterizada como fácies de canais entrelaçados, com a presença de arenitos médios a grossos, bem como arenitos conglomeráticos, depositados durante uma fase de tectonismo intenso, em ambiente deposicional eólico úmido, com fácies de ambiente fluvial (CAETANO-CHANG, 1997).

Soares et al. (1980) definiram a Formação Adamantina como um conjunto de fácies, compostas por arenitos de granulometria fina a muito fina, cor rósea a castanha, ocorrendo estratificações cruzadas, alternadas com lamitos, siltitos e arenitos lamíticos, castanho-avermelhados a cinza-acastanhados, maciços ou com acamamento plano-paralelo grosseiro. Frequentemente, esses sedimentos apresentam marcas de onda e microestratificações cruzadas, inclusive ocorrências de seixos de argilito, cimento e nódulos carbonáticos.

Na porção oeste do Estado de São Paulo, a Formação Adamantina se estende por uma vasta área, constituindo os terrenos da maior parte do Planalto Ocidental (ALMEIDA et al., 1981; MELO et al., 1982). Essa unidade aflora em praticamente toda a área de estudo, exceto nas regiões onde se encontra recoberta pela Formação Marília, cujo contato ocorre por interdigitação.

Segundo a descrição de Paula e Silva et al. (1994), em subsuperfície essa formação caracteriza-se pela presença de arenitos avermelhados a acastanhados, finos a muito finos, argilosos, carbonáticos e quartzosos, com intercalação de lamitos marrons a avermelhados.

De modo geral, as maiores espessuras da Formação Adamantina ocorrem nas porções ocidentais dos espigões entre os grandes rios. Atinge 160 metros entre os rios São José dos Dourados e Peixe, 190 metros entre os rios Santo Anastácio e Paranapanema e 100 a 150

metros entre os rios Peixe e Turvo, adelgaçando-se dessas regiões em direção a leste e nordeste (SOARES et al., 1980). Os autores citados concluíram que o ambiente deposicional corresponde a um sistema fluvial meandrante pelítico a sul, tornando-se psamítico a leste e a norte, com transição parcial para um sistema entrelaçado.

A Formação Marília ocorre na porção centro-sul do Estado de São Paulo, entre os médios vales dos rios Tietê e Paranapanema, com ocorrência restrita quando comparada às demais formações do Grupo Bauru. Depositou-se num embaciamento no término da deposição Bauru, em situação parcialmente marginal, repousando sobre a Formação Adamantina e, mais para leste, diretamente sobre os basaltos Serra Geral (MELO et al., 1982).

Na borda oriental da bacia, a Formação Marília apresenta contato inferior discordante com as rochas basálticas. O contato com a Formação Adamantina é concordante interdigitado na maioria de sua área de ocorrência, sugerindo contemporaneidade entre os processos de sedimentação dessas unidades (PAULA e SILVA, 2003).

A princípio, Soares et al. (1980) descreveram essa formação como sendo composta por arenitos grossos a conglomeráticos, com grãos angulosos, teor de matriz variável, seleção pobre, ricos em feldspatos, minerais pesados e minerais instáveis. Ocorre em camadas com espessura média de 1 a 2 metros, maciços ou com acamamento incipiente, subparalelo e descontínuo, raramente apresentando estratificação cruzada de médio porte, com seixos concentrados nos estratos cruzados. São raras as camadas descontínuas de lamitos vermelhos e de calcários.

A cimentação dessa unidade e a presença de nódulos carbonáticos disseminados nos sedimentos ou concentrados em níveis ou zonas são frequentes e expressam uma característica peculiar da Formação Marília, cuja matriz argilo-siltosa ocorre em pequena quantidade (ALMEIDA et al., 1981; SUGUIO; BARCELOS, 1983).

Paula e Silva (2003) descreveu a predominância de depósitos arenosos e finas intercalações de material pelítico, com escassa matriz argilosa. O autor supracitado mencionou a tendência de diminuição dos teores de argila em direção ao topo da Formação Marília, característica considerada indicativo do assoreamento da bacia de sedimentação.

A sedimentação dessa unidade ocorreu num embaciamento restrito, em regimes torrenciais característicos de leques aluviais, com deposição e cimentação de detritos carbonáticos em clima semiárido (FERNANDES; COIMBRA, 1996; SOARES et al., 1980).

A espessura do pacote de sedimentos da Formação Marília apresenta redução no sentido de norte para sul (IPT, 1981a). No município de Marília, a espessura máxima dos

sedimentos atinge 160 metros e, em Monte Alto, é de aproximadamente 150 metros, sendo recobertos por sedimentos cenozóicos em alguns pontos (SOARES et al., 1980).

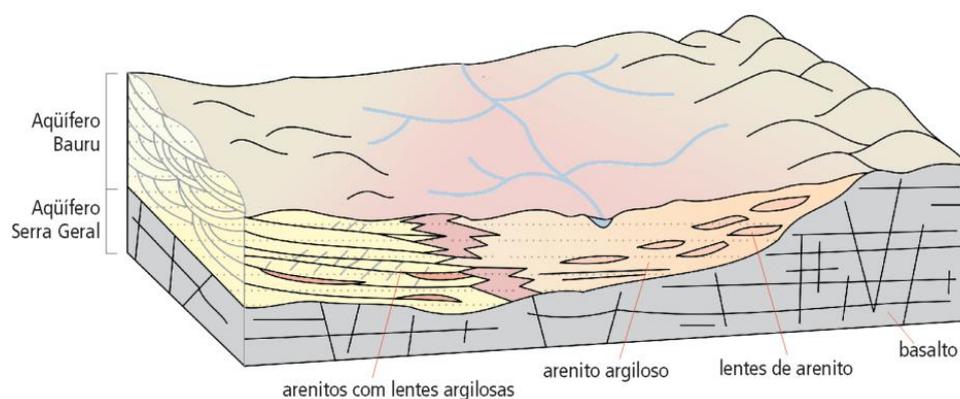
Devido à escala do mapeamento, na área de estudo ocorrem inexpressivamente depósitos aluvionares originados durante o Cenozóico, que recobrem principalmente os arenitos das formações Adamantina e Marília, inclusive os fundos de canais, margens e planícies de inundação dos rios. Esses materiais sedimentares são compostos de cascalheiras, areias, siltes, argilas e conglomerados basais, resultantes dos processos de erosão, transporte e deposição a partir de diversas áreas fontes de sedimentos (DAEE et al., 1984).

2.3.3 O Sistema Aquífero Bauru

O Sistema Aquífero Bauru (SAB) é uma unidade hidrogeológica constituída pelas rochas sedimentares do Grupo Bauru, apresentando extensão regional, superfície contínua, livre a semiconfinada, com espessura média de 100 metros, entretanto, pode ultrapassar 300 metros (DAEE, 1974, 1976, 1979). Em virtude de sua área de ocorrência ser totalmente aflorante em superfície, isto é, não existir qualquer outra unidade geológica que confine suas águas, a recarga ocorre por toda a sua extensão, diretamente através da infiltração das precipitações atmosféricas, que são da ordem de 1.300 mm/ano (DAEE, 2000; IRITANI; EZAKI, 2009).

Esse sistema é considerado moderadamente permeável, devido ao teor relativamente alto de material argiloso e siltoso e às intercalações entre camadas permeáveis e impermeáveis (Figura 7) (DAEE, 1976).

Figura 7 - Modelo conceitual hidrogeológico do Sistema Aquífero Bauru.



Fonte: Iritani e Ezaki (2009).

Por essa razão, as vazões obtidas em perfurações de poços são extremamente variáveis, considerando a diversidade litofaciológica existente, a qual contata lateral e vertical, sedimentos com diferentes características de porosidade e permeabilidade (PAULA e SILVA, 2003). Em seu trabalho, Vieira (1981) também observou esse aspecto, ao ressaltar que a utilização da nomenclatura “Aquífero Bauru” nem sempre é adequada, uma vez que há mais de um aquífero ou autênticos aquícludes.

Nesse sentido, a produtividade desse “sistema aquífero” é heterogênea e resulta da combinação entre a textura, teor de cimento, porosidade e a permeabilidade das rochas. Porcentagens de silte e argila acima de 10% são suficientes para reduzir a permeabilidade das rochas, tornando-as impermeáveis do ponto de vista prático. Analogamente, o cimento carbonático exerce influência sobre a permeabilidade, sendo que, concentrações acima de 10% podem representar uma barreira eficaz à movimentação da água (BARCHA, 1980).

Nas áreas onde predominam os arenitos das formações Marília e Adamantina, o Sistema Aquífero Bauru apresenta vazões entre 3 e 20 m³/h, devido à intensa cimentação dos sedimentos e à existência de camadas argilosas. Em regiões de ocorrência mais restrita, onde predominam os sedimentos da Formação Santo Anastácio, as vazões desse sistema alcançam valores mais significativos, com variação entre 20 e 50 m³/h. Nas áreas de ocorrência da Formação Caiuá, as vazões exploráveis são ainda mais expressivas e variam entre 20 e 200 m³/h (DAEE, 1990).

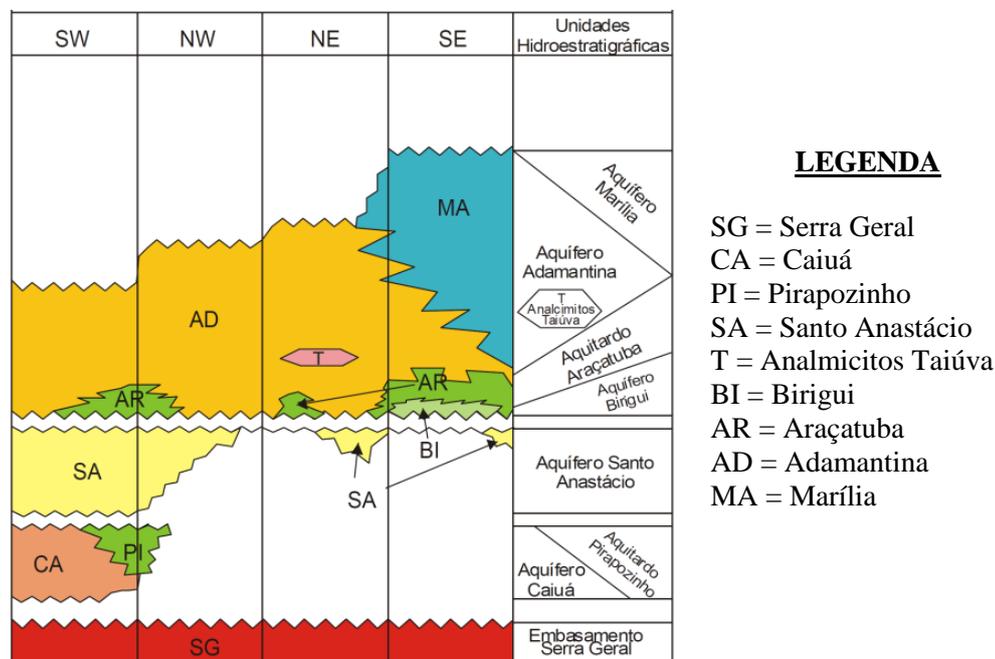
Com base nos limites, abrangência regional, condições de armazenamento e circulação de água, o DAEE (1979) propôs a separação na denominação das rochas do Sistema Aquífero Bauru em Bauru Médio/Superior, composto pelas formações Marília e Adamantina, e Bauru Inferior/Caiuá, constituído pelas formações Caiuá e Santo Anastácio.

Para a unidade hidrogeológica Bauru Médio/Superior, foram encontrados valores de condutividade hidráulica entre 0,1 e 0,4 m/d e transmissividade aparente de 10 a 50 m²/d, com superfície livre a localmente confinada. Para a unidade Bauru Inferior/Caiuá, determinaram-se valores de condutividade hidráulica e transmissividade aparente nas faixas entre 1 e 3 m/d, 100 e 300 m²/d, respectivamente (DAEE, 1979).

Posteriormente, Paula e Silva (2003) dividiu o Sistema Aquífero Bauru em unidades hidroestratigráficas correspondentes aos Aquíferos Caiuá, Santo Anastácio, Birigui, Adamantina e Marília, inclusive os Aquitardos Pirapozinho e Araçatuba (Figura 8). Segundo esse autor, essa subdivisão hidroestratigráfica fundamentada na litoestratigrafia de subsuperfície, justifica-se em razão das particularidades litológicas presentes em cada formação, as quais, por sua vez, governam as propriedades hidráulicas dessas unidades. Desse

modo, foi admitida uma correspondência entre as unidades litoestratigráficas e as hidroestratigráficas, na partição do Sistema Aquífero Bauru.

Figura 8 - Divisão hidroestratigráfica do Sistema Aquífero Bauru no Estado de São Paulo.



Fonte: Paula e Silva (2003).

Com base na proposta de Paula e Silva (2003), na área de estudo ocorrem os Aquíferos Adamantina e Marília, que correspondem à unidade hidrogeológica Bauru Médio/Superior (DAEE, 1979).

O Aquífero Marília é representado por uma sucessão bastante homogênea, predominantemente arenosa, de granulometria fina a grossa, com baixo conteúdo argiloso, intercalações delgadas de material pelítico e zonas muito carbonáticas, sendo considerado de extensão regional, contínuo, livre a semiconfinado. Frequentemente, nessa sucessão há formação de aquíferos suspensos nas zonas de alteração superficiais da unidade, devido à presença de estratos subjacentes, relativamente impermeáveis, isolando o corpo aquoso principal (PAULA e SILVA, 2003).

Prandi (2010) ressalta que apesar de ser constituído por arenitos grossos a conglomeráticos, com grãos angulosos, o Aquífero Marília possui características hidrodinâmicas bastante desfavoráveis, quando comparadas às unidades aquíferas subjacentes, devido à excessiva cimentação por carbonatos do tipo caliche, que tornou seus sedimentos praticamente impermeáveis. Conseqüentemente, a reduzida permeabilidade desses

sedimentos retarda o tempo de trânsito de água e de possíveis contaminantes nesse meio aquífero.

O Aquífero Adamantina é considerado de extensão regional, contínuo, livre a semiconfinado, estando recoberto apenas nos locais de ocorrência da Formação Marília e inexistente no extremo sudoeste paulista, devido a processos erosivos.

No que se refere a sua composição, o Aquífero Adamantina é heterogêneo e, assim como o Aquífero Marília, apresenta cimentação carbonática nos seus sedimentos, todavia, com menor intensidade. Por esse motivo, nesse aquífero predominam os sedimentos com permeabilidade moderada, bem como fluxo d'água anisotrópico, características que decorrem, principalmente, das variações de permeabilidade dos sedimentos, em função do maior ou menor teor de argila da matriz, ou de camadas pelíticas que se intercalam aos corpos arenosos (PAULA e SILVA, 2003).

2.4 VULNERABILIDADE E ÁREAS CONTAMINADAS

Segundo o estudo “*Mapeamento da Vulnerabilidade e Risco de Poluição das Águas Subterrâneas do Estado de São Paulo*” (IG/CETESB/DAEE, 1997), a área de estudo apresenta vulnerabilidade baixa à média.

De modo geral, os locais com baixa vulnerabilidade se concentram nas áreas de ocorrência da Formação Marília, devido à abundante cimentação carbonática dos seus sedimentos, fator já discutido anteriormente. As regiões com média vulnerabilidade correspondem aos sedimentos moderadamente cimentados da Formação Adamantina, os quais são relativamente mais permeáveis que os da Formação Marília.

É oportuno ressaltar que esse trabalho foi um dos pioneiros no campo da avaliação da vulnerabilidade e gestão de aquíferos no Estado de São Paulo. Todavia, foi elaborado na escala 1:500.000 e disponibilizado aos usuários na escala 1:1.000.000, cujo nível de abrangência da análise corresponde ao reconhecimento preliminar de áreas suscetíveis à contaminação. Desse modo, mapeamentos em escalas maiores podem detalhar melhor a litologia e as propriedades hidrodinâmicas e hidrogeológicas de um aquífero, aclarando dúvidas e dirimindo incertezas quanto às classes de vulnerabilidade obtidas numa dada área, com resultados mais adequados à gestão municipal das águas subterrâneas.

A partir dessa cartografia de vulnerabilidade, foi promulgada a Resolução SMA nº 14 de 05 de março de 2010, que definiu diretrizes técnicas para o licenciamento de

empreendimentos em áreas potencialmente críticas para uso da água subterrânea no Estado de São Paulo (SMA, 2010). Nesse documento, foram definidas as áreas de alta vulnerabilidade e mais seis áreas potenciais de restrição, controle de captação e uso das águas subterrâneas.

Nas áreas de alta vulnerabilidade, o licenciamento de empreendimentos potencialmente impactantes, que captam vazões superiores a 50 m³/h ou que disponham efluentes líquidos, resíduos ou substâncias no solo, ficou condicionado à apresentação de estudo hidrogeológico que incluísse a avaliação da vulnerabilidade e balanço hídrico, inclusive um programa de monitoramento sistemático das águas subterrâneas.

Na área de estudo, existem dois pequenos fragmentos de áreas de alta vulnerabilidade, situados nos municípios de Marília, Álvaro de Carvalho, Vera Cruz e Garça. O município de Bauru foi considerado uma das seis áreas potenciais de restrição, controle de captação e uso das águas subterrâneas.

De acordo com a CETESB (2011), foram cadastradas 23 áreas contaminadas dentro dos limites da área de estudo, concentradas em Marília e Bauru (Quadro 3 e Figura 9). Esse número é considerado relativamente pequeno se comparado ao registrado nas regiões metropolitanas de São Paulo e Campinas. A maioria dos pontos de contaminação existentes na área de estudo resulta das atividades de postos de combustíveis, cujos principais contaminantes liberados no subsolo são solventes aromáticos e combustíveis líquidos.

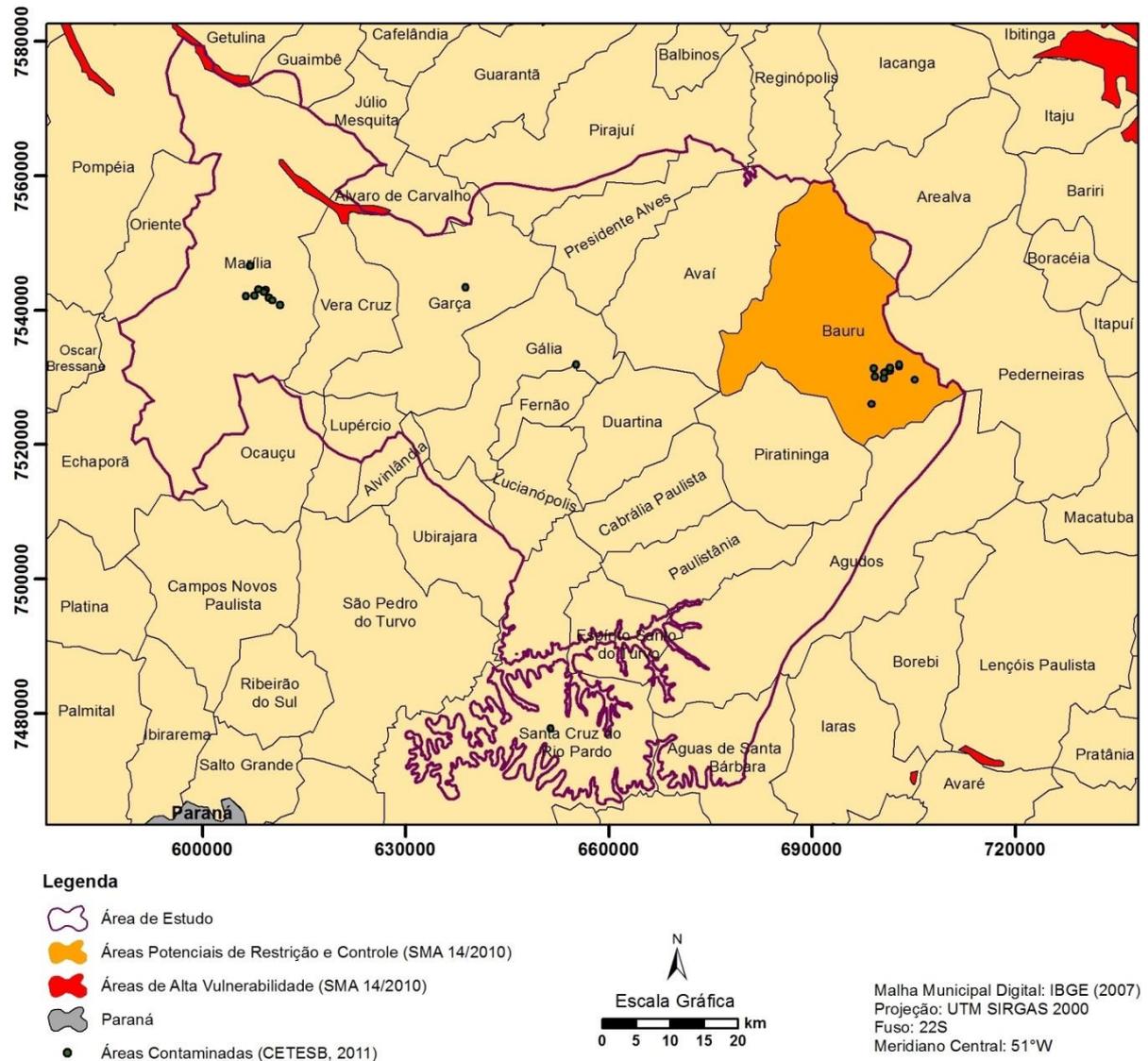
Quadro 3 - Relação de áreas contaminadas cadastradas na área de estudo.

<i>Municípios</i>	<i>Atividade</i>	<i>Contaminantes</i>	<i>UTM E (m)</i>	<i>UTM N (m)</i>
BAURU	indústria	metais	705.186	7.529.627
	indústria	metais	702.900	7.531.687
	posto de combustível	solventes aromáticos e PAHs	700.605	7.529.895
	posto de combustível	solventes aromáticos e PAHs	698.758	7.526.041
	posto de combustível	solventes aromáticos	699.267	7.530.150
	comércio	combustíveis líquidos, solventes aromáticos, PAHs e metais	700.850	7.530.750
	comércio	combustíveis líquidos, solventes aromáticos e PAHs	701.492	7.530.922
	acidentes	combustíveis líquidos, solventes aromáticos e PAHs	701.507	7.531.404
	indústria	metais	702.890	7.531.930
	comércio	combustíveis líquidos, solventes aromáticos, PAHs e metais	700.649	7.530.721
	comércio	solventes aromáticos e PAHs	699.100	7.531.350
	GÁLIA	posto de combustível	combustíveis líquidos e solventes aromáticos	655.170
GARÇA	posto de combustível	solventes aromáticos	638.841	7.543.435

Municípios	Atividade	Contaminantes	UTM E (m)	UTM N (m)
MARÍLIA	posto de combustível	solventes aromáticos	609.758	7.541.878
	posto de combustível	combustíveis líquidos	607.017	7.546.622
	posto de combustível	solventes aromáticos	608.237	7.543.080
	posto de combustível	solventes aromáticos	610.253	7.541.448
	posto de combustível	solventes aromáticos	607.650	7.542.150
	comércio	solventes aromáticos	609.290	7.542.967
	posto de combustível	solventes aromáticos	606.425	7.542.128
	posto de combustível	solventes aromáticos e PAHs	609.018	7.542.655
	posto de combustível	solventes aromáticos	611.417	7.540.755
SANTA CRUZ DO RIO PARDO	posto de combustível	solventes aromáticos e PAHs	651.400	7.477.700

Fonte: CETESB (2011).

Figura 9 - Áreas contaminadas, de alta vulnerabilidade e áreas potenciais de restrição, controle de captação e uso das águas subterrâneas.



Fonte: Elaborado pelo autor.

CAPÍTULO 3 – FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

No presente capítulo, apresentam-se os conteúdos fundamentais ao entendimento tanto dos procedimentos metodológicos propostos quanto dos resultados obtidos, com enfoque em quatro temas centrais, quais sejam: hidrogeologia, geofísica, vulnerabilidade natural de aquíferos e a utilização do geoprocessamento na cartografia de vulnerabilidade.

3.1 HIDROGEOLOGIA

Nesse item, são abordados conceitos básicos sobre o ciclo hidrológico, a ocorrência e transporte das águas subterrâneas e a classificação dos tipos de aquíferos, segundo a porosidade das rochas e a pressão submetida ao sistema.

3.1.1 Base Conceitual

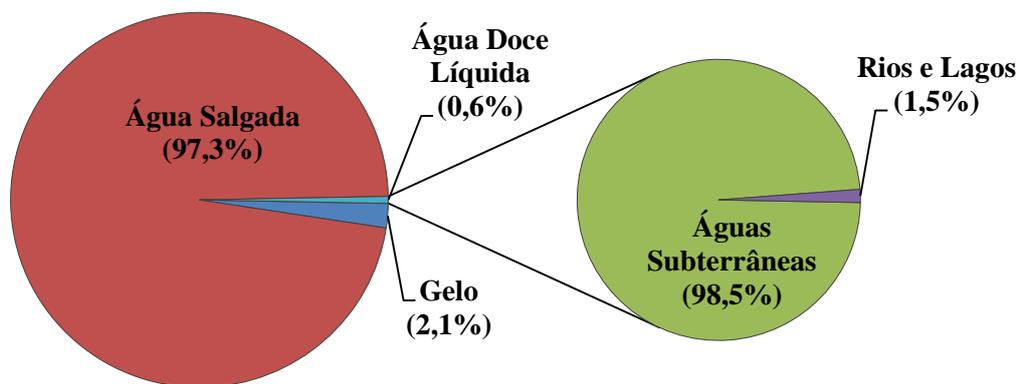
Indubitavelmente, a água é um elemento essencial à manutenção da vida no planeta Terra e indispensável ao desenvolvimento humano. Sabe-se que, dos 1.360.000.000 km³ de água existente (Tabela 1), somente 2,7% é água doce (Figura 10). Desse percentual, apenas 0,6% está no estado líquido e aproximadamente 98,5% encontram-se na forma de água subterrânea, que constitui uma parcela do sistema circulatório de água do ciclo hidrológico (ANA, 2002).

Tabela 1 - Distribuição de água na Terra.

<i>Tipo</i>	<i>Ocorrência</i>	<i>Volumes (km³)</i>	<i>%</i>
Água doce superficial	Rios	1.250	0,000092
	Lagos	125.000	0,0092
Água doce subterrânea	Umidade do solo	67.000	0,0043
	Até 800 metros	4.164.000	0,31
	Abaixo de 800 metros	4.164.000	0,31
Água doce sólida (gelo)	Geleiras e glaciais	29.200.000	2,05
Água salgada	Oceanos	1.320.000.000	97,30
	Lagos e mares salinos	105.000	0,0077
Vapor d'água	Atmosfera	12.900	0,00095
Total		1.360.000.000	100

Fonte: Adaptado de ANA (2002).

Figura 10 - Distribuição de água na Terra.



Fonte: Adaptado de ANA (2002).

Esses valores absolutos podem não representar a realidade existente em cada continente ou país, no que diz respeito à escassez ou abundância de água, visto que sua disponibilidade é bastante variável de uma região para outra. Alguns fatores são decisivos para a distribuição de recursos hídricos no planeta, tais como: variações climáticas naturais (temperatura e pluviosidade), cobertura vegetal, número de habitantes de uma determinada região e as atividades econômicas exercidas.

O ciclo hidrológico ou, ciclo da água (Figura 11), corresponde à constante movimentação e mudança de estado da água contida nos rios, lagos, oceanos, geleiras, continentes e na atmosfera.

Figura 11 - Ciclo hidrológico.



Fonte: USGS (2013).

Essa circulação se inicia com a evaporação direta da água, devido à energia solar incidente na superfície da Terra. Ao alcançar altitudes mais altas e frias da atmosfera, o vapor gerado se condensa e precipita na superfície terrestre em forma de chuva, granizo ou neve. Quando essa água chega ao solo, uma parcela retorna à atmosfera através da evaporação, uma parte percola no subsolo (60 a 70%), abastecendo os aquíferos e o remanescente, escoando superficialmente (30 a 40%), desembocando nos cursos d'água, lagos, mares e oceanos (ANA, 2002; FEITOSA; MANOEL FILHO, 2008).

Geralmente, as águas subterrâneas circulam e fluem constante e lentamente, por entre os poros do solo e das rochas sedimentares. Em alguns materiais geológicos, a circulação ocorre através de fraturas, que são estruturas resultantes da ruptura das rochas, devido à movimentação da crosta terrestre. Um dos parâmetros que interferem no fluxo das águas subterrâneas é a permeabilidade, pois sinaliza a facilidade com que a água flui através da rocha, considerando o tamanho e o volume de poros interconectados, forma, distribuição e a variação do tamanho dos grãos. A homogeneidade no tamanho e na distribuição dos grãos resulta numa maior interconexão entre os poros, aumentando a capacidade do aquífero em transmitir água (IRITANI; EZAKI, 2009).

Em termos hidrodinâmicos, a condutividade hidráulica (K) é uma medida da capacidade do aquífero em conduzir água sob a influência do gradiente de uma superfície potenciométrica, constituindo uma propriedade tanto do meio poroso como do fluido que o atravessa. Quanto maior a condutividade, mais facilmente o aquífero conduzirá água (CLEARY, 2013).

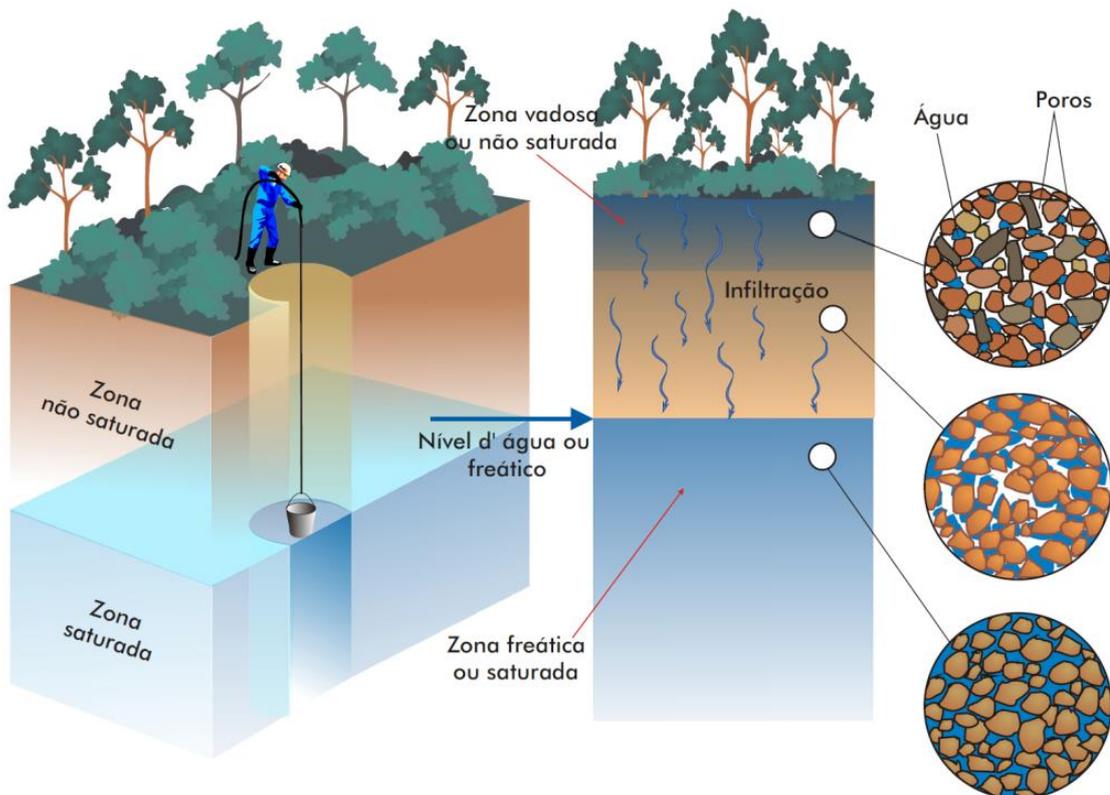
Essa propriedade possui dimensão de velocidade, que é a medida da capacidade (rapidez) do aquífero em permitir o fluxo de água por seus poros, considerando características do meio, tais como: porosidade, tamanho, distribuição, forma e arranjo das partículas; e, as características do fluido que está escoando (viscosidade e massa específica) (BRAGA, 2006; CABRAL, 2008).

Horton (1933) definiu a infiltração como sendo o fluxo em subsuperfície que percorre a zona de aeração em direção à superfície potenciométrica, a qual delimita o topo da zona saturada do solo e representa o contorno físico do lençol freático. Segundo o mesmo autor, o volume de água infiltrado e sua velocidade no aquífero estão condicionados a diversos fatores, tais como: uso e cobertura do solo, composição e grau de consolidação dos substratos geológicos, que determinam a porosidade e permeabilidade do aquífero, topografia, cobertura vegetal e a pluviosidade.

Esse processo natural é extremamente importante e vital, visto que além de recarregar os aquíferos, originar nascentes, fontes e pântanos, é responsável pela regularização da vazão dos rios (escoamento básico), sobretudo em épocas de estiagem, distribuindo-a ao longo de todo o ano. Desse modo, garante-se o suprimento de água para o abastecimento de populações, e simultaneamente, evita-se que os fluxos repentinos ocasionem inundações frequentes e de grande proporção (MMA, 2007; TUCCI; BELTRAME, 2000).

Ao se infiltrarem no solo, as águas pluviais atingem duas zonas verticais distintas do subsolo, divididas com base no grau de saturação em água (Figura 12).

Figura 12 - Distribuição da água no subsolo.



Fonte: Teixeira et al. (2000).

A primeira delas refere-se à zona não saturada, também denominada insaturada ou vadosa, cujos poros contêm ar, vapor d'água e água, subdividindo-se em três zonas: evaporação ou umidade, intermediária e capilar (Quadro 4). A segunda é a zona saturada, na qual os poros são completamente preenchidos por água (BEAR, 1972; REBOUÇAS et al., 2002).

Quadro 4 - Distribuição vertical das águas subterrâneas.

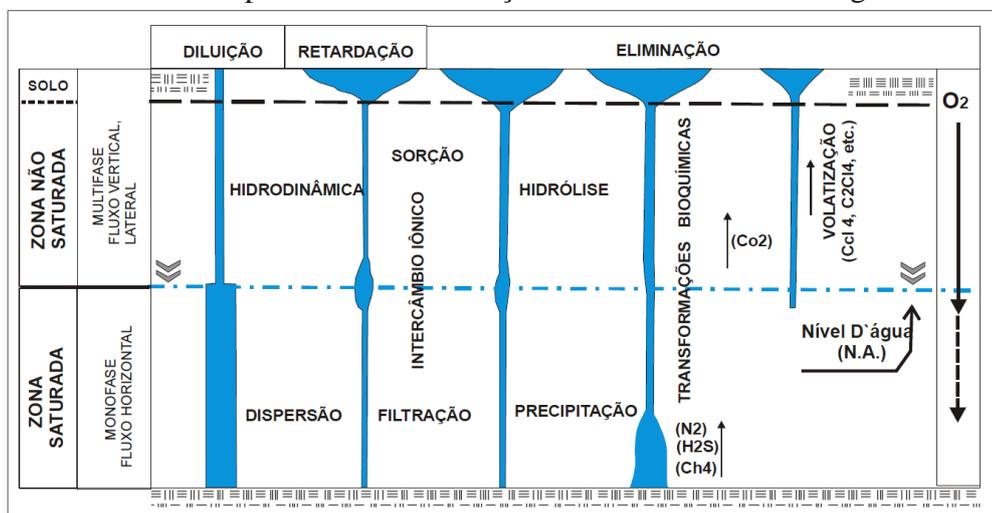
<i>Zonas Verticais</i>	<i>Características</i>
1. Zona não saturada, de aeração ou vadosa	Situa-se entre a superfície do terreno e a superfície freática e nela os poros estão parcialmente preenchidos por gases e água.
1.1. Zona de umidade ou de evaporação	Localiza-se entre os extremos radiculares da vegetação e a superfície do terreno.
1.2. Zona intermediária	Corresponde à porção entre o limite da ascensão capilar da água e o limite de alcance das raízes das plantas.
1.3. Zona capilar	Estende-se da superfície freática até o limite da ascensão capilar da água. Adota-se o conceito de franja capilar como sendo o limite abaixo do qual o solo é considerado praticamente saturado (aproximadamente 75% de água).
2. Zona saturada ou de saturação	Situa-se abaixo da superfície freática e nela todos os vazios (poros) estão preenchidos por água.

Fonte: Adaptado de Feitosa e Manoel Filho (2008).

A caracterização geológica e hidrodinâmica da zona não saturada são fundamentais, já que protege a zona saturada contra o avanço de muitos agentes poluidores, comportando-se com um verdadeiro filtro. Na zona insaturada, ocorre a atenuação natural dos contaminantes (Figura 13), caracterizada por reações físico-químicas como, por exemplo, a oxidação, redução, precipitação, volatilização e neutralização por adsorção iônica (filtração), sendo que muitas delas são intermediadas por microrganismos (GOWLER, 1983).

Além disso, na zona não saturada ocorre o primeiro estágio da infiltração natural para recarregar um aquífero, fornecendo a umidade necessária para o crescimento e desenvolvimento de espécies vegetais e de microrganismos.

Figura 13 - Síntese dos processos de atenuação de contaminantes nas águas subterrâneas.



Fonte: Gowler (1983).

3.1.2 Tipos de Aquíferos

Os aquíferos são estruturas geológicas que apresentam permeabilidade e porosidade interconectadas, capazes de armazenar e permitir o movimento de quantidades apreciáveis de água através delas (TODD, 1980). Rebouças et al. (2002) definem um aquífero como sendo uma formação geológica existente em subsuperfície, constituída essencialmente por rochas permeáveis, cujos poros, fraturas ou falhas são preenchidos por água ou outro fluido que permita a transmissão.

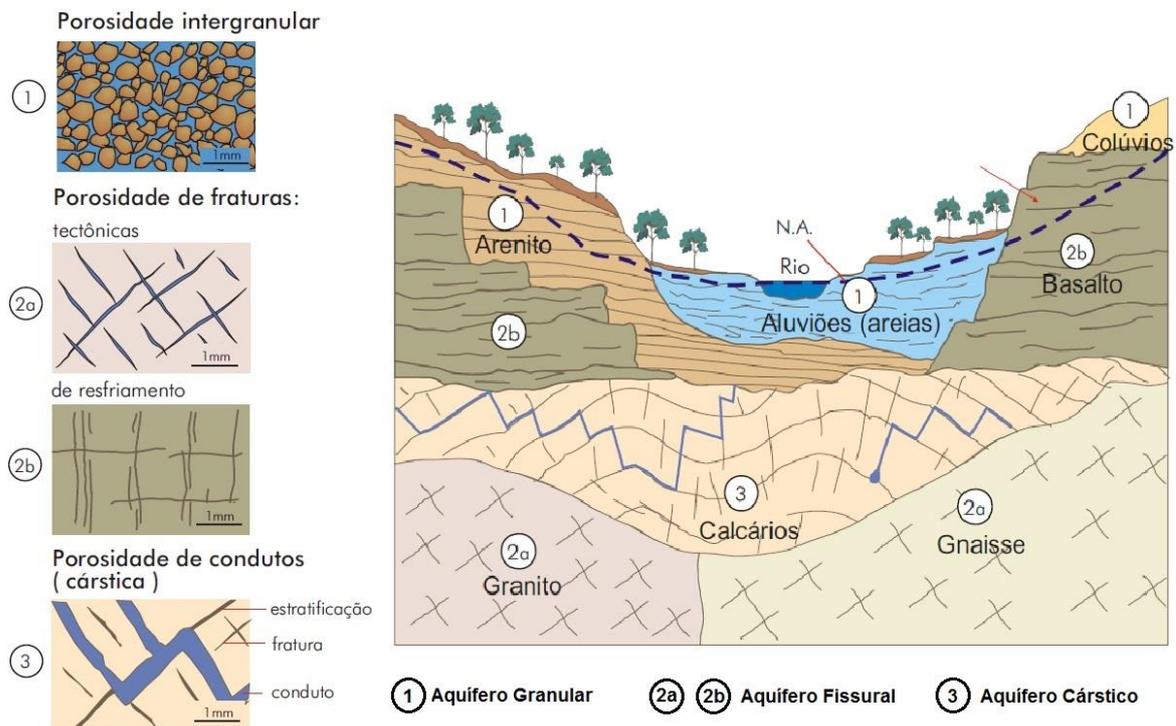
Borghetti et al. (2004) salientam que, a origem geológica das rochas (sedimentares, ígneas ou metamórficas) e a composição geológica em termos de porosidade/permeabilidade intergranular ou de fissuras, determinam a transmissividade e a capacidade de armazenamento, resultando em diferentes tipos de aquíferos.

Os aquíferos podem ser classificados com base na porosidade da rocha armazenadora e nas características hidráulicas, decorrentes da pressão a que esses sistemas estão submetidos (IRITANI; EZAKI, 2009). Segundo Feitosa e Manoel Filho (2008) (Figura 14), quanto à porosidade, os aquíferos podem ser:

- **Granulares ou porosos:** a água circula entre os poros ou espaços intergranulares de materiais com diferentes granulometrias (areia, silte e argila), configurando a denominada porosidade primária. De modo geral, esse tipo de aquífero é constituído por rochas sedimentares consolidadas, sedimentos inconsolidados e solos arenosos. São comumente encontrados em várzeas e em bacias sedimentares, onde ocorre o acúmulo de sedimentos, por exemplo, os Sistemas Aquíferos Guarani e Bauru. Em aquíferos granulares, o fluxo subterrâneo pode ocorrer em todas as direções, em virtude da homogeneidade da distribuição dos grãos na rocha. Por isso, diz-se que o meio aquífero é isotrópico;
- **Fissurais ou fraturados:** desenvolvem-se em rochas ígneas, metamórficas ou em rochas sedimentares silicificadas (como em algumas regiões da Formação Botucatu). A circulação da água ocorre através de discontinuidades intercomunicadas da rocha, caracterizando a porosidade secundária associada a falhas, fraturas e diáclases, provenientes da tectônica local. Por exemplo: o Aquífero Cristalino existente na Região Metropolitana de São Paulo. Como a água somente pode fluir por onde houver discontinuidades, que geralmente constituem caminhos preferenciais, o fluxo nesse caso é anisotrópico;

- **Cársticos:** formam-se em calcários e rochas dolomíticas. Após a dissolução da rocha, devido à circulação contínua da água, formam-se tubos ou condutos nas descontinuidades da rocha, permitindo a circulação da água. Por essa razão, também apresentam porosidade secundária e fluxo de água anisotrópico.

Figura 14 - Tipos de aquíferos quanto à porosidade.



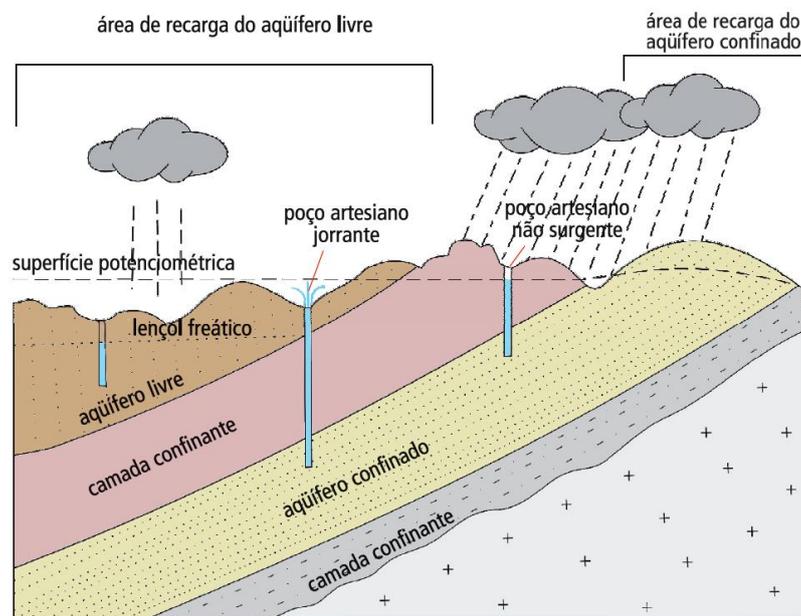
Fonte: Adaptado de Teixeira et al. (2000).

Com relação à pressão da água, os aquíferos dividem-se em (FEITOSA; MANOEL FILHO, 2008; CLEARY, 2013) (Figura 15):

- **Livre ou freático:** é formado por material permeável e situa-se muito próximo à superfície do terreno. A zona saturada tem contato direto com a zona insaturada, onde todos os pontos submetem-se à pressão atmosférica. Nessa situação, a água que infiltra no solo atravessa a zona não saturada, recarregando diretamente o aquífero. Os aquíferos livres são ainda classificados em aquíferos drenantes (base semipermeável) e não drenantes (base impermeável);
- **Confinado ou artesianos:** constitui-se de formações geológicas permeáveis, no entanto, é limitado no topo e na base por rochas com baixa permeabilidade (argila, folhelho, rocha ígnea maciça, entre outras). Não existe zona não

saturada. Nesse caso, o aquífero está submetido a uma pressão maior que a atmosférica, devido a uma camada confinante acima dele. Por isso, em poços cujas superfícies potenciométricas se localizam acima da superfície do terreno, a água jorra para além da zona aquífera, fenômeno chamado de artesianismo ou surgência natural. As áreas de recarga de aquíferos confinados são preferencialmente os aquíferos livres, através dos quais o excesso de águas pluviais penetra no subsolo por infiltração. Assim como os aquíferos livres, podem ser drenantes e não drenantes.

Figura 15 - Classificação dos aquíferos segundo seus níveis de pressão.



Fonte: Iritani e Ezaki (2009).

3.2 GEOFÍSICA

Nesse item, apresentam-se alguns aspectos gerais sobre a geofísica, com enfoque na geofísica aplicada. Nesse âmbito, são descritos o método da eletrorresistividade, a técnica da sondagem elétrica vertical, o arranjo *Schlumberger* e os parâmetros *Dar Zarrouk*, destacando a importância e a aplicabilidade dos principais produtos em estudos e avaliações ambientais, especialmente em etapas preliminares e de monitoramento.

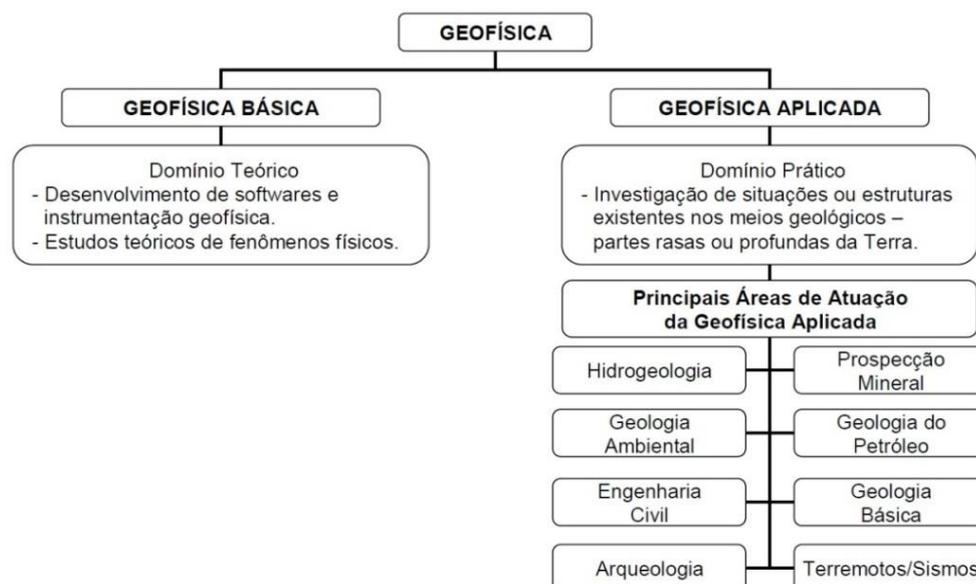
3.2.1 Generalidades

A geofísica pode ser definida como uma ciência direcionada ao estudo, localização e delimitação de estruturas/corpos presentes no interior da Terra. Para tanto, essa ciência utiliza os contrastes existentes entre as propriedades físicas desses corpos e as do meio circundante, baseando-se em medidas realizadas na superfície terrestre, interior de furos de sondagens e levantamentos aéreos (ORELLANA, 1972). Assim como ocorre em outras ciências, a geofísica divide-se em dois campos de atuação (Figura 16) (BRAGA, 2006; FIGUEROLA, 1974):

I. Geofísica Pura ou Básica: ocupa-se do estudo da gravidade, magnetismo, eletricidade e sismologia terrestres, assim como de estudos sobre a vulcanologia, geodinâmica, climatologia, oceanografia e outras ciências relacionadas com a física da Terra, limitando na teoria sua área de atuação. Além disso, suas atividades envolvem o desenvolvimento de *softwares* e instrumentação geofísica (Domínio Teórico);

II. Geofísica Aplicada ou Prospecção Geofísica: representa a ciência que trata da aplicação da Geofísica Pura, ou seja, é a arte de aplicar as ciências físicas ao estudo de partes mais profundas ou superficiais da Terra, a qual pode ser explorada pelo homem (Domínio Prático).

Figura 16 - Geofísica e suas principais áreas de atuação.

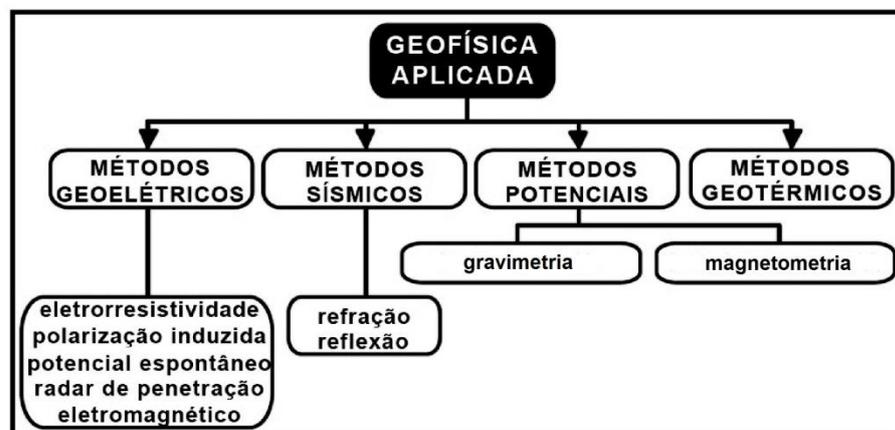


Fonte: Adaptado de Braga (2006).

Em alguns casos, a aplicação da geofísica é direcionada à resolução de problemas puramente geológicos, porém de grande interesse econômico. A geofísica aplicada é de extrema importância para o estudo e entendimento de diversas características do subsolo, essenciais à atuação da indústria petrolífera, prospecção e extração mineral, construção civil e à captação, investigação, remediação e monitoramento de águas subterrâneas.

Em função do parâmetro físico avaliado, a geofísica possui uma diversidade de métodos considerados não invasivos e não destrutivos (Figura 17), com destaque para os potenciais, sísmicos e geoeletricos (BRAGA, 2007).

Figura 17 - Principais métodos geofísicos aplicados.



Fonte: Braga (2007).

Os métodos potenciais (gravimetria e magnetometria) são denominados de campo natural, pois estudam as interferências que certas estruturas ou corpos ocasionam em campos físicos preexistentes. Por outro lado, os métodos sísmicos e os geoeletricos, exceto o potencial espontâneo e magnetotelúrico, são ditos artificiais, isto é, o campo físico a ser avaliado é gerado através de equipamentos adequados (ORELLANA, 1972).

É oportuno ressaltar que eventuais intervenções antrópicas no ambiente geológico podem modificar os diversos campos físicos e suas propriedades, interferindo negativamente na aquisição e utilização de dados, a partir da aplicação de um determinado método geofísico.

Conforme as intenções de um determinado estudo, deverá ser analisado qual o parâmetro físico contrastante será capaz de fornecer as informações necessárias ao enfrentamento do problema existente, para em seguida selecionar o método geofísico mais adequado para sua resolução.

Entre os principais métodos geofísicos disponíveis, destacam-se os métodos geoeletricos, uma vez que são amplamente utilizados no mundo inteiro, nas mais

diversificadas áreas do conhecimento, como a geologia ambiental, hidrogeologia, prospecção mineral e geologia de engenharia.

3.2.2 Método da Eletroresistividade e a Técnica da Sondagem Elétrica Vertical

Dentre os métodos geoeletricos, o método da eletroresistividade (ER) é um dos mais importantes e utilizados em estudos ambientais, principalmente nas etapas preliminares e de monitoramento. Resultados relevantes podem ser encontrados nos trabalhos de Moreira et al. (2012), Okoro et al. (2010), Moreira e Braga (2009) e Sainato et al. (2006).

Baseia-se na determinação de parâmetros relacionados ao fluxo de corrente elétrica, podendo ser utilizadas tanto fontes naturais de corrente (por exemplo, processos eletroquímicos), como fontes artificiais provenientes de baterias e geradores, que alimentam uma unidade transmissora de corrente (ORELLANA, 1972).

Telford et al. (2004) afirmam que a propriedade elétrica mais significativa dos materiais constituintes do subsolo é a resistividade, parâmetro físico inversamente proporcional à condutividade elétrica. Existem outras propriedades importantes, todavia, de menor relevância, quais sejam: a permeabilidade magnética (fator de influência indireta) e a constante dielétrica das rochas e dos minerais.

Segundo Braga (2008), a resistividade elétrica reflete algumas das principais características dos diversos tipos de materiais no ambiente geológico, possibilitando estimar seus estados, em termos de alteração, fraturamento, grau de saturação em água, entre outros, e até mesmo, identificando-os litologicamente, sem a necessidade de escavações ou perfurações que comumente são onerosas e demoradas.

A partir da resistividade elétrica, é possível somente a identificação e caracterização dos diferentes tipos de materiais existentes na zona saturada. Quando se trata de aquíferos livres, os valores de resistividade da zona não saturada são atípicos e se inserem numa ampla faixa de variação, não sendo possível identificar diretamente os materiais do horizonte insaturado, em termos litológicos. Contudo, os valores de resistividade obtidos para a primeira camada da zona saturada podem ser extrapolados para os sedimentos sobrepostos, desde que haja semelhança entre as litologias (BRAGA, 2008).

A resistividade elétrica dos materiais é obtida através da Lei de Ohm, considerando um condutor cilíndrico ou prismático, de composição homogênea, conforme ilustrado na Figura 18 e a Equação 1:

$$\rho = \frac{R \cdot S}{L} \quad (1)$$

Onde:

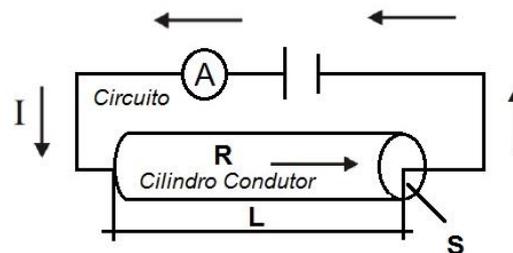
ρ = resistividade elétrica (ohm.m);

R = resistência elétrica (ohm);

S = área da seção transversal (m²);

L = comprimento do condutor (m).

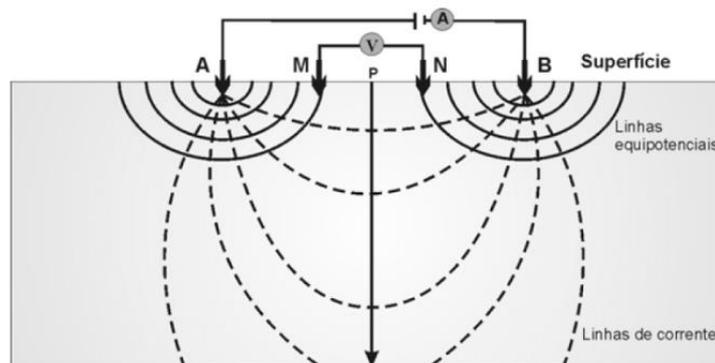
Figura 18 - Determinação da resistividade elétrica dos materiais.



Fonte: Elaborado pelo autor.

O método da eletrorresistividade consiste em introduzir corrente elétrica no solo, por meio de um dispositivo eletródico que, geralmente, é constituído por quatro eletrodos. Os eletrodos A e B são utilizados para aplicação da corrente em subsuperfície, conectando-se a um amperímetro (A) através de cabos elétricos. Os eletrodos M e N são convencionados como eletrodos de potencial, utilizados para medir a diferença de potencial gerada pelo circuito de corrente (Figura 19). Esse circuito é conectado a um voltímetro (V) capaz de medir a diferença de potencial entre eles (TELFORD et al., 2004).

Figura 19 - Arranjo para medidas de resistividade.



Fonte: Moreira (2009).

Segundo Orellana (1972), a resistividade aparente (ρ_a) em subsuperfície é calculada por meio da Equação 2, a seguir apresentada.

$$\rho_a = k \cdot \frac{\Delta V}{I} \tag{2}$$

Onde:

ρ_a = resistividade aparente (ohm.m);

ΔV = diferença de potencial (V);

I = intensidade da corrente elétrica (A);

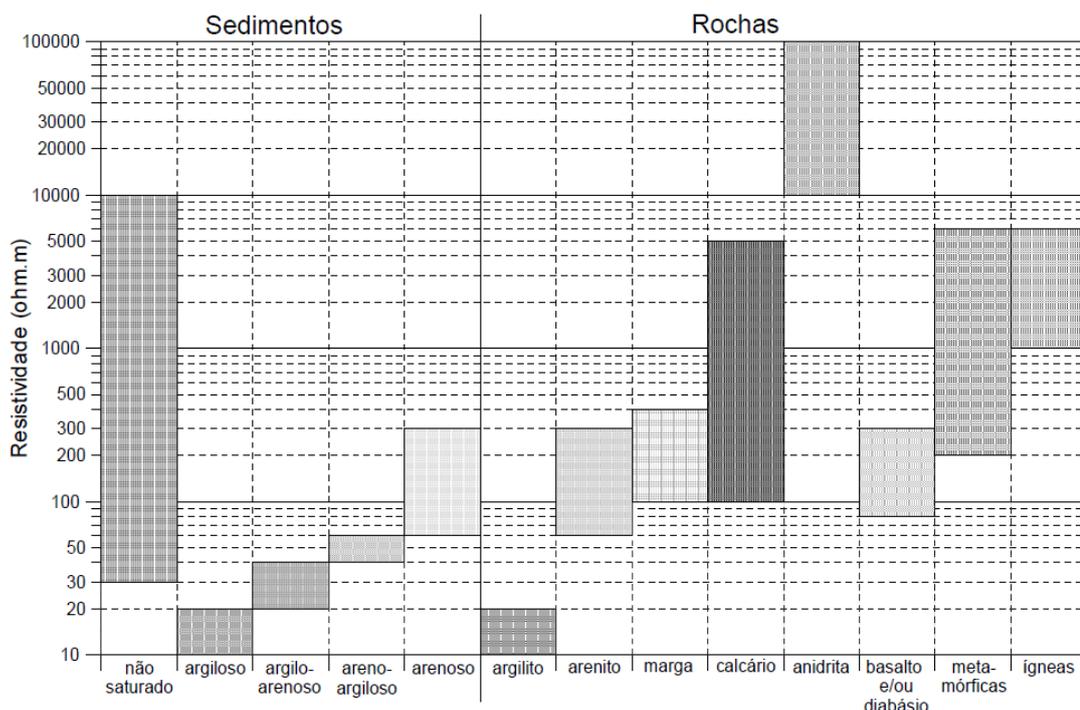
K = fator referente à disposição geométrica dos eletrodos, que pode ser obtido através da Equação 3, qual seja:

$$k = 2\pi \cdot \left(\frac{1}{AM} - \frac{1}{AN} - \frac{1}{BM} + \frac{1}{BN} \right)^{-1} \tag{3}$$

Denomina-se de resistividade aparente (ρ_a) o parâmetro físico obtido por meio da Equação 2, como decorrência da heterogeneidade do subsolo, considerando que as medidas obtidas representam uma média ponderada de todas as resistividades verdadeiras, num volume de material em subsuperfície relativamente grande (BRAGA, 2007).

A resistividade das rochas e sedimentos é função de várias condições locais, como conteúdo de água, tamanho e distribuição dos grãos, porosidade, metamorfismo, efeitos tectônicos, entre outros, sendo que um mesmo tipo litológico pode apresentar uma vasta gama de variação nos valores de resistividade (Figura 20) (BRAGA, 2006).

Figura 20 - Faixas de variação nos valores de resistividade de materiais naturais.



Fonte: Braga (2006).

Desse modo, as medidas estão menos sujeitas às interferências geradas por ruídos, minimizando a suscetibilidade a erros de interpretação em litologias heterogêneas. Por essa razão, o erro registrado nesse tipo de arranjo, com base nos ajustes necessários nas equações gerais básicas, é considerado insignificante. Orellana (1972) sugere uma relação entre os eletrodos de corrente e potencial igual a $MN \leq AB/5$.

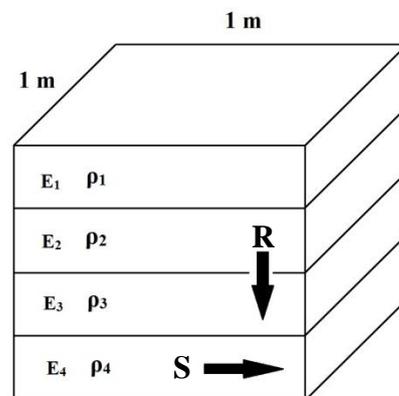
3.2.2.1 Parâmetros Dar Zarrowk

O método da eletrorresistividade pode ser aplicado com o intuito de estabelecer relações entre a resistividade elétrica e os parâmetros hidrogeológicos, como porosidade, permeabilidade, transmissividade e condutividade hidráulica. Nesse sentido, as correlações se alicerçam em analogias existentes entre as equações que regem o fluxo subterrâneo, através de um meio permeável e da corrente elétrica num meio condutor. A partir de medidas geoeletricas tomadas na superfície, podem ser estimadas as características hidrodinâmicas de um aquífero (PORSANI et al., 2012).

Essa relação pode ser estabelecida utilizando-se os parâmetros *Dar Zarrowk*, obtidos por meio de operações de divisão e multiplicação entre as espessuras e resistividades de cada estrato geoeletrico do modelo (MAILLET, 1947).

Considerando a seção geoeletrica ilustrada na Figura 22, a corrente elétrica introduzida no subsolo pode percorrer dois caminhos distintos, sendo um perpendicular e outro paralelo à estratificação (ORELLANA, 1972).

Figura 22 - Seção geoeletrica e os parâmetros *Dar Zarrowk*.



Legenda:

E_i = espessura da camada (m);
 ρ_i = resistividade elétrica (ohm.m);
 R = resistência transversal unitária (ohm.m²);
 S = condutância longitudinal unitária (siemens).

Fonte: Elaborado pelo autor.

Em se tratando de fluxo perpendicular, as camadas geoeletricas comportam-se como condutores em série e, portanto, suas resistências podem ser somadas (Equação 4).

$$R_i = \rho_i \frac{L}{A} = \rho_i \frac{E_i}{1 \times 1} = \rho_i \cdot E_i = T_i \quad (4)$$

Onde:

R_i = resistência elétrica (ohm);

ρ_i = resistividade (ohm.m);

E_i = espessura (m);

L = comprimento (m);

A = área da seção transversal (m²);

T_i = resistência transversal unitária da camada (ohm.m²).

O somatório das resistências unitárias do conjunto das n primeiras camadas corresponderá à *Resistência Transversal Unitária Total* (T). Em caso de fluxo paralelo à estratificação, a resistência da camada i será obtida a partir da Equação 5:

$$R_i = \rho_i \frac{L}{A} = \rho_i \frac{1}{E_i \times 1} = \frac{\rho_i}{E_i} \quad (5)$$

Onde:

R_i = resistência elétrica (ohm);

ρ_i = resistividade (ohm.m);

E_i = espessura (m);

L = comprimento (m);

A = área da seção transversal (m²);

Como as resistências elétricas das camadas geoeletricas estão em paralelo, não se pode somá-las. Por isso, torna-se conveniente somar suas inversas, uma vez que essa é a operação que permite obter a resultante. O quociente obtido é denominado de *Condutância Longitudinal Unitária* (S), cujas dimensões são expressas em siemens ou (mhos), conforme Equação 6. O conjunto das n primeiras camadas da seção resultará na condutância longitudinal unitária total (Equação 7).

$$S_i = \frac{E_i}{\rho_i} \quad (6) \quad \sum_{i=1}^n \frac{E_i}{\rho_i} = S \quad (7)$$

Onde:

S_i = condutância longitudinal unitária da camada (siemens).

E_i = espessura (m);

ρ_i = resistividade (ohm.m);

S = condutância longitudinal unitária total (siemens).

Mazac et al. (1985) propuseram um modelo hidrogeofísico geral para as propriedades elétricas e hidráulicas de aquíferos porosos, reunindo resultados obtidos em diversos trabalhos anteriores, que revelaram uma correlação direta entre a *Resistência Transversal Unitária (T)* e a transmissividade (condutividade hidráulica multiplicada pela espessura saturada do aquífero).

Em aquíferos granulares e livres, a principal proteção natural contra a contaminação está relacionada à presença de camadas argilosas sobrepostas, cuja capacidade de proteção se resume à retardação do tempo de infiltração de soluções, devido à baixa permeabilidade.

Henriet (1975) demonstrou que o grau de proteção de um aquífero pode ser considerado diretamente proporcional à razão entre a espessura e a resistividade, ou em outras palavras, à *Condutância Longitudinal Unitária (S)*.

Nesse sentido, uma camada sobrejacente com valor de S elevado (superior a 1,0) oferece alto grau de proteção à contaminação ao aquífero, pois quanto maior a espessura dessa camada maior o tempo de infiltração do contaminante (maior filtro) e quanto menor sua resistividade, mais argiloso e menos permeável é o material (BRAGA et al., 2006; BRAGA, 2008).

3.3 VULNERABILIDADE NATURAL DOS AQUÍFEROS

Esse item apresenta conceitos básicos concernentes aos tipos de abordagem da vulnerabilidade à contaminação de aquíferos, a definição e comparação entre os termos “vulnerabilidade natural” e “risco ou perigo”, inclusive seus condicionantes conforme as principais bibliografias sobre esses temas.

3.3.1 Conceitos Básicos

A proteção das águas subterrâneas envolve o traçado de estratégias, que devem ser baseadas na determinação de áreas ou atividades com elevado potencial de degradação dos aquíferos. Assim, prioriza-se a aplicação de recursos técnicos e financeiros em locais de maior interesse socioeconômico e ambiental, reduzindo custos e tempo (HIRATA, 1993).

Em diversos países, são dois os principais instrumentos utilizados para a proteção das águas subterrâneas: os perímetros de proteção de poços e de fontes e os mapas de vulnerabilidade à poluição de aquíferos, foco da presente pesquisa (FOSTER et al., 2006; FELLER et al., 2012).

A avaliação de vulnerabilidade pode ou não considerar os diferentes comportamentos dos diversos tipos de contaminantes possíveis no ambiente. Portanto, foram estabelecidas duas modalidades para sua avaliação.

A primeira delas é denominada de *vulnerabilidade específica*, que é direcionada a um contaminante específico, classes de contaminantes ou atividades antrópicas e seus potenciais impactos sobre o uso da terra. A segunda refere-se à *vulnerabilidade intrínseca*, a qual não considera os atributos e o comportamento de contaminantes específicos, sendo função apenas dos fatores hidrogeológicos (STIGTER et al., 2006).

Em hidrogeologia, o conceito de vulnerabilidade foi inicialmente proposto por Le Grand (1964), nos EUA, e um pouco mais adiante, por Albinet e Margat (1970), na França. Na década de 1980, esse conceito difundiu-se mais amplamente com a publicação de outros trabalhos extremamente relevantes, como Aller et al. (1987), Foster et al. (1987), Foster e Hirata (1988). A partir dessas publicações, o conceito de vulnerabilidade se consolidou, resultando em muitas interpretações para seu significado, tais como:

- É a sensibilidade do aquífero a ser adversamente afetado por uma carga contaminante imposta (FOSTER; HIRATA, 1988);
- É uma propriedade intrínseca dos sistemas aquíferos (CIVITA, 1994);
- Corresponde à sensibilidade da qualidade da água subterrânea a uma carga contaminante imposta (VAN DUIJVENBOODEN; VAN WAEGENINGH, 1987);
- Relaciona-se à facilidade com que um contaminante introduzido na superfície atinge e difunde-se na água subterrânea (VRBA; ZAPOROZEC, 1994).

No entendimento de Foster et al. (1987), o termo “vulnerabilidade natural” expressa características intrínsecas dos estratos acima da zona saturada, que determinam a suscetibilidade de um aquífero ser afetado por uma carga contaminante aplicada na superfície do terreno, conceito adotado para a realização deste trabalho. A vulnerabilidade natural à contaminação de um aquífero relaciona-se intimamente com a:

- Inacessibilidade hidráulica da zona saturada à penetração de contaminantes; e

- Capacidade de atenuação dos estratos acima da zona saturada do aquífero, como resultado de sua retenção física e reações químicas com o contaminante.

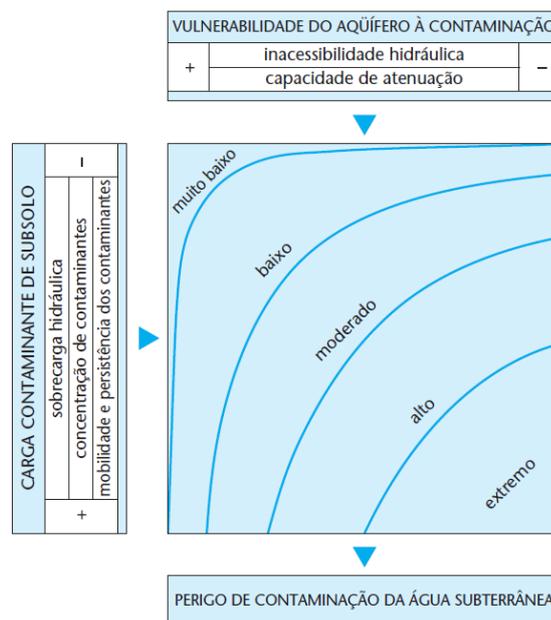
Em outras palavras, os aspectos físico-químicos e biológicos locais interagem com uma provável carga poluidora, e conforme sua disposição no solo e/ou subsuperfície, o contato ou não com a zona saturada do aquífero e a capacidade de controle/modificação de poluentes, a área será mais ou menos vulnerável (FERNANDES et al., 2002).

Por outro lado, o risco à contaminação é definido como sendo o resultado da interação entre a carga poluente antrópica e a vulnerabilidade natural do aquífero à poluição (FOSTER; HIRATA, 1988). O termo “risco” inicialmente proposto por Foster et al. (1987) foi redefinido por Foster et al. (2006) para “perigo” de contaminação das águas subterrâneas, ampliando seu significado, conforme justificado a seguir:

A mudança de terminologia é necessária para adequar-se àquela ora utilizada por outras áreas de avaliação de risco a ecossistemas e à saúde humana e animal, onde risco é agora definido como o produto de “perigo vezes escala do impacto”. O escopo desse guia se restringe (nessa terminologia) à avaliação dos perigos de contaminação da água subterrânea e desconsidera potenciais impactos sobre a população humana ou os ecossistemas aquáticos que dependem do aquífero, assim como o valor econômico dos recursos aquíferos.

Assim como ocorre com o risco, o perigo não é definido apenas com a avaliação de um critério, mas através do cruzamento de diversas variáveis, baseando-se na vulnerabilidade natural da área e sua associação com prováveis cargas poluidoras, conforme ilustrado na Figura 23 (ESCADA, 2009).

Figura 23 - Esquema conceitual do risco (perigo) à contaminação das águas subterrâneas.



Fonte: Foster et al. (2006).

A carga poluente (tipo, quantidade e forma de lançamento) será mais perigosa quanto mais móvel e persistente se comportar nos meios saturados e não saturados. Caso a quantidade de poluentes lançados no solo seja grande, a capacidade de atenuação poderá ser superada (MATIAS, 2010).

É importante salientar que uma área pode apresentar altos índices de vulnerabilidade sem, contudo, apresentar altos riscos de contaminação, em virtude da ausência de carga contaminante significativa, e vice-versa.

De acordo com a *National Resource Council - NRC* (1993), todo aquífero sempre apresenta algum grau de vulnerabilidade. Além disso, incertezas são inerentes a qualquer processo de avaliação de vulnerabilidade e, em sistemas mais complexos, há o risco de que o óbvio possa estar obscurecido e o sutil possa tornar-se indistinguível.

3.3.2 Métodos para a Avaliação da Vulnerabilidade Natural de Aquíferos

No presente item, são apresentadas as principais abordagens sobre os métodos de vulnerabilidade, salientando aqueles mais utilizados. Adicionalmente, são descritos detalhadamente os métodos GOD, EKV e da Condutância Longitudinal Unitária (S), os quais foram aplicados na presente pesquisa.

3.3.2.1 Considerações Gerais

Diversos métodos foram desenvolvidos e aplicados no processo sistemático de avaliação da vulnerabilidade à contaminação das águas subterrâneas. Cada método apresenta suas vantagens e limitações, e nenhum pode ser considerado o mais adequado para todas as situações (FOSTER et al., 2006).

Segundo Artuso et al. (2004), os métodos são agrupados em três principais categorias de abordagem, quais sejam: métodos determinísticos, estatísticos e paramétrico-indexadores ou paramétricos.

Os *métodos determinísticos* empregam modelos de simulação baseados em processos físicos, químicos e biológicos que ocorrem desde a superfície até zonas profundas do ambiente geológico. Utilizam algoritmos analíticos simples para estabelecer índices que expressam a velocidade dos poluentes no subsolo, considerando a taxa média de infiltração na zona insaturada, o fator de retardamento, a profundidade à zona saturada e o decaimento da

concentração do contaminante ao longo do trajeto, devido a reações químicas ou retenção física.

Na prática, a aplicação dessa abordagem não tem se mostrado mais eficaz do que as outras, em virtude de limitações derivadas da estrutura do modelo, como a falta de conhecimento técnico sobre como formular matematicamente os processos, bem como restrições quanto à disponibilidade e qualidade dos dados (QAMHIEH, 2006).

O autor ainda ressalta que a maioria das abordagens para a avaliação da vulnerabilidade assumem os depósitos superficiais como inalterados, com percolação espacialmente uniforme. Caminhos preferenciais para o fluxo subterrâneo, como raízes e cavidades, fendas, juntas e canais de circulação são ignorados. No entanto, esses podem ser os principais fatores que afetam a vulnerabilidade, ao constituírem um modo mais direto e rápido para os contaminantes atingirem o aquífero.

Os *métodos estatísticos* incorporam as incertezas e tentam minimizar o erro da estimativa de vulnerabilidade. Entretanto, requerem observações em campo, como a coleta de amostras de solo e água para a análise. A partir dos resultados obtidos, os métodos estatísticos oferecem diretamente os coeficientes de um parâmetro, ao invés de atribuir pesos para os atributos, com base no julgamento subjetivo de especialistas. Exemplos de métodos estatísticos incluem a análise de regressão (SANTOS, 2010).

Os *métodos paramétricos ou paramétrico-indexadores* utilizam parâmetros indicativos da vulnerabilidade natural, atribuindo-lhes valores numéricos e integrando-os para gerar o índice de vulnerabilidade (VRBA; ZAPOROZEC, 1994). Nesses métodos, cada parâmetro apresenta um intervalo relativo à sua propriedade, subdividindo-se em intervalos discretos e hierarquizados com valores específicos, que refletem o seu nível de suscetibilidade à contaminação (GOGU; DASSARGUES, 2000).

Tais métodos foram desenvolvidos em virtude das limitações existentes nos métodos determinísticos e da insuficiência de dados disponíveis sobre o monitoramento das águas subterrâneas, necessários à aplicação dos métodos estatísticos. Esses sistemas paramétricos se baseiam na suposição de que são poucos os principais fatores decisivos para a vulnerabilidade de uma área, cujas condicionantes são conhecidas e podem ser ponderadas. Como exemplo, nesse grupo inserem-se os métodos GOD e DRASTIC, sendo os mais utilizados nos Estados Unidos, Canadá, Europa e também no Brasil.

Segundo Cunha (2009), a partir da publicação do método **DRASTIC** por Aller et al. (1987), diversos outros métodos do tipo paramétrico-indexadores ou paramétricos foram desenvolvidos para avaliar a vulnerabilidade natural e específica de aquíferos. O autor

supracitado agrupou os novos métodos desenvolvidos em quatro grupos, com base na quantidade e tipo de parâmetros utilizados pelo DRASTIC.

O primeiro grupo representa os métodos que reduziram a quantidade de parâmetros hidrogeológicos, por exemplo, o **GOD** (FOSTER; HIRATA, 1988), o **AVI** (VAN STEMVOORT et al., 1992) e o método **SINTACS** (CIVITA, 1994), o qual pode ser incluso nessa categoria, pois apenas modificou a maneira de quantificar a recarga.

O segundo grupo corresponde aos métodos que acrescentaram algum parâmetro ao DRASTIC, com vistas à determinação da vulnerabilidade específica, inserindo na avaliação as propriedades dos contaminantes e o tipo de ocupação do solo. Como exemplo, pode-se citar o Índice de Suscetibilidade (**IS**), concebido por Francés et al. (2001).

O terceiro grupo é considerado o mais recente e inovador, cuja avaliação da vulnerabilidade natural é pautada nos processos físico-químicos que ocorrem no solo ao ser afetado por uma carga poluente. Um exemplo dessa nova abordagem é o método **SAI**, proposto por Heredia e Cirelli (2007).

O último grupo é composto pelos métodos que empregam parâmetros distintos daqueles usados pelo método DRASTIC, ou foram desenvolvidos especificamente para dado um tipo de aquífero, tais como: o **EPIK** (DOERFLIGER; ZWAHLEN, 1997), que visa avaliar a vulnerabilidade de aquíferos cársticos; o **EKv** (AUGE, 2004), criado especialmente para analisar a suscetibilidade à contaminação de aquíferos livres; e o método **GALDIT**, exclusivo para aquíferos costeiros (CHACHADI; LOBO FERREIRA, 2001). O Quadro 5 apresenta a síntese das metodologias mais utilizadas.

Quadro 5 - Síntese dos principais métodos para a avaliação de vulnerabilidade de aquíferos.

<i>Método</i>	<i>Parâmetros</i>	<i>Autor</i>
DRASTIC	Profundidade do nível de água, recarga, litologia do aquífero, solo, topografia, impacto da zona vadosa e condutividade hidráulica.	Aller et al. (1987)
SINTACS	Iguais aos utilizados no DRASTIC, modificando apenas os pesos atribuídos aos parâmetros.	Civita et al. (1994)
IS	Profundidade do nível de água, recarga, litologia do aquífero, topografia e ocupação do solo.	Francés et al. (2001)
GALDIT	Ocorrência do aquífero, condutividade hidráulica, nível piezométrico, distância à linha da costa, impacto do estado atual da intrusão salina na região e espessura do aquífero.	Chachadi e Lobo Ferreira (2001)

<i>Método</i>	<i>Parâmetros</i>	<i>Autor</i>
GOD	Grau de confinamento das águas subterrâneas, litologia/grau de consolidação da zona insaturada e profundidade do nível d'água.	Foster e Hirata (1988)
AVI	Espessura de cada camada sedimentar acima do nível d'água e a condutividade hidráulica de cada uma dessas camadas.	Van Stempvoort et al. (1992)
EPIK	Intensidade de carstificação próxima à superfície, espessura da cobertura protetora, condições da infiltração (pontual ou difusa) e desenvolvimento da rede cárstica.	Doerfliger e Zwahlen (1997)
EKv	Profundidade do nível d'água e permeabilidade vertical da zona não saturada.	Auge (2004)
SAI	Profundidade do nível d'água, espessura da zona não saturada, conteúdo de carbono e de argila no solo, capacidade de troca catiônica e pH.	Heredia e Cirelli, (2007)

Fonte: Compilado pelo autor.

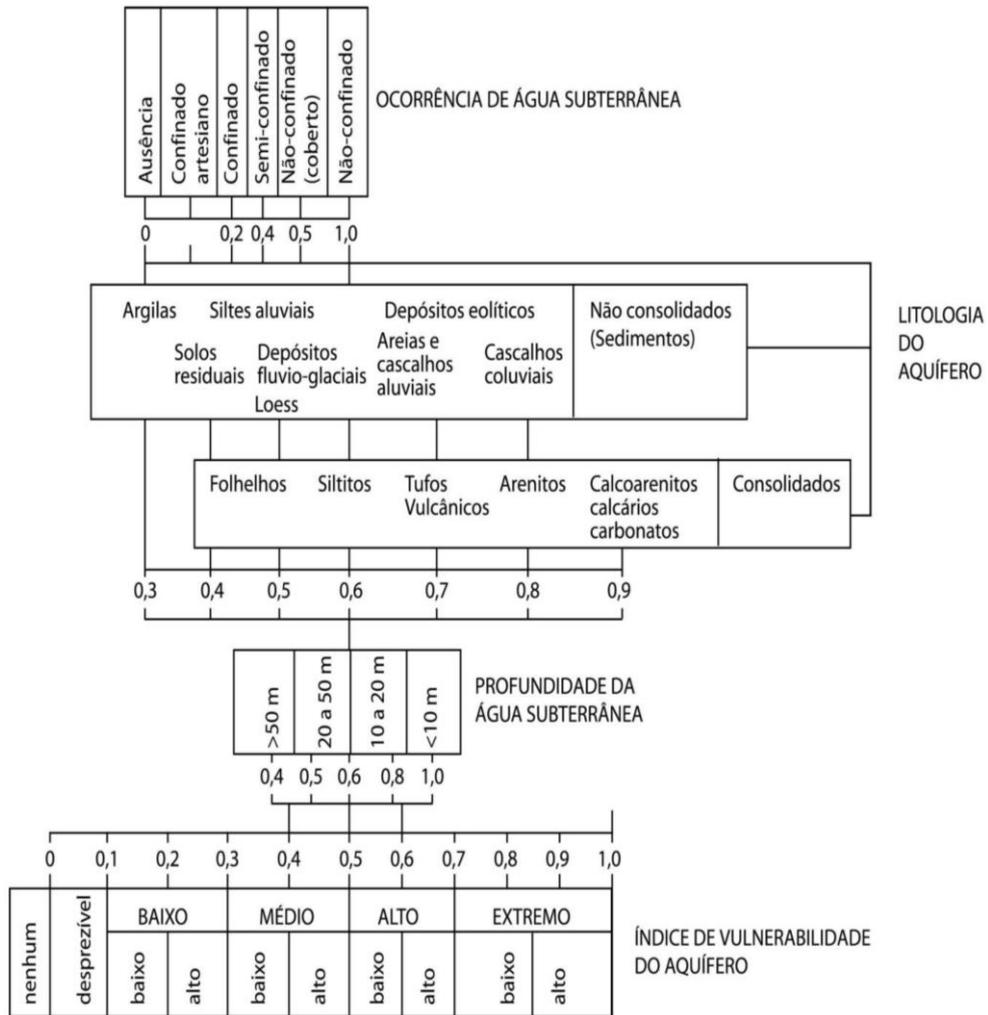
3.3.2.2 Método GOD

O método GOD (*Groundwater hydraulic confinement; Overlaying strata; Depth to groundwater table*), proposto por Foster e Hirata (1988), é um sistema de avaliação de vulnerabilidade bastante utilizado no Brasil, devido a sua simplicidade conceitual e de aplicação, cujos parâmetros necessários frequentemente estão disponíveis em estudos básicos de hidrogeologia regional, realizados por órgãos públicos, universidades e empresas privadas.

Por essa razão, esse método é indicado para estudos preliminares de vulnerabilidade, sobretudo na ausência de detalhes quanto à geologia e hidrogeologia locais e, por isso, é considerado como o primeiro estágio para a avaliação de áreas prioritárias para a gestão dos recursos hídricos subterrâneos. O método GOD subdivide-se em três fases sucessivas e correlacionadas, referentes à capacidade de atenuação e inacessibilidade hidráulica dos poluentes, cujo resultado final é o produto das fases (Figuras 24 e 25).

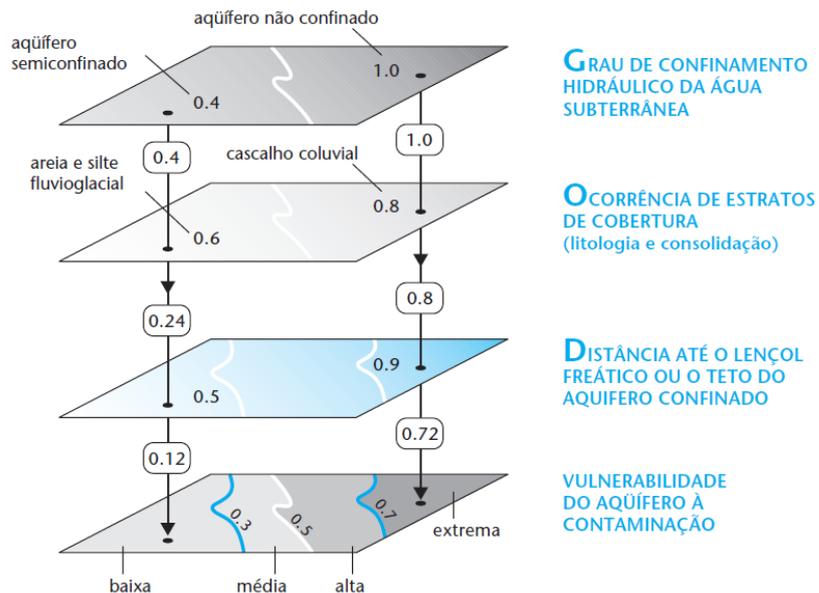
A **1ª fase** consiste na definição do **Grau de Confinamento da Água Subterrânea**, com intervalos de 0 – 1,0; a **2ª fase** identifica a **Ocorrência de Estratos de Cobertura** (características litológicas e grau de consolidação), com intervalos dos índices de 0,3 – 1,0; a **3ª fase** determina a **Distância** (profundidade) até o nível d'água, com escala de 0,4 – 1,0. O produto das três fases expressa o índice da vulnerabilidade natural (Quadro 6), representado numa escala de 0 – 1,0 (FOSTER; HIRATA, 1988).

Figura 24 - Sistema GOD para avaliação da vulnerabilidade do aquífero à contaminação.



Fonte: Foster e Hirata (1988).

Figura 25 - Elaboração de um mapa de vulnerabilidade pelo método GOD.



Fonte: Foster et al. (2006).

Quadro 6 - Definição prática das classes de vulnerabilidade de um aquífero.

<i>Classes de Vulnerabilidade</i>	<i>Índices</i>	<i>Definição Correspondente</i>
Extrema	0,7 – 1,0	Vulnerável à maioria dos contaminantes com impacto rápido em muitos cenários de contaminação;
Alta	0,5 – 0,7	Vulnerável a muitos contaminantes, exceto os que são fortemente adsorvidos ou rapidamente transformados em muitas condições de contaminação;
Média	0,3 – 0,5	Vulnerável a alguns contaminantes, mas somente quando continuamente lançados ou lixiviados;
Baixa	0,1 – 0,3	Vulnerável somente a contaminantes conservadores, a longo prazo, quando contínua e amplamente lançados ou lixiviados;
Desprezível	0 – 0,1	Presença de camadas confinantes sem fluxo vertical significativo de água subterrânea (percolação).

Fonte: Adaptado de Foster et al. (2006).

Desde a sua proposição, o método GOD tem sido amplamente utilizado, apresentando resultados bastante satisfatórios, a partir de uma quantidade reduzida de parâmetros avaliados. Resultados relevantes podem ser encontrados nos trabalhos de Nogueira (2010), Cunha (2009), Osório et al. (2008) e Meaulo (2006).

Além de apresentar estrutura simples e pragmática, o método GOD é bastante flexível quanto a adaptações e inserção de outros parâmetros igualmente importantes, visto que cada área apresenta características próprias. Logo, os métodos propostos às vezes necessitam sofrer modificações, para fornecer resultados mais confiáveis para a avaliação de vulnerabilidade de uma dada área.

Como exemplo, pode-se mencionar a inserção dos parâmetros: densidade de cabeceiras de mananciais e de drenagem (ESCADA, 2009); dados pluviométricos (RUSSO, 2009); propriedades dos solos como argilosidade e textura (CUSTÓDIO, 1995); condutividade hidráulica da zona não saturada e declividade do terreno (SOUZA, 2009).

A quantidade reduzida de parâmetros necessários para o método GOD não implica em diminuição da abrangência da análise (VÍAS et al., 2005). Por exemplo, no método DRASTIC, o processo de recarga é avaliado individualmente, enquanto que no método GOD, esse parâmetro é avaliado indiretamente, incluindo-o no âmbito da classificação dos estratos de cobertura. Desse modo, enfatiza-se a ocorrência de sistemas de fraturamento bem desenvolvidos, os quais podem favorecer o fluxo preferencial, aumentando significativamente a acessibilidade dos contaminantes e, conseqüentemente, a vulnerabilidade de um aquífero (TAVARES et al., 2009).

Ao longo dos últimos anos, foram publicados alguns trabalhos estruturados na comparação entre os resultados obtidos com o método GOD e os oferecidos pela utilização de outros métodos. Juntamente com o método GOD, o método DRASTIC é um dos mais utilizados no mundo, principalmente na América do Norte e, por esse motivo, seus resultados têm sido extensivamente comparados em diversos estudos.

Em linhas gerais, o método DRASTIC, por utilizar uma quantidade de parâmetros maior que o GOD, produz mapas de vulnerabilidade mais detalhados, com maior variabilidade espacial de classes. Por outro lado, os mapas obtidos com o método GOD tendem a ser conservadores, menos detalhados e mais contínuos, quando comparados aos obtidos com o DRASTIC. Todavia, os mapas de vulnerabilidade gerados por ambos os métodos podem conduzir a interpretações semelhantes, no que diz respeito às classes de vulnerabilidade obtidas numa determinada área (AHLERT; REGINATO, 2011; ZANETTI, 2012).

3.3.2.3 Método EKv

Pertencente ao grupo dos métodos paramétrico-indexadores ou paramétricos, o método EKv é aplicado especificamente no estudo de vulnerabilidade de aquíferos livres, utilizando como parâmetros a espessura da zona não saturada (E) e a permeabilidade vertical da zona não saturada (Kv), em outras palavras, a condutividade hidráulica (AUGE, 2004).

O índice de vulnerabilidade, para ambos os parâmetros, varia de 1 (menos vulnerável) a 5 (mais vulnerável), conforme apresentado nas Tabelas 2 e 3.

Tabela 2 - Indexação atribuída aos valores da espessura da zona não saturada.

<i>Espessura da Zona Não saturada (metros)</i>	<i>Índice (E)</i>
< 2	5
2 a 5	4
5 a 10	3
10 a 30	2
> 30	1

Fonte: Auge (2004).

Tabela 3 - Intervalos de condutividade hidráulica vertical e seus respectivos índices.

<i>Condutividade Hidráulica Vertical da Zona Não Saturada (m/d)</i>	<i>Material</i>	<i>Índice (Kv)</i>
50 a 500	Areia média e grossa, saibro arenoso e saibro.	5
1 a 50	Areia muito fina a siltosa, areia fina e areia média a grossa.	4
0,01 a 1	Silte e silte arenoso.	3
1×10^{-3} a 0,01	Silte e silte argiloso.	2
$< 1 \times 10^{-3}$	Argila e argila siltosa.	1

Fonte: Auge (2004).

Os índices de vulnerabilidade finais resultam do somatório ($E + Kv$), conforme a classificação apresentada na Tabela 4.

Tabela 4 - Índices de vulnerabilidade para o método EKv.

<i>Índices</i>	<i>Classificação</i>
2 a 4	Baixa
5 a 7	Média
8 a 10	Alta

Fonte: Auge (2004).

3.3.2.4 Método da Condutância Longitudinal Unitária (S)

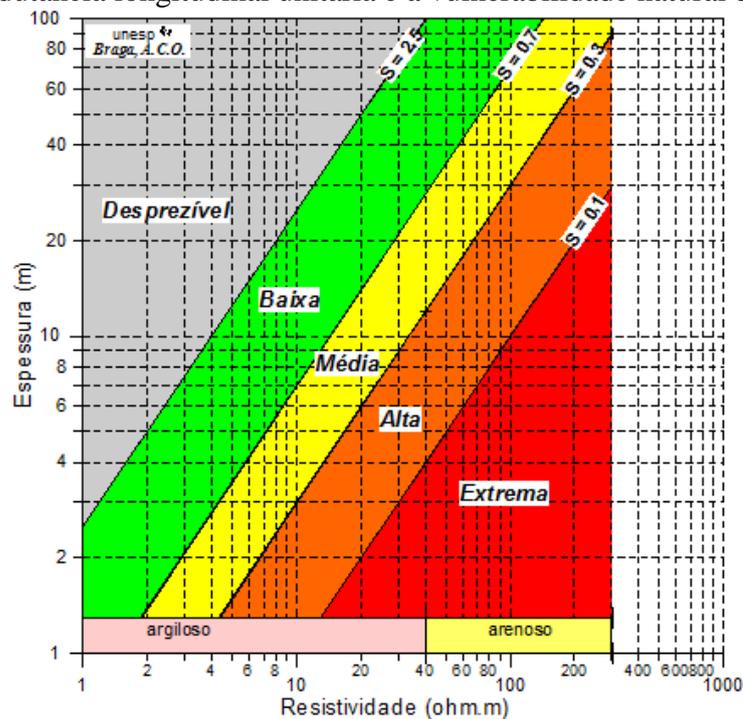
Conforme a definição no item 3.2.2.1. (*Parâmetros Dar Zarrouk*), a condutância longitudinal unitária resulta da razão entre a profundidade do nível d'água subterrânea, ou seja, da espessura da camada geolétrica ou horizonte não saturado de aquíferos livres, e a resistividade elétrica.

Para estabelecer as classes de vulnerabilidade do método S (Tabela 5), as quais correspondem a faixas de valores de condutância longitudinal unitária, buscou-se relações entre espessura e resistividade que pudessem ser consideradas representativas de cada classe, em termos de inacessibilidade hidráulica à zona saturada e capacidade de atenuação de poluentes da zona insaturada.

Desse modo, quanto **maior** o valor de S de uma camada geolétrica, isto é, quanto mais argilosos forem seus materiais (resistividade e permeabilidade mais baixas) e quanto maior for sua espessura (maior filtro e retenção dos poluentes), **menor** será sua vulnerabilidade natural frente a um contaminante migrando verticalmente, e vice-versa

(Figura 26). É oportuno ressaltar que Henriet (1975) relacionou o grau de proteção de um aquífero livre aos valores de condutância longitudinal unitária. Contudo, foi necessário modificar o termo “grau de proteção” para “vulnerabilidade”, a fim de adequar esse novo método aos demais, possibilitando a comparação entre os resultados.

Figura 26 - Condutância longitudinal unitária e a vulnerabilidade natural de aquíferos livres.



Fonte: Braga (inédito).

Tabela 5 - Relação entre os parâmetros geoeletricos e os índices de vulnerabilidade do método S.

Classes de Vulnerabilidade	Parâmetros do Modelo Geoeletrico		Parâmetro Dar Zarrouk
	Resistividade (ohm.m)	Espessura (m)	Condutância Longitudinal (S) (siemens)
Desprezível	< 10	> 25,0	> 2,5
Baixa	10 a 20	25,0 a 13,0	0,7 a 2,5
Média	20 a 40	13,0 a 10,0	0,3 a 0,7
Alta	40 a 100	10,0 a 5,0	0,1 a 0,3
Extrema	100 a 300	< 5,0	< 0,1

Fonte: Braga (inédito).

3.4 GEOPROCESSAMENTO E A CARTOGRAFIA DE VULNERABILIDADE

O termo geoprocessamento corresponde à área do conhecimento que utiliza um conjunto de técnicas matemáticas e computacionais para o tratamento de informações geográficas, incluindo a coleta, recuperação, armazenamento, análise e manipulação de dados

espaciais sobre o mundo real, para um conjunto particular de objetos e fenômenos (BURROUGH; McDONNELL, 1998).

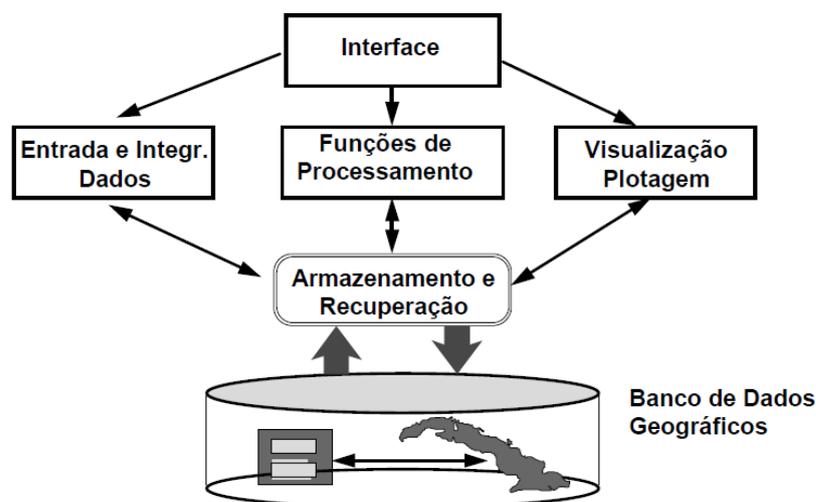
Durante as últimas décadas, o geoprocessamento se consolidou como uma ferramenta valiosa e multidisciplinar, com aplicabilidade em diversas áreas do conhecimento, tais como: cartografia, geologia, hidrogeologia, geotecnia, agropecuária, planejamento e gestão de recursos florestais e hídricos, transportes, comunicações, energia, planejamento urbano e regional (ZAIDAN; SILVA, 2011).

Vale ressaltar que o geoprocessamento não deve ser considerado apenas como um conjunto de técnicas para a produção automática de mapas temáticos, geração de *buffers*, medidas de distâncias, entre outras funcionalidades específicas para a análise geográfica, mas também como um instrumento capaz de representar e modelar a complexidade ambiental.

Os sistemas de informação geográfica (SIGs), principais ferramentas computacionais para o geoprocessamento, permitem realizar análises complexas, ao integrar dados de diversas fontes e criar bancos de dados georreferenciados, possibilitando a automatização da produção de documentos cartográficos (CÂMARA; MEDEIROS, 1998).

Segundo Câmara et al. (1996), um SIG é constituído pelos seguintes componentes: interface com o usuário; entrada e integração dos dados; funções de processamento gráfico e de imagens; visualização e plotagem; armazenamento e recuperação de dados, organizados sob a forma de banco de dados geográficos (Figura 27).

Figura 27 - Arquitetura de sistemas de informação geográfica.

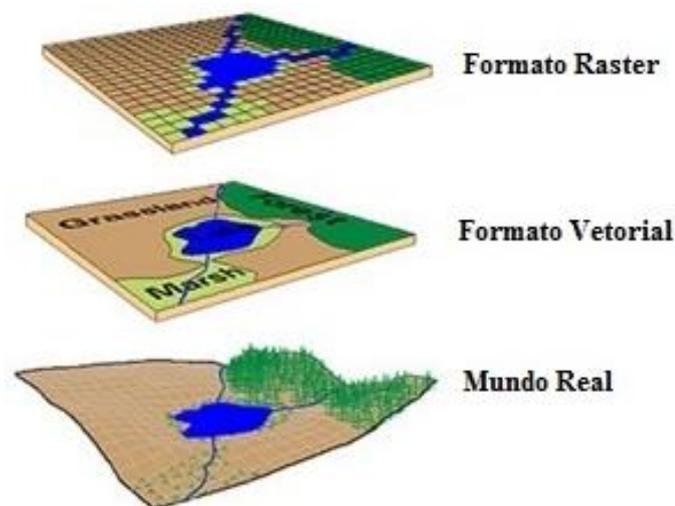


Fonte: Câmara et al. (1996).

Até recentemente, a coleta e processamento de dados sobre recursos naturais eram realizados somente em documentos e mapas em papel, dificultando, e até mesmo, inviabilizando uma análise que combinasse diversos dados e mapas. Contudo, após o advento do geoprocessamento esse trabalho analógico tornou-se obsoleto, possibilitando o armazenamento, processamento e representação dessas informações num ambiente computacional, constituído por equipamentos que armazenam e processam os dados obtidos (*hardwares*), bem como os sistemas de entrada e manipulação (*softwares*). Essa estrutura proporciona maior interatividade entre o sistema e o usuário, que pode continuamente enviar informações, processá-las e obter respostas desse processamento (CÂMARA, 2001).

Os dados de meio físico, bem como suas características qualitativas e distribuição espacial, são armazenados nos SIGs em dois tipos de formatos fundamentais: matricial ou *raster* e o vetorial, representados em planos de informação (PIs) ou camadas (*layers*) (Figura 28). De modo geral, esses dados podem ser obtidos a partir da fotointerpretação, de técnicas de sensoriamento remoto e do trabalho de campo.

Figura 28 - Tipos de representação de dados geográficos.



Fonte: Modificado de Carmona e Monsalve (2013).

Os SIGs proporcionaram a melhoria na coleta e no armazenamento de dados para projetos básicos e executivos, assim como o desempenho de análises, simulações e monitoramentos ambientais. Os mapas temáticos digitais são armazenados num SIG, sob um conjunto de camadas georreferenciadas, onde cada *layer* representa dados de um único atributo, isto é, há uma camada para os tipos de solo, outra para a rede de drenagem, e assim por diante (ONO, 2008).

A aplicação das funcionalidades de um SIG requer métodos adequados, a fim de aperfeiçoar os procedimentos. Indubitavelmente, o primeiro passo para executar as funções de um SIG é a organização de um banco de dados robusto e bem planejado, o qual é uma tarefa complexa e consome, em grande parte dos casos, mais de 70% do tempo dedicado ao trabalho (SILVA, 2003). Câmara (2001) indicou três grandes utilidades para um SIG, quais sejam:

- I. Ferramenta para produção de mapas, servindo como um meio para a cartografia digital;
- II. Banco de dados geográficos, tendo como principais funções o armazenamento e a recuperação de informações espaciais, disponibilizando-as aos usuários;
- III. Suporte à análise espacial de fenômenos, característica que expressa uma de suas maiores potencialidades, já que é possível visualizar espacialmente as informações disponíveis para a obtenção de mapas, relatórios e tabelas, constituindo um importante instrumento de análise e suporte à tomada de decisão.

Desse modo, as técnicas de geoprocessamento empregadas na análise em um SIG permitem, por exemplo, a definição do potencial de determinada área para uma ou mais atividades e a combinação desse potencial com outras características intrínsecas do local, resultam num melhor refinamento do estudo (VEIGA; SILVA, 2004).

Devido a sua capacidade de processar um grande volume de dados em intervalos de tempo diminutos, ao empregar operações complexas na análise de dados ambientais, os SIGs apresentam um potencial extraordinário no campo da avaliação e cartografia de vulnerabilidade natural à contaminação de aquíferos.

Dias et al. (2004) destacam que a utilização de técnicas de geoprocessamento executadas por SIGs vêm se consolidando como ferramentas extremamente úteis, para a elaboração de diversos trabalhos relacionados ao planejamento e gestão de recursos hídricos.

Na literatura nacional e internacional, são encontrados diversos trabalhos que empregaram técnicas de geoprocessamento como instrumento para o estudo, planejamento e gerenciamento de recursos hídricos subterrâneos.

Santos (2004) realizou o mapeamento da vulnerabilidade dos aquíferos da região do município de Campos dos Goytacazes/RJ, com a aplicação do método AVI (*Aquifer Vulnerability Index*) num SIG. O método classificou a vulnerabilidade da área em alta e extremamente alta.

Yamada (2007) elaborou um documento cartográfico preventivo para a área urbana e periurbana do município de São Carlos/SP, com enfoque em aspectos qualitativos da vulnerabilidade natural dos Aquíferos Botucatu, Serra Geral e Itaqueri. No processo de

avaliação, foi utilizado o método GOD e o geoprocessamento de dados geológicos e hidrogeológicos no SIG Spring 4.2, desenvolvido pelo Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE).

Andrade (2012) mapeou em ambiente SIG a vulnerabilidade à intrusão salina em parte da orla do município de Fortaleza/CE, empregando o método GALDIT, específico para análises em aquíferos costeiros. Os resultados indicaram que a maior parte da área foi classificada como média vulnerabilidade, a faixa mais próxima do mar é altamente vulnerável, e somente uma pequena porção a sudoeste apresenta baixa vulnerabilidade à intrusão salina.

Em um estudo comparativo entre os métodos GOD e DRASTIC, Cardoso (2010) avaliou a vulnerabilidade das águas subterrâneas à poluição da bacia hidrográfica do rio Cabril, nas imediações do município de Vila Real, em Portugal, através da álgebra de mapas temáticos num SIG. Por meio da normalização entre as escalas dos dois mapas obtidos, o autor constatou que com o uso do método GOD, a área apresenta vulnerabilidade desprezível à baixa. Por outro lado, através do método DRASTIC grande parte da bacia apresentou vulnerabilidade baixa à média, representando melhor a realidade da área de estudo.

Valladolid et al. (2010) estimaram a vulnerabilidade natural dos recursos hídricos subterrâneos na comunidade de Madrid, região central da Espanha, por intermédio dos métodos GOD e DRASTIC, cujos dados de entrada foram integrados no *software* ArcGIS 9.2, desenvolvido por ESRI (2006). A vulnerabilidade específica à poluição por nitrato também foi calculada, usando uma composição entre o DRASTIC (DC) e o Índice de Vulnerabilidade ao Nitrato (NV), que inserem o tipo de uso do solo e seus potenciais riscos à poluição na análise. Os mapas de vulnerabilidade baseados nos quatro métodos propostos mostraram resultados bastante similares para a área de estudo, identificando os aquíferos porosos e cársticos como depósitos sujeitos a alto risco de poluição pelo nitrato, devido à intensa atividade agrícola.

A cartografia de vulnerabilidade das águas subterrâneas necessita ser embasada numa visão adequada e ampla sobre a realidade da área, em termos geológicos e hidrogeológicos, devendo considerar as atividades antrópicas. Os mapas de vulnerabilidade são de extrema utilidade aos planejadores de uso da terra, hidrogeólogos e aos gerentes de recursos hídricos. Com base nesses documentos cartográficos, é possível destacar as áreas prioritárias nas quais existe um risco significativo de contaminação das águas subterrâneas, tendo em vista a localização dos diferentes tipos de classes de uso do solo.

CAPÍTULO 4 – MATERIAIS E MÉTODOS

Nesse capítulo, são apresentados os materiais utilizados, os procedimentos metodológicos adotados e a descrição das atividades desenvolvidas em cada etapa de trabalho, de modo a alcançar os objetivos propostos.

4.1 MATERIAIS

A caracterização litológica e a estimativa de propriedades hidrogeológicas, hidrodinâmicas e geelétricas da área de estudo, como a profundidade do nível d'água, condutividade hidráulica e a resistividade elétrica, foram obtidas por meio da aplicação do método da eletrorresistividade e da técnica da sondagem elétrica vertical (SEV) - arranjo *Schlumberger*.

Foram utilizadas 82 SEVs realizadas pelo Instituto de Pesquisas Tecnológicas (IPT, 1980a, 1981b), atendendo à solicitação do Consórcio Paulipetro, cujo propósito era a prospecção e extração de petróleo e gás natural na bacia do rio Paraná.

Complementarmente, foram empregadas mais 24 SEVs efetuadas pelo IPT (1977, 1978, 1980b), contratado do Departamento de Águas e Energia Elétrica do Estado de São Paulo (DAEE), que visava à pesquisa de aquíferos promissores para a captação e o abastecimento público do interior paulista. O Anexo A sumariza os principais dados cadastrais sobre o total de 106 SEVs utilizadas nessa pesquisa.

Adicionalmente, foram utilizados arquivos vetoriais para a elaboração e finalização dos *layouts* dos mapas, tais como: principais rodovias estaduais, malha digital dos Estados e municípios brasileiros (IBGE, 2010). A Tabela 6 sintetiza a relação de dados utilizados para a elaboração dessa pesquisa.

Tabela 6 - Relação de dados utilizados na pesquisa.

<i>Tipo de Dado</i>	<i>Fonte</i>	<i>Ano</i>	<i>Quantidade</i>
SEVs	IPT/Paulipetro	1980/81	82
	IPT/DAEE	1977/78/80	24
Mapa Geológico do Estado de São Paulo (Escala 1:250.000; Folhas: Bauru, Araraquara, Araçatuba e Marília)	Convênio DAEE/Unesp	1984	4
Arquivos Vetoriais	IBGE	2007	3

Fonte: Elaborado pelo autor.

Todas as informações pertinentes à aplicação dos métodos EKV e S foram obtidas por meio do conjunto de SEVs disponíveis. Somente para a caracterização litológica dos estratos de cobertura, necessária à aplicação do método GOD, utilizou-se o Mapa Geológico do Estado de São Paulo (DAEE et al., 1984), elaborado na escala 1:250.000. Para compor a litologia da área de estudo descrita nesse documento cartográfico, foram utilizadas parcialmente as folhas Bauru, Araraquara, Araçatuba e Marília.

Na etapa de coleta, organização e tratamento dos dados foram empregados dois *softwares*: o Excel (MICROSOFT CORPORATION, 2007), para a organização das informações e cálculo de variáveis relativas às SEVs; e o IX1D (INTERPEX LIMITED, 2008), utilizado para o processamento e reinterpretação das SEVs.

Os mapas temáticos de interesse foram gerados pelo *software* Surfer 8.0 (GOLDEN SOFTWARE INC., 2002), cujos arquivos de saída possuem extensão (*.grd). Em seguida, foi utilizado o *software* Grid Convert (GEOESPACIAL DESIGNS, 2013) para converter esses *grids* para o formato (*.asc), a fim de serem importados para o *software* ArcGIS 10.0 (ESRI, 2010).

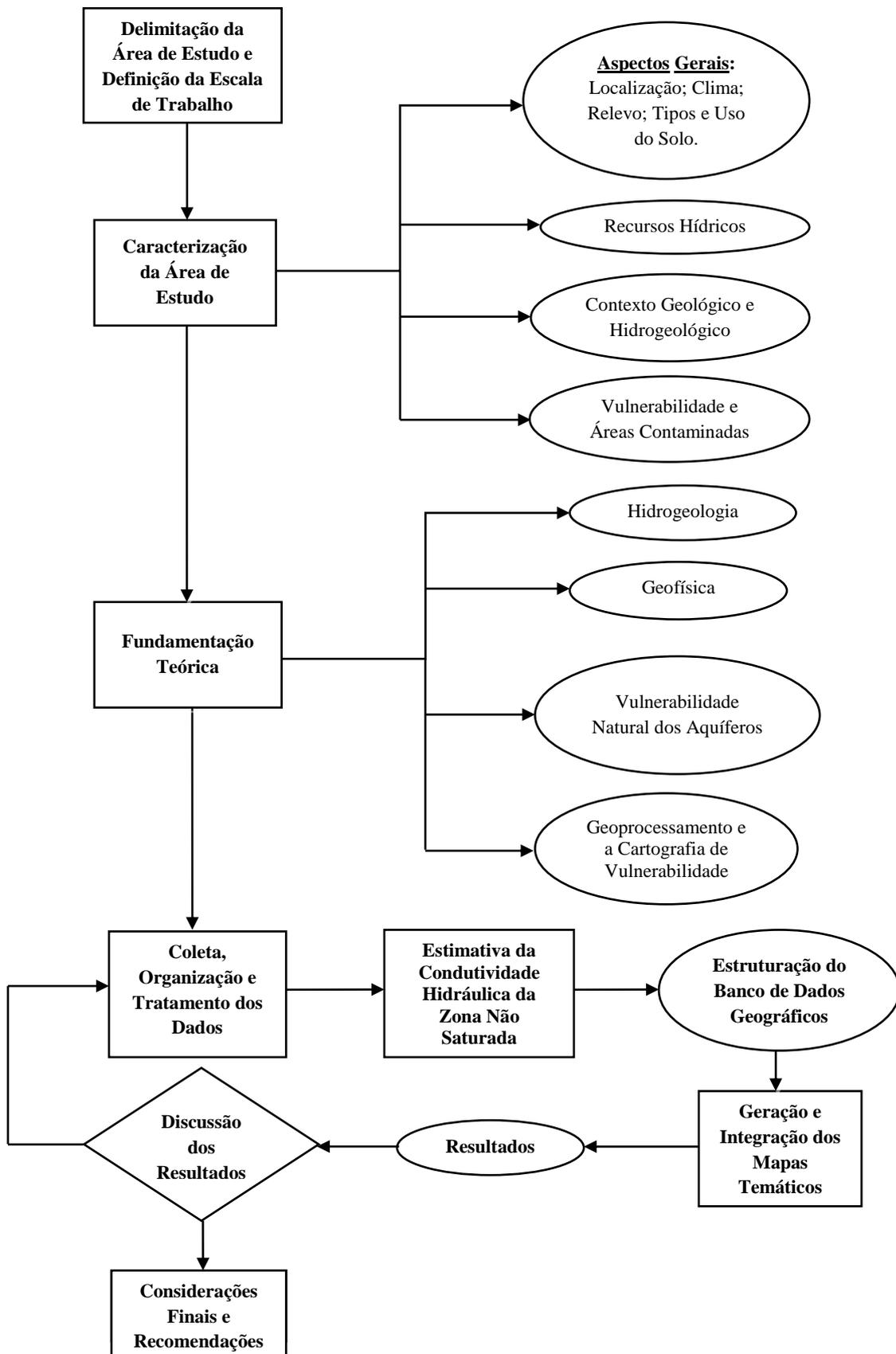
Durante as etapas de delimitação e caracterização da área de estudo e integração dos mapas utilizou-se o ArcGIS 10.0 (ESRI, 2010), cujas principais operações efetuadas foram: **(i)** localização das SEVs em suas respectivas cartas topográficas, divisas municipais e nos limites do Sistema Aquífero Bauru; **(ii)** delimitação da área de estudo; **(iii)** integração dos mapas temáticos, resultando nos mapas de vulnerabilidade; e **(iv)** elaboração dos *layouts* de todos os mapas finais.

4.2 PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS

A pesquisa foi estruturada em nove etapas de trabalho (Figura 29), quais sejam:

- I.** Delimitação da área de estudo e definição da escala de trabalho;
- II.** Caracterização da área de estudo;
- III.** Fundamentação teórica;
- IV.** Coleta, organização e tratamento dos dados;
- V.** Estimativa da condutividade hidráulica;
- VI.** Estruturação do banco de dados geográficos;
- VII.** Geração e integração dos mapas temáticos;
- VIII.** Discussão dos resultados; e
- IX.** Considerações finais e recomendações.

Figura 29 - Fluxograma das etapas de trabalho.



Fonte: Elaborado pelo autor.

4.2.1 Delimitação da Área de Estudo e Definição da Escala de Trabalho

Os levantamentos geofísicos realizados pelo IPT (1977, 1978, 1980a, 1980b, 1981b), atendendo às solicitações do Consórcio Paulipetro e do DAEE, foram projetados e executados com o intuito de investigar regionalmente a litoestratigrafia da bacia do rio Paraná, no interior do Estado de São Paulo.

Geralmente, as SEVs eram locadas ao longo das margens das principais rodovias, devido à logística privilegiada, reduzindo a necessidade de abertura de picadas ou desenvolvimento das SEVs em terrenos muito íngremes, alagadiços ou cruzados por cursos d'água. Além das margens de rodovias, as SEVs frequentemente eram posicionadas em pontos estratégicos, onde as equipes encarregadas já possuíam conhecimento prévio sobre alguma anomalia ou condição geológica de interesse, quer seja para a prospecção de petróleo e gás natural, quer seja para pesquisa de águas subterrâneas para o abastecimento público.

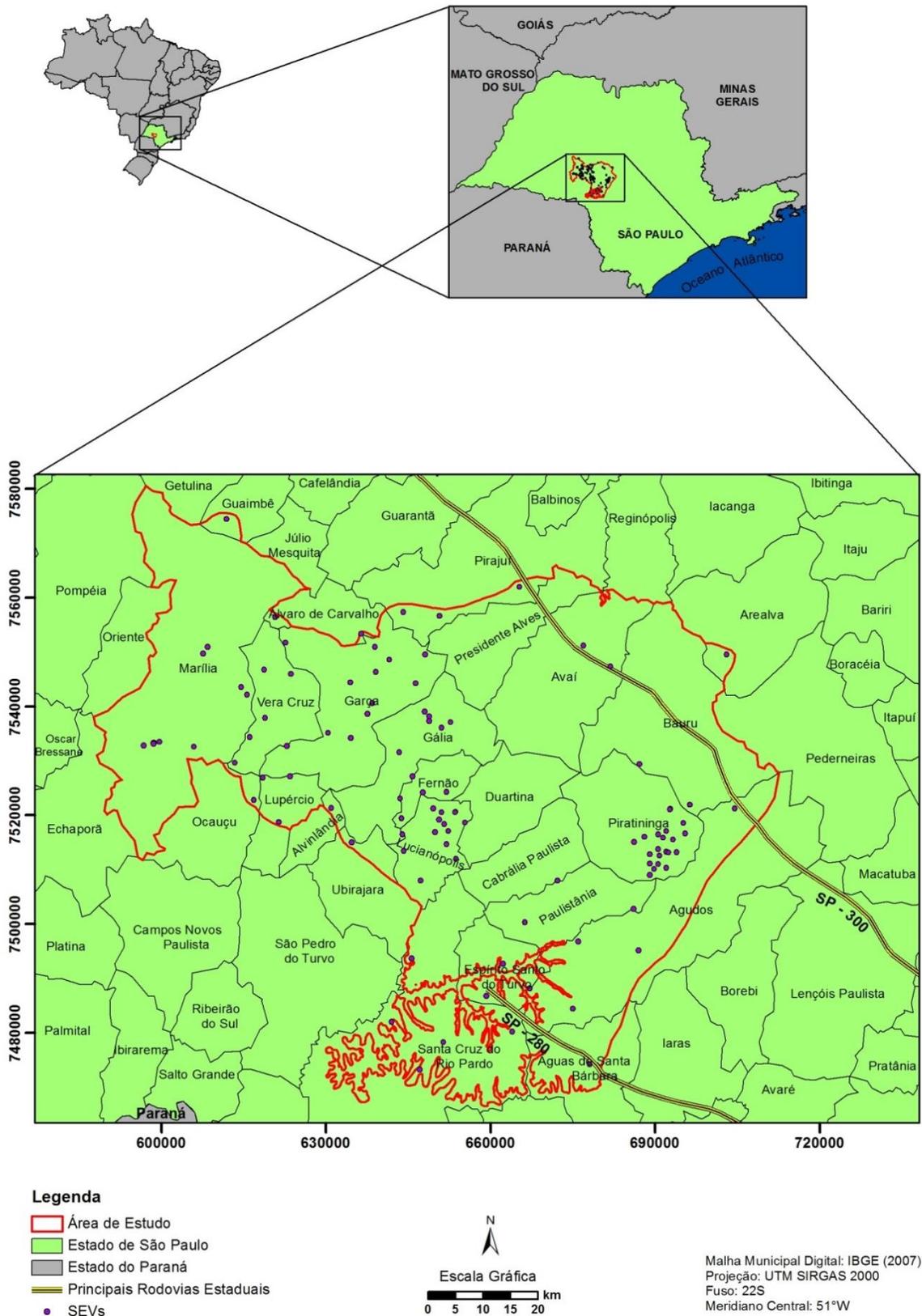
Conseqüentemente, as SEVs não apresentaram uma distribuição geográfica uniforme sobre toda a área avaliada, característica que juntamente com a quantidade de SEVs disponíveis, direcionou a realização desse trabalho em escala regional, com vistas ao reconhecimento preliminar da vulnerabilidade à contaminação.

Ante o exposto, a delimitação da área de estudo (Figura 30) considerou dois critérios básicos, quais sejam:

I. Densidade de SEVs: foram selecionadas regiões com maior densidade e melhor distribuição geográfica das SEVs, a fim de que os resultados obtidos pudessem contribuir para a tomada de decisões, quanto à gestão das águas subterrâneas dos municípios integrantes da área de estudo. Nesse contexto, inserem-se principalmente os municípios de Bauru e Marília, pois já apresentam áreas declaradas contaminadas e alterações na qualidade da água em função das altas concentrações de nitrato, além de Bauru ser considerado uma das seis áreas potenciais de restrição, controle da captação e uso das águas subterrâneas; e

II. Limites do Sistema Aquífero Bauru: a definição do limite final da área de estudo, sobretudo na parte sul, seguiu os contornos do próprio SAB, utilizando os limites geográficos das formações Adamantina e Marília como referência, constantes no Mapa Geológico do Estado de São Paulo (DAEE et al., 1984).

Figura 30 - Localização das SEVs utilizadas na área de estudo.



Fonte: Elaborado pelo autor.

No Brasil, não raro se constata a escassez de dados disponíveis com dificuldades de consistência. Por isso, avalia-se que seria recomendável a realização de trabalhos de reconhecimento básico, em âmbito estadual ou regional (escalas de 1:250.000 a 1:500.000), da situação de vulnerabilidade e perigo à contaminação de aquíferos, de modo a identificar e delimitar áreas potencialmente críticas. Foster e Hirata (1988) definiram níveis de avaliação para estabelecer o perigo à contaminação de aquíferos (Figura 31), que também podem ser aplicados à avaliação da vulnerabilidade.

Figura 31 - Níveis de avaliação da vulnerabilidade e do perigo de contaminação das águas subterrâneas.

Nível de Avaliação	Aspectos-Chave			Escalas de Trabalho	
I. Reconhecimento Preliminar (existência do perigo)	Baseado em Dados Existentes	Sem Amostragem	Ênfase Aspectos Qualitativos	Perfuração não Justificável	Normalmente estado / província 1:250.000 a 1:500.000 (dados 10km)
II. Avaliação Sistemática (grau de perigo)					Normalmente urbana / município 1:50.000 a 1:100.000 (dados 1-2km)
III. Reconhecimento de Campo	Requer Coleta de Dados de Campo	Requer Amostragem e Análise	Ênfase Aspectos Quantitativos	Requer Perfuração	Local urbano / municipal 1:25.000 a 1:50.000 (dados 200-500m)
IV. Reconhecimento por Rede de Monitoramento					Local 1:25.000 a 1:50.000 (dados 200-500m)
V. Investigação Completa de Campo					Local 1:10.000 a 1:25.000 ou menor (dados 50-100m)

Fonte: Foster e Hirata (1988).

Nesse sentido, esse trabalho se insere no nível de avaliação exemplificado no item I (Reconhecimento Preliminar), que apenas identifica a existência da vulnerabilidade à contaminação de um determinado aquífero. Níveis mais profundos de avaliação requerem dados mais detalhados, como aqueles obtidos em perfurações de poços para a amostragem e análises físico-químicas das águas e do solo, ações que não foram o foco da presente pesquisa.

A escala de trabalho dos mapas de vulnerabilidade obtidos foi definida com base na escala do Mapa Geológico do Estado de São Paulo (DAEE et al., 1984), ou seja, optou-se por utilizar a escala 1:250.000, a fim de comparar qualitativa esses produtos finais, além dessa escala ser apropriada a mapeamentos de reconhecimento preliminar.

Braga (2008) propôs uma formulação matemática para estimar a escala de apresentação de trabalhos que empreguem dados obtidos por meio de SEVs, em função de sua quantidade e das dimensões da área de pesquisa (Tabela 7).

Tabela 7 - Estimativa da escala de trabalho em função da quantidade de SEVs e das dimensões da área da pesquisa.

<i>Área (m²)</i>	<i>Escalas Sugeridas (1:)</i>	<i>Equações</i>
$\leq 1.280.000$	≤ 20.000	$y = \frac{1,14 \cdot z^{0,905}}{x}$ (8)
$>1.280.000$ e $\leq 10.000.000$	10.000 a 30.000	
$> 10.000.000$	25.000 a 500.000	$y = \sqrt{\frac{16,7 \cdot z^{1,05}}{x}}$ (9)

Onde: y = escala de trabalho; x = quantidade de SEVs disponíveis e z = dimensões da área de pesquisa (m²).

Fonte: Adaptado de Braga (2008).

Considerando que a área de estudo tem uma superfície de 7.086 km² (7,086 x 10⁹ m²) e que foram utilizadas 106 SEVs, a aplicação da Equação 9 apresentada na Tabela 6 sugere uma escala de trabalho aproximada de 1:60.000. Dessa maneira, os mapas de vulnerabilidade originados na escala 1:250.000 e que foram obtidos apenas a partir de dados de SEVs, isto é, os resultantes dos métodos EKv e S, poderão ter suas escalas ampliadas até 1:60.000, que por sua vez, é adequada à avaliação de vulnerabilidade em nível municipal.

4.2.2 Elaboração da Caracterização da Área de Estudo

Para uma melhor compreensão de aspectos relevantes para o desenvolvimento dessa pesquisa, efetuou-se a caracterização da área de estudo, concentrando-se principalmente na geologia e hidrogeologia, em âmbito regional e local, bem como numa visão global sobre os recursos hídricos. Para tanto, foram consultados três tipos de base de dados, quais sejam:

I. Publicações Científicas: referem-se a dissertações de mestrado, teses de doutorado, anais de eventos científicos, periódicos nacionais e internacionais, com enfoque naqueles mais atuais, a fim de alicerçar as proposições e apontamentos, assim como corroborar as considerações acerca dos dados e resultados obtidos. As publicações científicas foram adquiridas a partir de visitas técnicas em bibliotecas de universidades, incluindo consultas via internet;

II. Relatórios Técnicos: correspondem a documentos referentes à situação dos recursos hídricos. Esses dados foram obtidos junto à Agência Nacional de Águas

(ANA), CETESB, DAEE e aos comitês de bacia hidrográfica que compõem a área de estudo;

III. Documentos Cartográficos: representam o Mapa Geológico do Estado de São Paulo (DAEE et al., 1984); Mapa de Águas Subterrâneas do Estado de São Paulo (DAEE et al., 2005); Mapa de Vulnerabilidade das Águas Subterrâneas do Estado de São Paulo (IG/CETESB/DAEE, 1997) e o Mapa de Unidades Hidrográficas de Gerenciamento de Recursos Hídricos do Estado de São Paulo (DAEE et al., 2003). Esses mapas foram obtidos em mapotecas de universidades e em consultas via internet.

Os resultados encontrados nessa etapa foram apresentados anteriormente no Capítulo 2, com o intuito de viabilizar o completo entendimento dos procedimentos metodológicos descritos nesse capítulo.

4.2.3 Elaboração da Fundamentação Teórica

De modo complementar à caracterização da área de estudos, foi elaborada a etapa de fundamentação teórica direcionada à consulta e exposição de temas específicos, cujos conteúdos são imprescindíveis à compreensão da proposta da pesquisa e de sua metodologia. Foram consultadas duas principais fontes de dados:

I. Publicações Científicas: correspondem a dissertações de mestrado, teses de doutorado, anais de eventos científicos, livros didáticos, periódicos nacionais e internacionais, no que se refere à base conceitual sobre hidrogeologia, vulnerabilidade natural de aquíferos, geofísica e a utilização de técnicas de geoprocessamento na cartografia de vulnerabilidade de águas subterrâneas. Esses dados foram adquiridos a partir de visitas técnicas em bibliotecas de universidades, inclusive em consultas via internet;

II. Relatórios Técnicos: referem-se aos dados descritivos sobre os ensaios geofísicos efetuados pelo IPT na bacia rio do Paraná, durante as décadas de 1970 e 1980. Para a utilização formal desses documentos e dos dados geofísicos, foi firmada uma parceria na forma de um projeto de pesquisa, entre o Departamento de Geologia Aplicada (DGA), do Instituto de Geociências e Ciências Exatas (IGCE) - Unesp e a Seção de Geotecnia, do Centro de Tecnologia de Obras de Infraestruturas – IPT (IPT; UNESP, 2013).

Analogamente ao item 4.2.2, essa etapa também foi anteriormente apresentada (Capítulo 3), visando à apreensão do exposto no presente capítulo.

4.2.4 Coleta, Organização e Tratamento dos Dados

Primeiramente, cada uma das 106 SEVs utilizadas nessa pesquisa tiveram suas folhas e curvas de campo originais digitalizadas, ou seja, todos os valores e informações constantes nesses materiais foram inseridos em planilhas Excel (MICROSOFT CORPORATION, 2007), contribuindo para a recuperação e conservação desses dados geofísicos.

Todos os dados coletados através dessas SEVs foram agrupados e organizados no formato de um banco de dados geográficos. Por isso, foi elaborada outra planilha Excel (MICROSOFT CORPORATION, 2007), inserindo, além de dados cadastrais, os seguintes campos:

- Resistividade elétrica da primeira camada da zona saturada (ohm.m);
- Profundidade do nível d'água subterrânea (m); e
- Condutividade hidráulica vertical da zona não saturada (m/d).

Excetuando a condutividade hidráulica, obtida em etapa posterior, os demais campos dessa planilha foram preenchidos durante a etapa de tratamento dos dados, cujos procedimentos básicos efetuados foram:

A) *Processamento e Reinterpretação de SEVs*

Foram processadas e reinterpretadas apenas as SEVs nº 4 (bloco 39), nº 1 (bloco 44) e nº 22 (bloco 45), realizadas pelo IPT para o Consórcio Paulipetro em 1980. Esse procedimento foi necessário, visto que as curvas de campo originais ou não continham o modelo geoeletrico inicial ou o apresentavam sem considerar profundidades muito rasas.

Desse modo, foram excluídas da análise pequenas profundidades detalhadas nas partes iniciais das curvas, dificultando, por exemplo, a estimativa da profundidade do nível d'água subterrânea. Isso ocorreu devido aos próprios objetivos dessas SEVs, que se concentravam na investigação de profundidades muito grandes (mais de 5.000 metros em alguns ensaios), a fim de alcançar o topo do basalto e estudar a litoestratigrafia do Sistema Aquífero Guarani (SAG).

B) Elaboração do Mapa das Formações Geológicas

Para a elaboração do arquivo *shapefile* do tipo polígono, contendo todas as formações geológicas existentes na área de estudo, foram importadas para o *software* ArcGIS 10.0 (ESRI, 2010) as folhas de Bauru, Marília, Araraquara e Araçatuba, pertencentes ao Mapa Geológico do Estado de São Paulo (DAEE et al., 1984).

Em ambiente SIG, definiu-se para as quatro folhas o sistema de projeção UTM SIRGAS, fuso 22 S e meridiano central 51° W. Em seguida, as folhas foram georreferenciadas e, então, sobrepôs-se ao mosaico formado por essas o *layer* referente à área de estudo, a fim de direcionar a digitalização.

Apenas para efeito de finalização do *layout* do mapa, optou-se por digitalizar as formações geológicas na forma de um retângulo envolvente, contendo o polígono da área de estudo. A tabela de atributos desse *shapefile* foi editada, na qual foram criados mais quatro campos: SIGLA, FORMAÇÕES GEOLÓGICAS, DESCRIÇÃO LITOLÓGICA e ÍNDICE GOD, os quais foram preenchidos com as respectivas informações.

Para ser utilizado no método GOD, o *shapefile* das formações geológicas foi selecionado e reduzido ao formato e tamanho do polígono da área de estudo, por meio da ferramenta *Clip*, do módulo *Analysis Tools*, no ArcGIS 10.0 (ESRI, 2010).

4.2.5 Estimativa da Condutividade Hidráulica Vertical da Zona Não Saturada

Considerando que os mecanismos controladores do fluxo de fluidos e de correntes elétricas são geralmente regidos pelos mesmos parâmetros físicos e atributos litológicos, é possível afirmar que existe uma relação de proporcionalidade entre os valores de condutividade hidráulica e de resistividade elétrica (SOUPIOS et al., 2007).

É importante destacar que essa correlação somente é válida quando se tratam de sedimentos saturados arenosos ou argilosos não contaminados, nos quais as características naturais dos fluidos são consideradas constantes. Por exemplo, em áreas cujos sedimentos possam estar contaminados por derivados de hidrocarbonetos, essa correlação não pode ser considerada (BRAGA et al., 2006).

Desse modo, a condutividade hidráulica da zona não saturada foi estimada a partir de uma equação proposta por Braga (inédito), baseada na correlação entre os valores da resistividade elétrica da primeira camada da zona saturada e a condutividade hidráulica dos diferentes materiais naturais (Tabela 8).

Tabela 8 - Correlação entre a resistividade elétrica e a condutividade hidráulica para os principais tipos de sedimentos inconsolidados.

<i>Material</i>	<i>Resistividade Elétrica (ohm.m)</i>	<i>Condutividade Hidráulica (cm/s)</i>
Argila	5 – 20	$10^{-9} - 10^{-6}$
Silte, Silte Arenoso, Areia Argilosa	20 – 40	$10^{-6} - 10^{-5}$
Areia Siltosa e Areia Fina	50 – 80	$10^{-4} - 10^{-3}$
Areia Bem Distribuída	100 – 300	$10^{-2} - 10^{-1}$
Cascalho	300 – 400	$10^{-1} - 10^0$

Fonte: Adaptado de Braga (2007); Fetter (2001).

A Equação 10, que relaciona a resistividade elétrica dos sedimentos à sua respectiva condutividade hidráulica (Tabela 8), foi obtida por meio da elaboração de um gráfico, cujo eixo das abscissas representava os valores de resistividade e, o eixo das ordenadas, os respectivos valores de condutividade hidráulica. O coeficiente de determinação R^2 foi igual a 0,98, corroborando a alta correlação entre as variáveis.

$$K = (1 \times 10^{-12}) \times \rho_{sat}^{4,585} \quad (10)$$

Onde:

K = condutividade hidráulica vertical da zona não saturada (cm/s);

ρ_{sat} = resistividade elétrica da primeira camada da zona saturada (ohm.m).

4.2.6 Estruturação do Banco de Dados Geográficos

Depois de realizadas todas as estimativas e cálculos necessários à obtenção das variáveis utilizadas na etapa de geração e integração dos mapas temáticos, iniciou-se a estruturação do banco de dados geográficos em ambiente SIG. A partir da importação da planilha Excel para o *software* ArcGIS 10.0 (ESRI, 2010), criou-se um arquivo *shapefile* do tipo ponto, para representar espacialmente cada uma das 106 SEVs utilizadas e seus respectivos atributos cadastrais e numéricos.

Nesse banco de dados geográficos, também foram incluídos o arquivo *shapefile* das formações geológicas e os demais arquivos vetoriais utilizados nessa pesquisa.

4.2.7 Geração e Integração dos Mapas Temáticos

A seguir, são descritos os procedimentos executados na etapa de geração dos mapas temáticos, incluindo os critérios adotados para integrá-los, a fim de se obter os mapas de vulnerabilidade por meio dos métodos utilizados.

A) Método GOD

Para produzir o mapa de vulnerabilidade natural do Sistema Aquífero Bauru na área de estudo, foram gerados mapas temáticos para cada um dos três parâmetros de entrada do método GOD. A partir do produto desses mapas, obteve-se o mapa com a variação dos níveis de vulnerabilidade. Portanto, foram atribuídos os índices descritos a seguir para os parâmetros de interesse, quais sejam:

- **G - Grau de confinamento do aquífero**

A porção do Sistema Aquífero Bauru que ocorre na área de estudo é livre em toda a sua extensão. Assim, o índice GOD adotado nesse caso foi igual a 1. Para gerar o mapa correspondente, converteu-se o arquivo *shapefile* referente ao contorno da área de estudo para o formato *raster* (matricial), a partir da ferramenta *Feature to Raster* do módulo *Conversion Tools*, no *software* ArcGIS 10.0 (ESRI, 2010).

- **O - Características litológicas da zona não saturada**

De modo geral, as litologias do Sistema Aquífero Bauru são dominadas por arenitos intercalados por camadas argilosas, sendo frequente a presença de cimentação e nódulos carbonáticos, características que podem provocar a redução da permeabilidade dos sedimentos inconsolidados e das rochas.

Segundo o Mapa Geológico do Estado de São Paulo (DAEE et al., 1984), na área de estudo predominam as formações Adamantina e Marília, que juntas correspondem à aproximadamente 99,65% da superfície total, sendo que a área remanescente (0,35%) é composta por pequenas ocorrências da Formação Corumbataí, Formação Pirambóia e por Depósitos Aluvionares.

Para a Formação Marília, atribuiu-se o índice **0,4**, devido à intensa cimentação por carbonato de cálcio nos arenitos, conferindo-lhe baixa permeabilidade. Por apresentar camadas argilosas e arenitos moderadamente cimentados, a Formação Adamantina recebeu o

índice **0,5**. Com relação à Formação Corumbataí, atribuiu-se o índice **0,3**, mediante a existência de litotipos com permeabilidade muito reduzida, como argilitos, siltitos, folhelhos e arenitos argilosos.

A Formação Pirambóia recebeu o índice **0,7**, cuja litologia é predominantemente arenosa, formada por arenitos finos a médios, com baixo conteúdo argiloso nas camadas mais superficiais. Com relação aos depósitos aluvionares, foi atribuído o índice **0,8**, por se tratar de materiais essencialmente arenosos e não consolidados, podendo apresentar elevada permeabilidade.

Para a geração do mapa temático referente ao parâmetro O, converteu-se o arquivo *shapefile* das formações geológicas para o formato *raster*, a partir da ferramenta *Feature to Raster* do módulo *Conversion Tools*, utilizando o *software* ArcGIS 10.0 (ESRI, 2010).

• D - Profundidade do nível d'água subterrânea

Para obter o mapa temático referente ao parâmetro D, foram utilizadas as profundidades do nível d'água subterrânea constantes na planilha Excel (MICROSOFT CORPORATION, 2007), elaborada para reunir, organizar e tratar os dados referentes ao conjunto de SEVs utilizadas nessa pesquisa.

Na área de estudo, as SEVs forneceram profundidades do nível d'água relacionadas a quatro intervalos para o parâmetro D do método GOD: menor que 10 metros (**1**); de 10 a 20 metros (**0,8**); de 20 a 50 metros (**0,5**) e maior que 50 metros (**0,4**).

A fim de estimar a superfície de isovalores referente à profundidade do nível d'água, com base nas informações disponíveis em cada SEV, foi utilizado o método de interpolação Curvatura Mínima, do *software* Surfer 8.0 (GOLDEN SOFTWARE INC., 2002).

A Curvatura Mínima é um método determinístico largamente utilizado nas ciências da Terra, cuja superfície resultante é suavizada e se assemelha a uma delgada camada linear e elástica, a qual atravessa cada um dos valores observados. Esse método não é um interpolador exato e, por isso, os dados nem sempre são respeitados em seus valores reais, podendo ser gerados valores acima do máximo e abaixo do mínimo (ANDRIOTTI, 2009; LANDIM, 2000). Os resultados obtidos a partir da utilização desse interpolador satisfazem ao objetivo do trabalho, que é avaliar preliminarmente a vulnerabilidade numa escala de trabalho regional, visando ressaltar as tendências existentes na área de estudo.

Após a elaboração do mapa de profundidade do nível d'água, foi realizada a conversão dos intervalos de profundidade nos índices específicos estabelecidos pelo método GOD para o

parâmetro D, por meio da ferramenta *Reclassify* do módulo *Spatial Analyst Tools*, do ArcGIS 10.0 (ESRI, 2010).

Por fim, efetuou-se a operação algébrica de multiplicação entre os três mapas temáticos referentes a cada parâmetro, ou seja: $G \times O \times D$, a partir da ferramenta *Raster Calculator* do módulo *Spatial Analyst Tools*, no ArcGIS 10.0 (ESRI, 2010), resultando no mapa de vulnerabilidade natural à contaminação.

B) Método Ekv

A fim de obter o mapa de vulnerabilidade natural à contaminação para a área de estudo, a partir do método Ekv, foram produzidos mapas específicos para os dois parâmetros considerados. Cada mapa temático foi organizado com base nos índices predeterminados por Auge (2004), para serem integrados e gerar o mapa de vulnerabilidade final.

Para tanto, foram adotados os procedimentos metodológicos descritos a seguir.

- **E - Espessura da zona não saturada**

Como o Sistema Aquífero Bauru na área de estudo é livre, as profundidades do nível d'água registradas correspondem exatamente às espessuras da zona não saturada. Nesse sentido, para obter o mapa temático referente ao parâmetro E, aproveitou-se o mapa de profundidade do nível d'água elaborado anteriormente para o método GOD.

Esse parâmetro é o mesmo considerado no método GOD, denominado “D”, porém com diferentes índices atribuídos aos intervalos de profundidade do nível d'água. No método GOD, são atribuídos a esse parâmetro índices que variam de 0,4 a 1 e, no método Ekv, os índices variam de 1 a 5.

Na área de estudo, a interpretação das SEVs indicou profundidades do nível d'água relacionadas a quatro índices do método Ekv: de 2 a 5 metros (**4**); de 5 a 10 metros (**3**); de 10 a 30 metros (**2**) e maior que 30 metros (**1**).

Para ser utilizado na avaliação de vulnerabilidade, foi realizada a transformação dos intervalos de profundidade nos índices específicos estabelecidos pelo método Ekv para o parâmetro E, por meio da ferramenta *Reclassify* do módulo *Spatial Analyst Tools*, do software ArcGIS 10.0 (ESRI, 2010).

- **Kv - Condutividade hidráulica vertical da zona não saturada**

Esse índice é definido como sendo o volume de água que irá fluir através de uma unidade de área da rocha por unidade de tempo, sob uma unidade de gradiente hidráulico e a uma temperatura específica, representando, desse modo, uma medida de velocidade em m/s ou m/d (CRÓSTA, 2000).

A condutividade hidráulica foi obtida a partir da estimativa descrita no item 4.2.5, anteriormente apresentado. Na área de estudo, ocorrem faixas de condutividade hidráulica relacionadas a três índices estabelecidos pelo método EKv: menor que 10^{-3} m/d (1); de 10^{-3} a 10^{-2} m/d (2) e de 10^{-2} a 1,0 m/d (3).

Com base nos valores de condutividade hidráulica estimados para cada SEV, foi criado um mapa de isovalores no Surfer 8.0 (GOLDEN SOFTWARE INC., 2002). Posteriormente, os intervalos de condutividade foram reordenados para se relacionarem com os índices propostos pelo método EKv, por intermédio da ferramenta *Reclassify* do módulo *Spatial Analyst Tools*, no ArcGIS 10.0 (ESRI, 2010).

Em seguida, efetuou-se a operação algébrica de soma entre os dois mapas temáticos referentes a cada parâmetro, isto é: $E + Kv$, a partir da ferramenta *Raster Calculator* do módulo *Spatial Analyst Tools*, no ArcGIS 10.0 (ESRI, 2010). Por último, o mapa obtido foi reclassificado segundo a escala de índices de vulnerabilidade proposta pelo método EKv, por meio da ferramenta *Reclassify* do módulo *Spatial Analyst Tools*, do *software* supracitado, resultando no mapa de vulnerabilidade final.

C) Método da Condutância Longitudinal Unitária (S)

Para produzir o mapa de vulnerabilidade natural para a área de estudo, foram gerados mapas temáticos para cada um dos dois parâmetros do método S. A partir do quociente entre esses mapas e reclassificação do resultado, conforme os intervalos estabelecidos para os valores de condutância longitudinal, obteve-se o mapa de vulnerabilidade natural definitivo. Assim, foram adotados os procedimentos metodológicos descritos a seguir.

- **E - Espessura da zona não saturada**

Analogamente ao método EKv, foi reaproveitado o mapa de profundidade do nível d'água, uma vez que as espessuras das camadas geolétricas correspondem às espessuras da zona não saturada ou, em outras palavras, às profundidades do nível d'água obtidas em cada SEV.

- **ρ - Resistividade elétrica**

Segundo Braga (2008), os valores de resistividade obtidos para a primeira camada da zona saturada podem ser extrapolados para a zona não saturada imediatamente acima, desde que haja semelhança entre os materiais. Portanto, adotou-se esse procedimento para obter os valores de resistividade da zona insaturada. Assim, foi elaborado um mapa de isovalores para esse parâmetro, utilizando-se o *software* Surfer 8.0.

Após a obtenção dos mapas temáticos referentes aos dois parâmetros do método, foi realizado o quociente entre eles: E / ρ , por meio da ferramenta *Raster Calculator* do módulo *Spatial Analyst Tools*. Em seguida, o mapa obtido foi reclassificado conforme os intervalos de condutância longitudinal, a partir da ferramenta *Reclassify* do módulo *Spatial Analyst Tools*, do ArcGIS 10.0, resultando no mapa de vulnerabilidade final.

4.2.8 Redação da Discussão dos Resultados

As discussões foram baseadas na exposição e posterior comparação entre os resultados alcançados. Desse modo, foi possível indicar qual método foi mais adequado para a avaliação da vulnerabilidade natural da área de estudo, com base nas características litológicas e hidrogeológicas, classes de vulnerabilidade obtidas, níveis de detalhe oferecidos pelos mapas e disponibilidade dos dados utilizados na avaliação.

4.2.9 Redação das Considerações Finais e Recomendações

Essa etapa avaliou se os resultados obtidos corresponderam aos objetivos propostos, apontando as desvantagens e potencialidades da aplicação de cada método, bem como de que forma os produtos gerados poderão ser utilizados pelo Poder Público na tomada de decisões, quanto à gestão dos recursos hídricos subterrâneos da área de estudo. Além disso, foram feitas recomendações quanto à possibilidade da elaboração de trabalhos futuros, com o propósito de preencher lacunas do conhecimento produzidas pela presente pesquisa, como por exemplo, a contribuição da geofísica na avaliação da vulnerabilidade natural à contaminação de aquíferos.

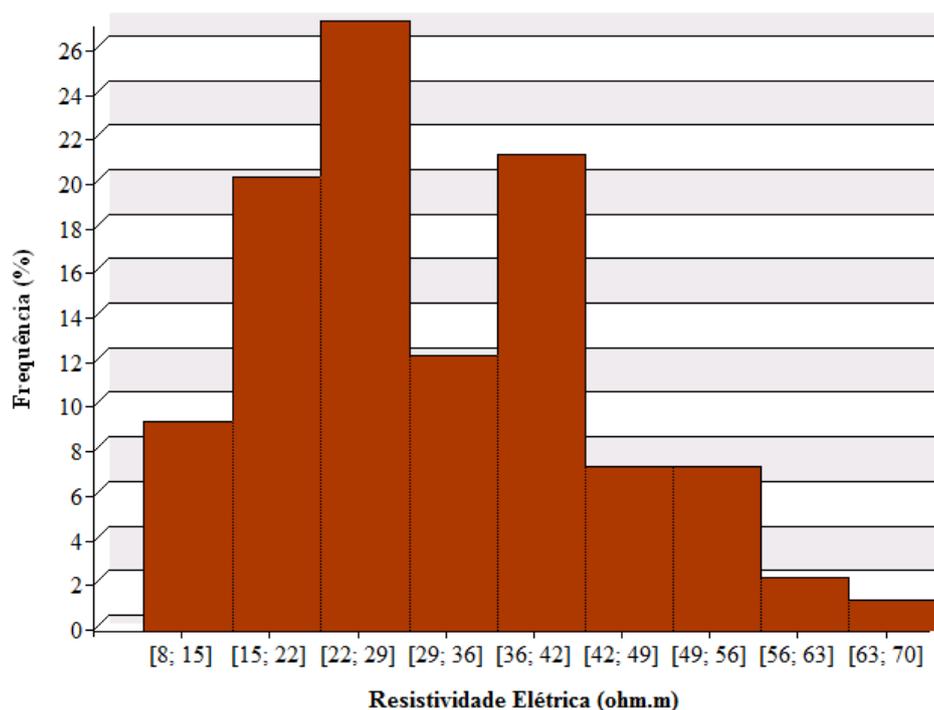
CAPÍTULO 5 – RESULTADOS E DISCUSSÕES

No presente capítulo, são apresentados e discutidos os resultados obtidos a partir do cumprimento sistemático dos procedimentos metodológicos.

5.1 RESISTIVIDADE DA ZONA NÃO SATURADA

A resistividade elétrica da zona não saturada variou entre 8,0 $\Omega.m$ e 70,0 $\Omega.m$, com valor médio e desvio padrão iguais a 30,2 $\Omega.m$ e 12,7 $\Omega.m$, respectivamente. De acordo com o histograma, os valores mais frequentes encontram-se no centro da distribuição, no intervalo entre 22 $\Omega.m$ e 42 $\Omega.m$, indicando comportamento geológico predominantemente correlacionável a materiais areno-argilosos na área de estudo (Figura 32).

Figura 32 - Histograma da distribuição dos valores de resistividade da zona não saturada.



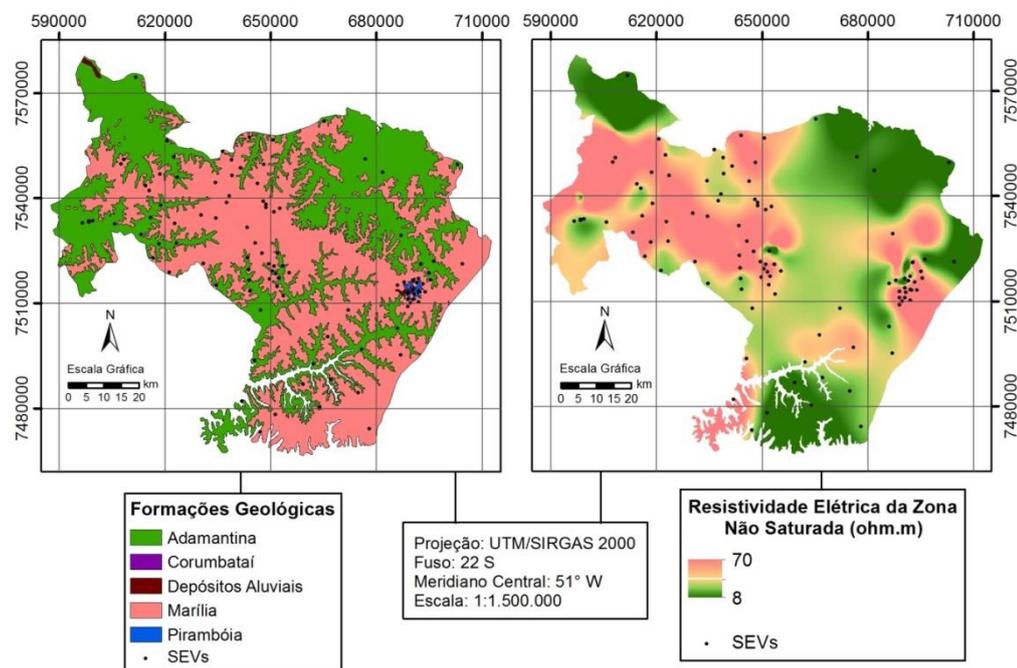
Fonte: Elaborado pelo autor.

De modo geral, quanto menores são os valores de resistividade, mais argilosos serão os materiais da zona saturada. As menores resistividades elétricas situam-se, sobretudo, nos domínios das formações Adamantina e Corumbataí, nas quais há o predomínio de arenitos argilosos e materiais siltosos.

Áreas com resistividades elétricas um pouco mais elevadas foram encontradas dentro dos limites da Formação Marília, que possui conteúdo em argila levemente inferior ao verificado na Formação Adamantina. Em linhas gerais, a Formação Pirambóia e os pequenos fragmentos de Depósitos Aluvionares também apresentaram valores de resistividades elétricas superiores aos registrados para a Formação Adamantina, devido a sua composição predominantemente arenosa.

No interior dos limites geográficos de uma formação geológica sedimentar, pode existir certa diversidade litológica em alguns locais conforme variações paleoambientais, no momento da deposição das unidades, tendendo a ocorrer com maior frequência naquelas que ocupam áreas extensas, como é o caso das formações Adamantina e Marília. Por esse motivo, os limites das classes de resistividade apresentadas na Figura 33 não correspondem exatamente aos limites daquelas formações geológicas, devido à heterogeneidade dos materiais existentes e da distribuição espacial dos dados interpolados.

Figura 33 - Relação entre as resistividades elétricas e a litologia da área de estudo.



Fonte: Elaborado pelo autor.

5.2 CONDUTIVIDADE HIDRÁULICA VERTICAL DA ZONA NÃO SATURADA

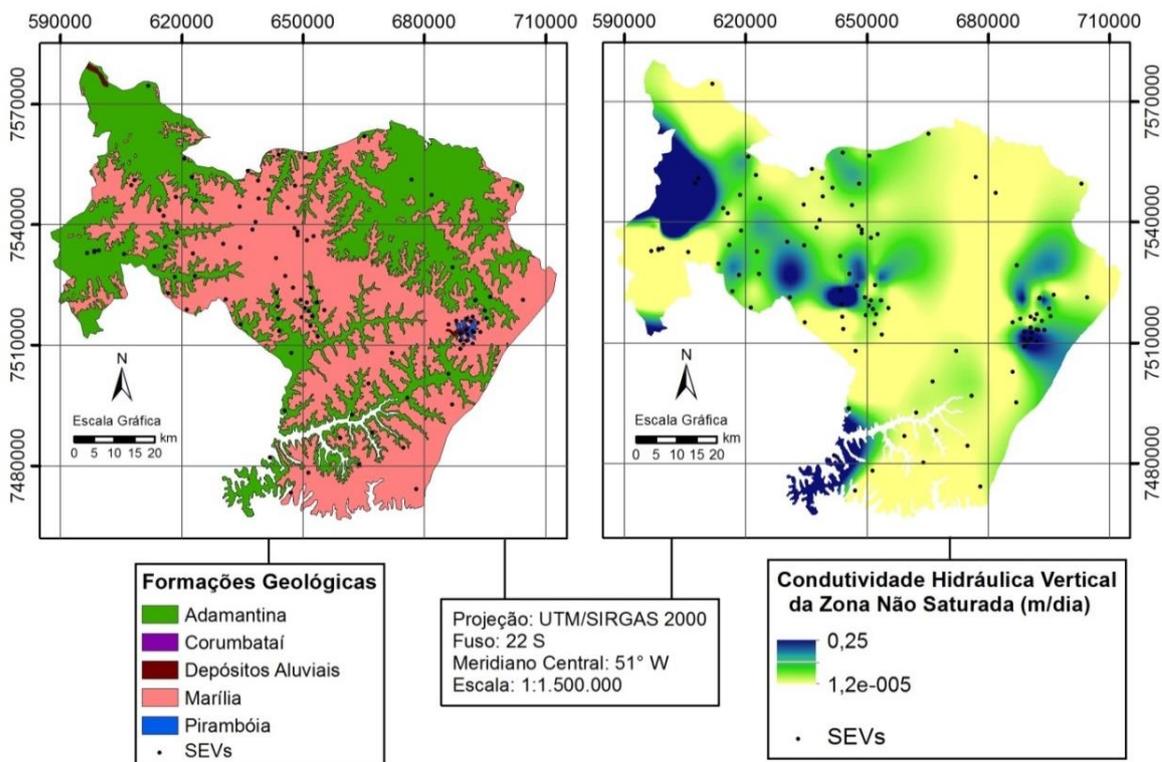
Os valores de condutividade hidráulica vertical (K_V), estimados a partir das resistividades da primeira camada da zona saturada extrapoladas para o horizonte insaturado,

foram compatíveis com os frequentemente observados nos sedimentos areno-argilosos das formações Adamantina e Marília. Foram obtidos valores de K_V entre $1,2 \times 10^{-5}$ e $0,25$ m/d (Figura 34), ligeiramente inferiores aos encontrados em testes de bombeamento *in situ* realizados na unidade aquífera Bauru Superior/Médio (Aquíferos Adamantina e Marília) (DAEE, 1979), os quais forneceram valores de condutividade hidráulica horizontal (K_H) entre 0,1 e 0,4 m/d.

Segundo Feitosa e Manoel Filho (2008), a diferença entre os valores de K_V e K_H em aquíferos porosos pode ser atribuída a dois principais fatores: um deles é que as partículas não são esféricas e geralmente depositam-se com o lado plano para baixo, e o outro é que os aquíferos são formados por camadas superpostas de diferentes materiais. Assim, as camadas horizontais menos permeáveis retardam o escoamento vertical sem, contudo, afetar significativamente o escoamento horizontal nas outras camadas, de modo que o valor da condutividade hidráulica na horizontal é maior que o valor na direção vertical.

Em linhas gerais, na área de estudo foram registrados baixos valores de condutividade hidráulica vertical, em virtude da predominância de litotipos areno-argilosos, sendo frequente a cimentação por carbonato de cálcio e a presença de nódulos carbonáticos que reduzem expressivamente a permeabilidade.

Figura 34 - Relação entre a condutividade hidráulica (K_V) e a litologia da área de estudo.

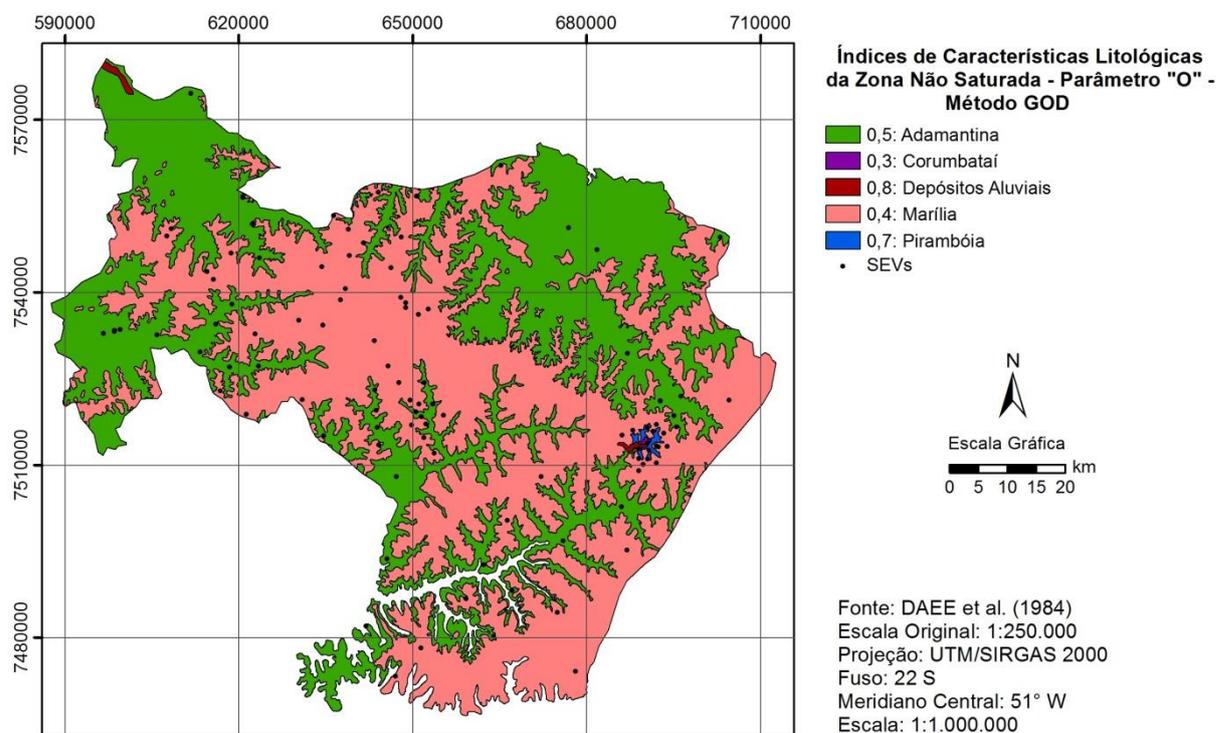


Fonte: Elaborado pelo autor.

5.3 MAPEAMENTO DA VULNERABILIDADE A PARTIR DO MÉTODO GOD

O mapa temático referente ao parâmetro G não foi apresentado, pois se trata de aquífero livre, cujos limites correspondem exatamente à totalidade da área de estudo. O mapa referente aos estratos de cobertura (parâmetro O) é apresentado na Figura 35, equivalente ao mapa das formações geológicas (Figura 6), para o qual foram atribuídos os índices propostos pelo método GOD.

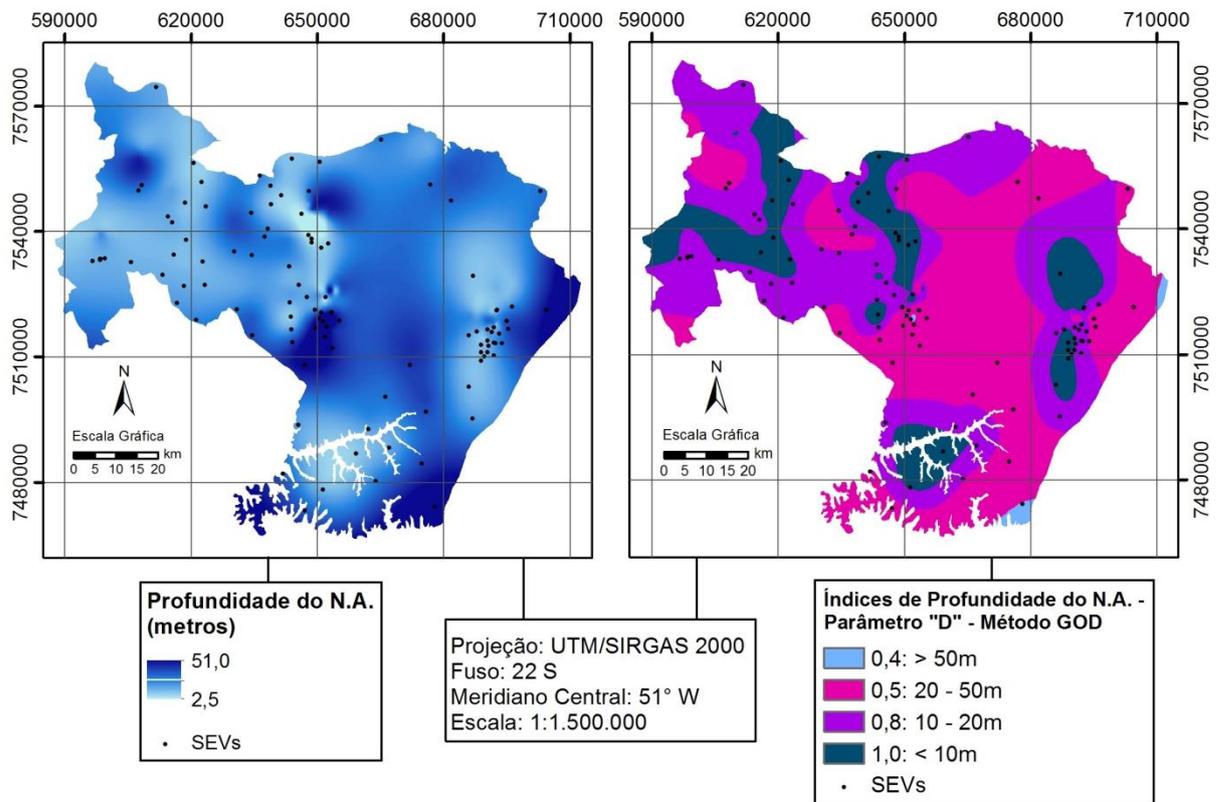
Figura 35 - Distribuição espacial do parâmetro O na área de estudo.



Fonte: Elaborado pelo autor.

As profundidades do nível d'água subterrânea variaram entre 2,5 e 51 metros, com valor médio de 15,41 metros. A partir da reclassificação do mapa de profundidades do nível d'água, foram obtidos intervalos referentes a quatro índices do método GOD, conforme a Figura 36. Cabe realçar que houve a predominância do índice igual a 0,5 (20 – 50 metros) e, secundariamente, o índice 0,8 (10 – 20 metros). Profundidades do nível d'água maiores que 50 metros (índice 0,4) ocorrem nos extremos sudeste e leste da área de estudo.

Figura 36 - Distribuição espacial do parâmetro D na área de estudo.



Fonte: Elaborado pelo autor.

A integração dos mapas temáticos concernentes aos três parâmetros do método GOD resultou num mapa de vulnerabilidade homogêneo (Figura 37). Aproximadamente 56% da área de estudo apresentaram vulnerabilidade média, incluindo áreas com baixa vulnerabilidade, que correspondem a 43,5% da superfície total (Tabela 9). Áreas com vulnerabilidade desprezível não foram encontradas.

Áreas alta e extremamente vulneráveis foram identificadas, porém, são pequenos fragmentos referentes aos locais de ocorrência de litotipos essencialmente arenosos e com elevada permeabilidade, como os sedimentos da Formação Pirambóia e dos depósitos aluvionares, onde as profundidades do nível d'água subterrânea são menores.

Na área de estudo, das vinte e três áreas declaradas contaminadas pela CETESB (2011), quinze (65%) estão localizadas nas áreas classificadas como média vulnerabilidade. As áreas contaminadas restantes (35%) situam-se em locais de baixa vulnerabilidade, corroborando a afirmação de que é possível uma determinada área apresentar baixa vulnerabilidade, porém alto risco à contaminação, em função do desenvolvimento de atividades com alto potencial poluidor, no caso da área de estudo, postos de combustíveis.

Figura 37 - Mapa de vulnerabilidade resultante da aplicação do método GOD.

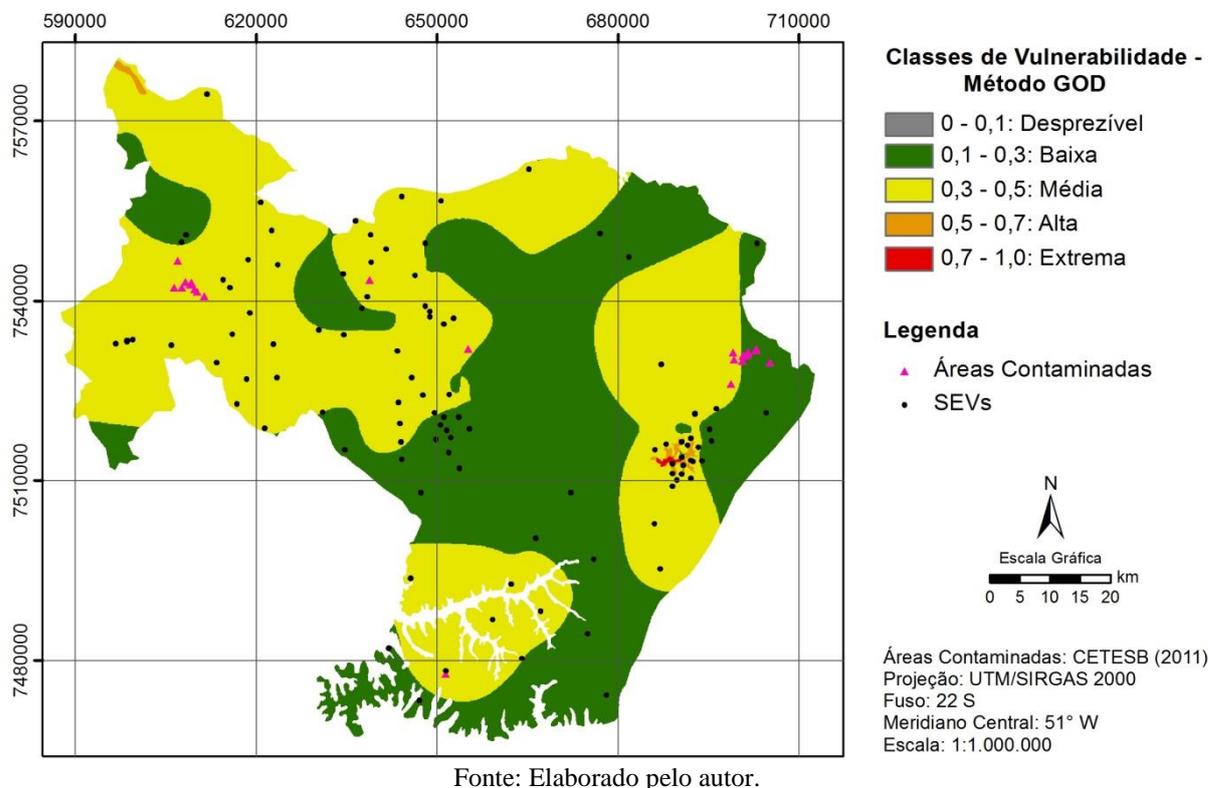


Tabela 9 - Relação entre as classes de vulnerabilidade obtidas no método GOD e a área total.

<i>Classes de Vulnerabilidade</i>	<i>Área (km²)</i>	<i>(%)</i>
Baixa	3.082,47	43,50
Média	3.977,59	56,13
Alta	21,65	0,31
Extrema	4,29	0,06
TOTAL	7.086,00	100

Fonte: Elaborado pelo autor.

O mapa da Figura 37 apresentou alta similaridade com o resultado da avaliação efetuada por IG/CETESB/DAEE (1997), que classificou a vulnerabilidade da área de estudo entre baixa e média, preservando, aproximadamente, a mesma proporção entre as duas classes de vulnerabilidade obtidas pelos autores supracitados.

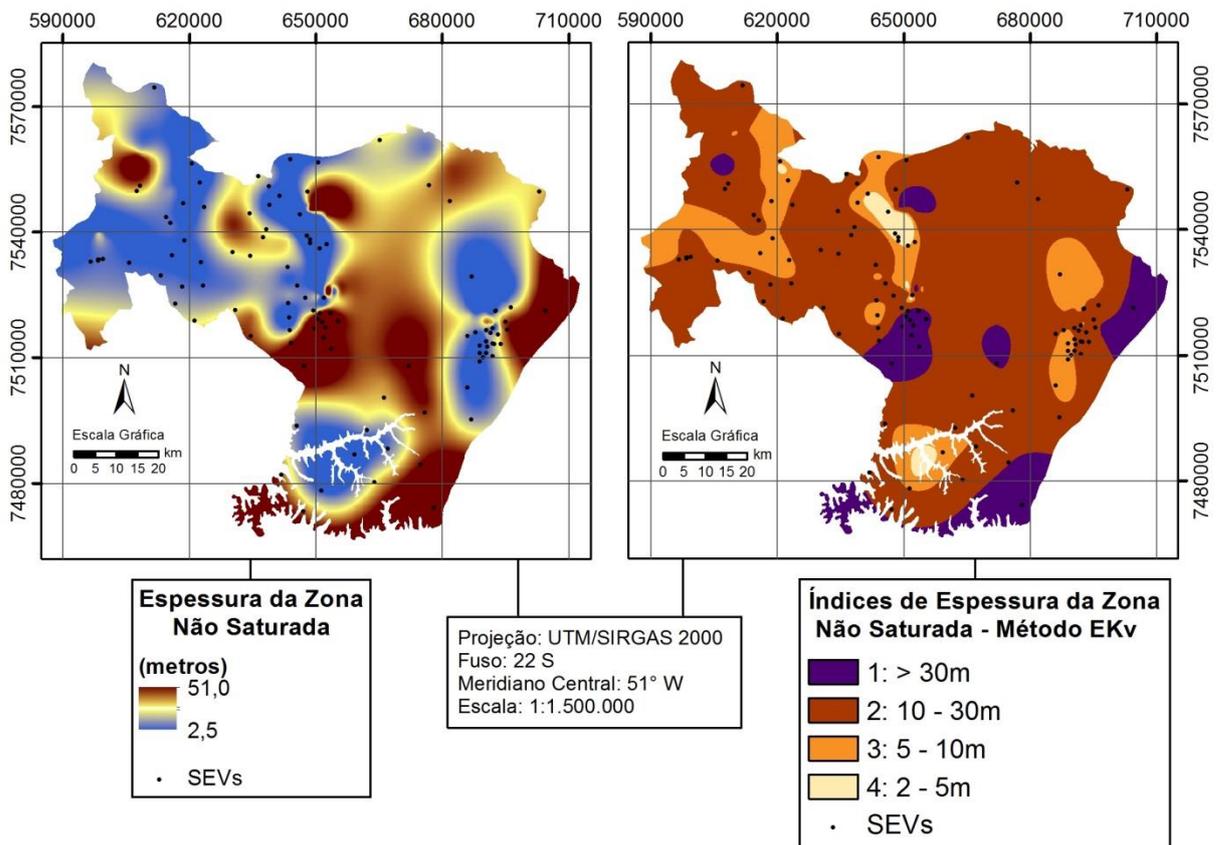
No entanto, devido à utilização da litologia na escala 1:250.000, o mapa de vulnerabilidade ora resultante indicou pequenas áreas de alta e extrema vulnerabilidade e, por isso, pode ser considerado um pouco mais detalhado que o elaborado por IG/CETESB/DAEE (1997), refletindo a influência da escala de trabalho na obtenção do produto final.

5.4 MAPEAMENTO DA VULNERABILIDADE A PARTIR DO MÉTODO EK_v

Com relação ao parâmetro **E** (espessura da zona não saturada), foram obtidos quatro dos cinco intervalos estabelecidos pelo método EK_v. A menor espessura foi igual a 2,5 metros e a maior, 51 metros, visto que essa faixa de valores corresponde às profundidades do nível d'água subterrânea (Figura 38).

Em grande parte da área de estudo, predominou o índice de espessura da zona não saturada igual a 2 (10 – 30 metros). O índice menos frequente foi igual a 4 (2 – 5 metros), com impacto reduzido no cálculo do índice de vulnerabilidade final.

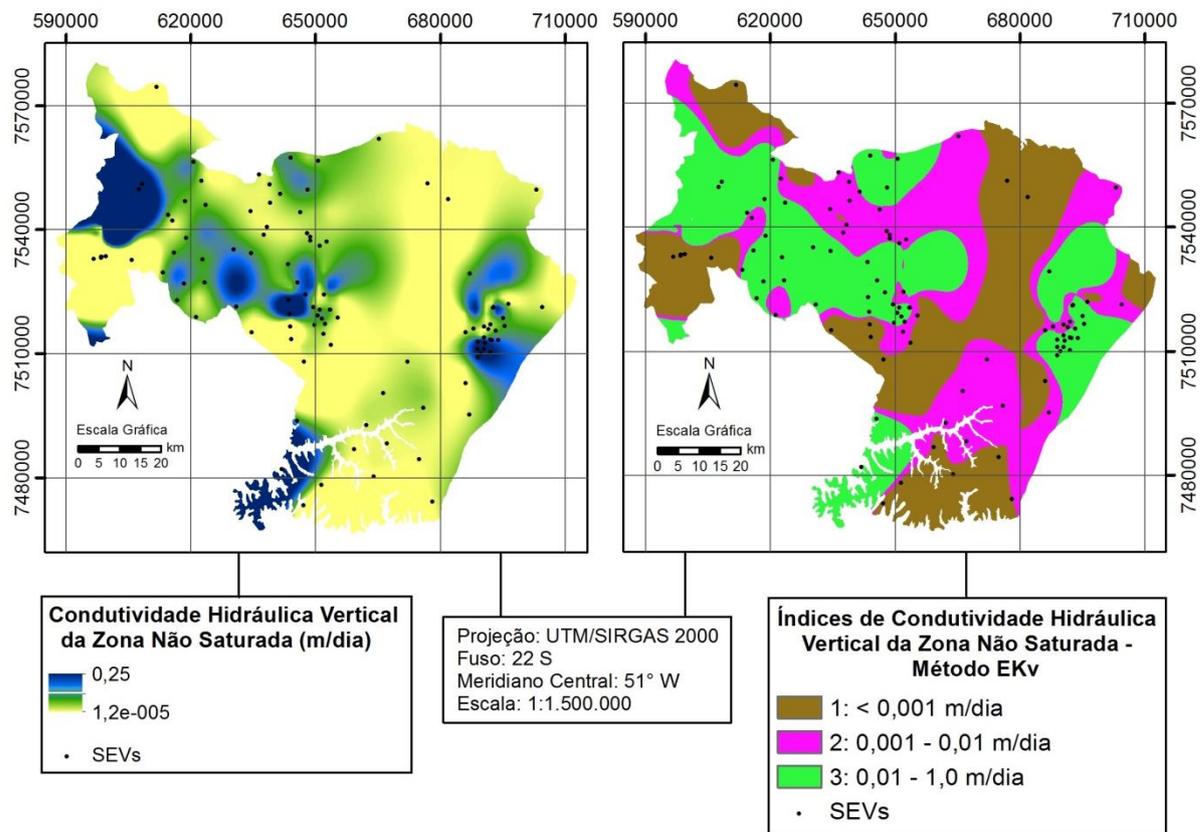
Figura 38 - Espessuras da zona não saturada e os índices estabelecidos pelo método EK_v.



Fonte: Elaborado pelo autor.

A reclassificação do mapa de condutividade hidráulica vertical da zona não saturada ofereceu três dos cinco índices **K_v** propostos pelo método EK_v (Figura 39), com distribuição relativamente equilibrada entre os índices por toda a área de estudo.

Figura 39 - Valores de condutividade hidráulica e os índices estabelecidos pelo método EKv.

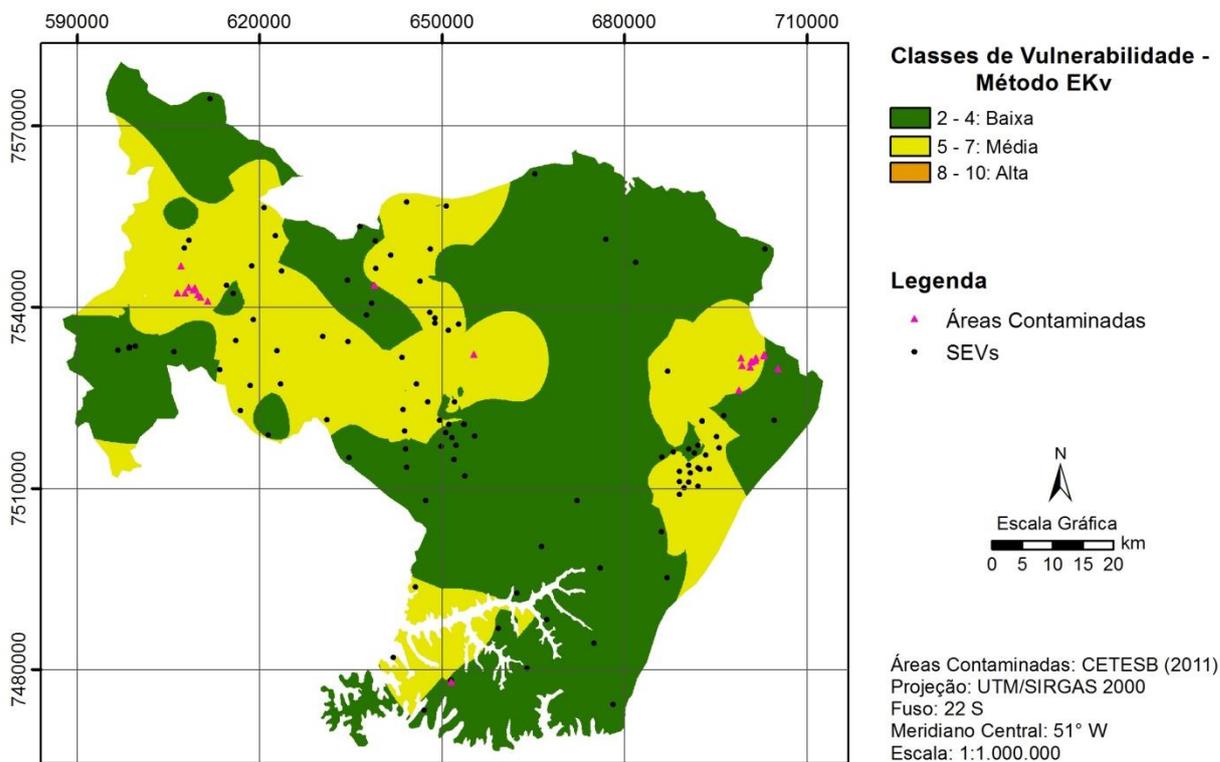


Fonte: Elaborado pelo autor.

A soma algébrica entre os mapas de espessura e condutividade hidráulica vertical da zona não saturada resultou no mapa de vulnerabilidade apresentado na Figura 40. Esse resultado pode ser considerado um pouco mais generalista e conservador, já que foram detectadas apenas áreas com baixa (63,97%) e média (36,03%) vulnerabilidade (Tabela 10), expressando a menor capacidade do método em produzir mapas mais detalhados.

Na área de estudo, aproximadamente 87% das áreas declaradas contaminadas pela CETESB (2011) situam-se em áreas classificadas pelo método EKv como média vulnerabilidade, resultado que pode ser considerado coerente, uma vez que é mais provável a ocorrência de um número maior de áreas contaminadas em regiões cuja vulnerabilidade é maior, embora o contrário também possa ocorrer.

Figura 40 - Mapa de vulnerabilidade obtido com a aplicação do método EKv.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Tabela 10 - Relação entre as classes de vulnerabilidade obtidas no método EKv e a área total.

<i>Classes de Vulnerabilidade</i>	<i>Área (km²)</i>	<i>(%)</i>
Baixa	4.532,56	63,97
Média	2.553,44	36,03
TOTAL	7.086,00	100

Fonte: Elaborado pelo autor.

Ao propor o método EKv, Auge (2004) estabeleceu faixas de valores muito amplas para alguns índices, que podem influenciar no cálculo dos índices de vulnerabilidade finais e resultar em mapas com maior homogeneidade de classes, conforme o apresentado na Figura 40.

No que se refere ao parâmetro Kv, por exemplo, o autor supracitado adotou para os índices 3, 4 e 5 as faixas de 10⁻² a 1, de 1 a 50 e de 50 a 500 m/d, respectivamente, as quais poderiam ter sido subdivididas em mais índices, a fim de oferecer um produto final com maior detalhamento. Tal observação também se aplica ao índice 2 (10 - 30m) do parâmetro E.

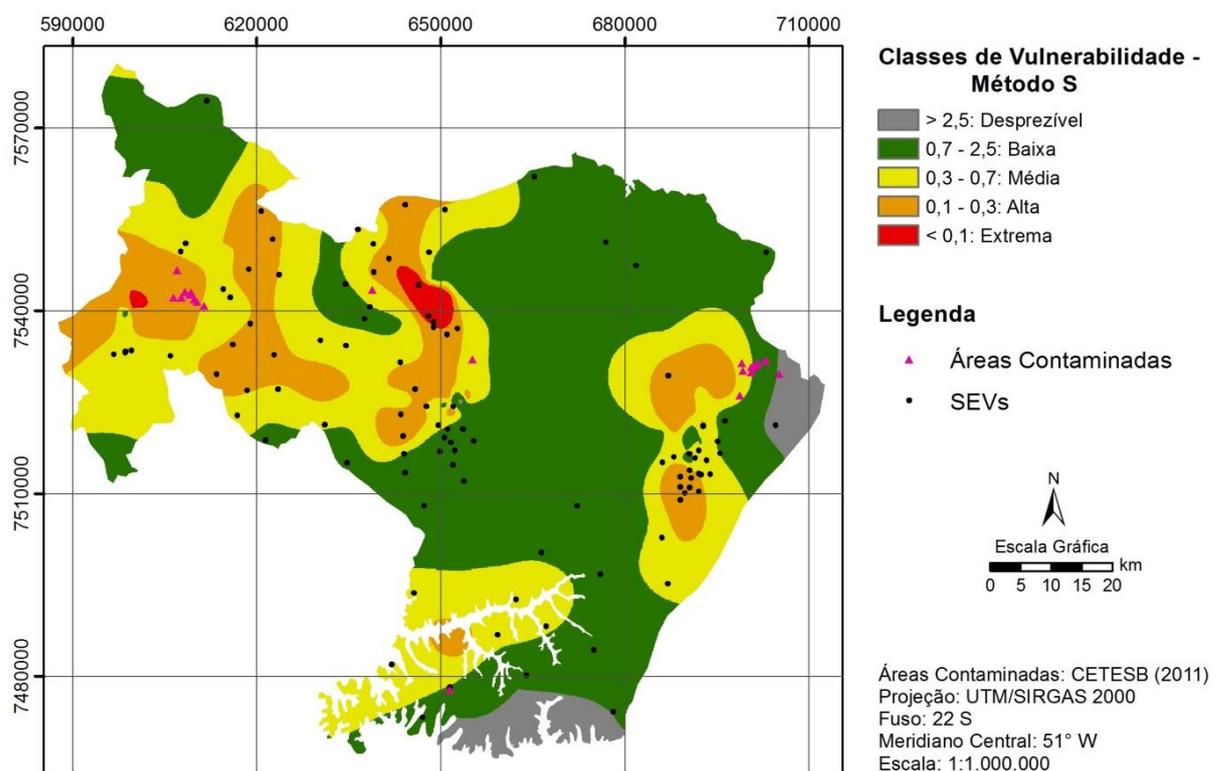
5.5 MAPEAMENTO DA VULNERABILIDADE A PARTIR DO MÉTODO (S)

A partir da operação de divisão algébrica entre os mapas de profundidade do nível d'água subterrânea (equivalente à espessura da zona insaturada) e resistividade elétrica, obteve-se um mapa de vulnerabilidade mais heterogêneo (Figura 41), cuja distribuição de classes pela área de estudo foi mais equilibrada.

Em aproximadamente 50% da área, houve o predomínio de regiões com baixa vulnerabilidade e, secundariamente, áreas com média vulnerabilidade, que representam 30,6% da superfície total (Tabela 11). Foram detectadas áreas alta e extremamente vulneráveis, que juntas correspondem a cerca de 16% da área de estudo, nos locais com predominância de materiais arenosos mais permeáveis e profundidades do nível d'água menores. Além disso, a aplicação do método S indicou a existência de áreas com vulnerabilidade desprezível (3,83%), localizadas nos extremos leste e sul, onde há a transição para o aquífero fraturado Serra Geral.

Com relação às áreas contaminadas (CETESB, 2011), 70% do total localizam-se nas áreas com média e alta vulnerabilidade, sendo que desse percentual, 60% situam-se em regiões classificadas como altamente vulneráveis, o que pode ser considerado um indicativo da sensibilidade do método S.

Figura 41 - Mapa de vulnerabilidade resultante da aplicação do método S.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Tabela 11 - Classes de vulnerabilidade obtidas no método S e a área total.

<i>Classes de Vulnerabilidade</i>	<i>Área (km²)</i>	<i>(%)</i>
Desprezível	271,46	3,83
Baixa	3.526,81	49,77
Média	2.168,24	30,60
Alta	1.063,03	15,00
Extrema	56,46	0,8
TOTAL	7.086,00	100

Fonte: Elaborado pelo autor.

5.6 COMPARAÇÃO ENTRE OS RESULTADOS

Com base na análise dos mapas Ekv e S, predominam regiões com baixa vulnerabilidade, tendência já esperada para a área de estudo, uma vez que em 55% da superfície total ocorre a Formação Marília, cujo alto teor de cimento carbonático torna seus sedimentos praticamente impermeáveis sob o ponto de vista prático.

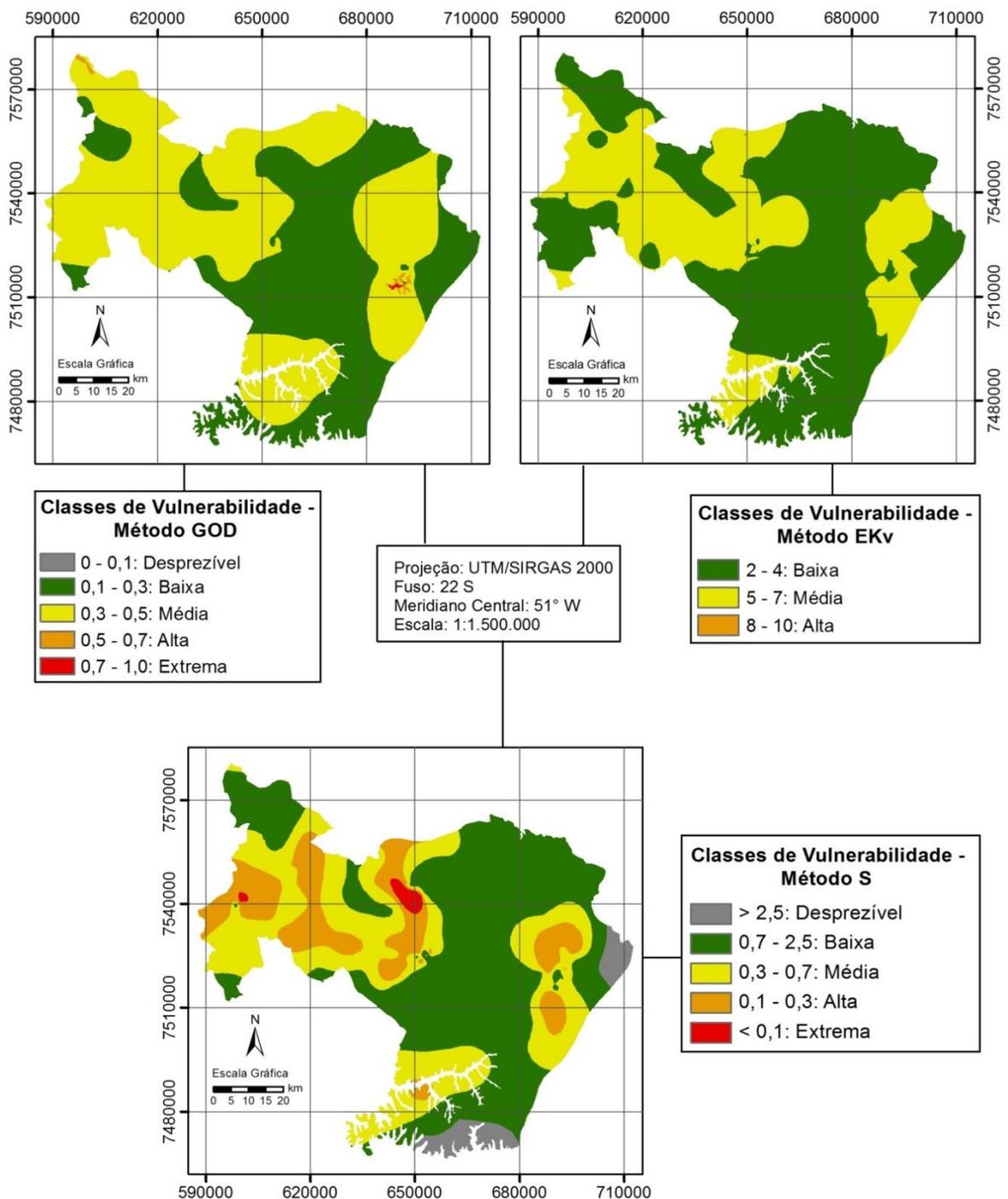
Por outro lado, no mapa resultante da aplicação do método GOD, 56% da área de estudo foram classificados como média vulnerabilidade a alguns contaminantes, mas somente quando continuamente lançados ou lixiviados (FOSTER; HIRATA, 1988), embora a segunda classe mais expressiva seja baixa vulnerabilidade (43,5%), indicando um ligeiro equilíbrio entre as duas classes.

De modo geral, os métodos GOD e Ekv produziram mapas mais homogêneos, com pouca variabilidade de classes e detalhamento. Em contrapartida, a aplicação do método S resultou num mapa mais detalhado, com maior variabilidade de classes (Figura 42). Por isso, o método S pode ser considerado o mais adequado para avaliar a vulnerabilidade da área de estudo, considerando a heterogeneidade e distribuição das classes e, sobretudo, os resultados esperados com base nas características geológicas e hidrogeológicas.

Primeiramente, tal conclusão deve ser alicerçada no fato de que, o método S, não avalia a vulnerabilidade por meio da atribuição de índices a formações geológicas, feições altamente heterogêneas. Pelo contrário, esse método considera a vulnerabilidade da litologia por meio da estimativa de parâmetros mensuráveis, como as espessuras e as resistividades elétricas dos materiais da camada não saturada, reduzindo, desse modo, a subjetividade. A ausência desse fator pode ser elencada como uma das limitações do método GOD, no qual os estratos de cobertura sempre são considerados homogêneos em toda a extensão que ocupam, no momento da atribuição dos índices, que resultam de uma comparação subjetiva entre as litologias.

Além disso, as faixas dos índices de vulnerabilidade do método S são discretas, cuja determinação proveio das razões entre as espessuras e resistividades. Logo, o mapa de vulnerabilidade resultante é menos generalista e mais detalhado, oferecendo maior variabilidade de classes, característica que pode ser apontada como uma deficiência do método Ekv.

Figura 42 - Comparação entre os mapas GOD, Ekv e S.



Fonte: Elaborado pelo autor.

CAPÍTULO 6 – CONSIDERAÇÕES FINAIS E RECOMENDAÇÕES

Indubitavelmente, é expressiva a contribuição dos recursos hídricos subterrâneos para o abastecimento público dos municípios pertencentes à área de estudo. Soma-se a isso, o crescente comprometimento da qualidade das águas subterrâneas por elevadas concentrações de nitrato, bem como a existência ainda que incipiente, de áreas declaradas contaminadas que resultam, principalmente, do desenvolvimento de atividades de postos de combustíveis nos municípios de maior destaque regional, como Bauru e Marília.

Portanto, são fundamentais os trabalhos com enfoque na avaliação da vulnerabilidade natural do Sistema Aquífero Bauru, na região Centro-Sul do Estado de São Paulo, na medida em que permitem estimar áreas mais sensíveis à poluição, e desse modo, planejar a instalação e operação de empreendimentos potencialmente nocivos aos recursos aquíferos.

Em linhas gerais, foram satisfatórios os resultados obtidos com os métodos empregados para estimar a vulnerabilidade, considerando as respostas esperadas conforme os aspectos litológicos e hidrogeológicos da área de estudo, inclusive os resultados obtidos em estudos prévios. Entretanto, devem ser consideradas as limitações inerentes a cada proposta, sobretudo quanto à subjetividade envolvida na determinação dos limiares de cada faixa de valores dos índices de vulnerabilidade, inclusive o modo de integração de dados em cada método.

A aplicação do método GOD originou um mapa homogêneo, predominando áreas com média vulnerabilidade, sendo que as regiões mais vulneráveis foram localizadas nos domínios da Formação Pirambóia e dos depósitos aluvionares, onde prevalece a ocorrência de materiais arenosos e mais permeáveis, bem como menores profundidades do nível d'água subterrânea.

A utilização do método EKV resultou num mapa ainda mais homogêneo que o mapa GOD, visto que foram detectadas apenas duas classes de vulnerabilidade, com a maior parte da área classificada como baixa vulnerabilidade, devido, principalmente, aos valores reduzidos de condutividade hidráulica vertical.

Quando comparado aos mapas GOD e EKV, o mapa resultante da aplicação do método S, baseado nos valores de condutância longitudinal unitária, foi considerado o mais adequado para a avaliação da vulnerabilidade da área, em virtude do maior detalhamento e variabilidade de classes, predominando regiões com baixa vulnerabilidade. Portanto, recomenda-se sua aplicação, caso os dados necessários estejam disponíveis, sobretudo, os valores de resistividade elétrica.

Uma das vantagens do método S é o maior grau de detalhamento do mapa de vulnerabilidade e a minimização da subjetividade (condicionados à malha de amostragem), a partir de apenas dois parâmetros de entrada, algo muito interessante considerando-se o cenário de escassez de dados disponíveis em diversas regiões do Brasil.

A utilização de dados provenientes de SEVs pode representar algumas vantagens, tais como: baixos custos para a avaliação rápida e precisa de áreas extensas; versatilidade em termos de profundidade de investigação, sem alterar as condições dos materiais envolvidos; e a disponibilidade de programas avançados para o processamento de dados.

Todavia, as incertezas inerentes ao processamento desses dados podem ser reduzidas, caso sejam considerados na interpretação do modelo geoeletrico inicial dados confiáveis sobre a geologia e hidrogeologia, adquiridos em estudos precedentes ou a partir de perfis descritivos de poços preexistentes.

Por outro lado, é adequado o uso dos métodos GOD e Ekv em estudos preliminares de vulnerabilidade, cuja aplicação é simplificada pela quantidade reduzida de parâmetros de entrada, que geralmente são de fácil aquisição em estudos sobre geologia e hidrogeologia regionais.

É oportuno ressaltar que os métodos GOD, Ekv e S são apropriados ao reconhecimento regional da vulnerabilidade, devendo ser compreendidos como o primeiro estágio para a avaliação do perigo de poluição do aquífero, com o propósito de criar prioridades. A partir dessa avaliação preliminar, torna-se necessária uma análise mais pormenorizada, através do uso de métodos de avaliação mais detalhados, como o DRASTIC, que utiliza uma quantidade maior de parâmetros.

O inventário de dados geológicos, hidrogeológicos e geofísicos relativos à área de estudo, inclusive os mapas de vulnerabilidade resultantes da integração entre eles, podem fornecer subsídios ao Poder Público na elaboração de instrumentos de planejamento e gestão do uso e ocupação do solo, para a proteção e uso racional das águas subterrâneas, delineando estratégias de monitoramento.

Especificamente, as prefeituras municipais podem atualizar suas bases digitais ou, até mesmo, criar novos bancos de dados geográficos a partir dessas informações. Assim, direciona-se a tomada de decisões quanto à proposição de novos Planos Diretores, devidamente embasados em estudos de Zoneamento Ambiental, os quais constituem um dos instrumentos da Avaliação de Impacto Ambiental (AIA) no Brasil, estabelecida pela Política Nacional do Meio Ambiente - PNMA (Lei nº 6.938/1981) (BRASIL, 1981).

É importante sinalizar que uma atenção especial deve ser dedicada ao município de Bauru, por parte do Poder Público local e órgãos ambientais competentes, visto que corresponde a uma das seis áreas potenciais de restrição, controle de captação e uso das águas subterrâneas, definidas pela Resolução SMA nº 14/2010 (SMA, 2010). Conforme os três mapas de vulnerabilidade obtidos na presente pesquisa, o Sistema Aquífero Bauru apresenta vulnerabilidade moderada na zona urbana do município de Bauru, onde ocorrem atividades com alto potencial poluidor.

A utilização de técnicas de geoprocessamento com auxílio de SIGs foi extremamente importante para alcançar os objetivos propostos, pois um grande volume de dados de natureza distinta pôde ser processado e integrado, de maneira rápida e eficiente, contribuindo para a difusão e consolidação do uso das geotecnologias na gestão de recursos hídricos subterrâneos.

Com base na análise dos resultados, recomenda-se o desenvolvimento de estudos futuros com o intuito de preencher lacunas do conhecimento surgidas no decorrer da pesquisa, cujo escopo poderá contemplar o teste de interpoladores exatos para gerar os mapas temáticos de interesse, como a Krigagem.

Adicionalmente, novas avaliações de vulnerabilidade poderão ser realizadas por meio da aplicação de métodos mais detalhados como o DRASTIC ou pela inserção de novos parâmetros nos métodos GOD, Ekv e S, por exemplo, a declividade do terreno, dados pluviométricos e de geologia estrutural, especialmente, a ocorrência de falhas e fraturas que podem estabelecer caminhos preferenciais para a contaminação.

No que se refere à contribuição da geofísica na avaliação da vulnerabilidade de aquíferos, poderá ser gerado um novo mapa a partir do método S, por intermédio de uma malha de amostragem mais densa e melhor distribuída geograficamente pela área de estudo, a fim de aumentar o nível de detalhe e minimizar as incertezas acerca das estimativas ora efetuadas.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS - ANA. **A evolução da gestão dos recursos hídricos no Brasil**. Edição Comemorativa do Dia Mundial das Águas. Brasília: Agência Nacional de Águas, 2002.

AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS - ANA. **Atlas Brasil - Abastecimento urbano de água**. Volume 1 e 2. Brasília: Agência Nacional de Águas, 2010.

AHLERT, S.; REGINATO, P. A. R. Utilização de geoprocessamento na avaliação da vulnerabilidade dos sistemas aquíferos Serra Geral e Guarani na região nordeste do Estado do Rio Grande do Sul. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO (SBSR), 15., 2011, Curitiba. **Anais...**São José dos Campos: INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS (INPE), 2011. p. 5402-5409.

ALBINET, M.; MARGAT, J. Cartographie de la vulnérabilité à la pollution des nappes d'eau souterraine. **Bulletin BRGM**, Orleans, França, v. 3, n. 4, p. 13-22. 1970.

ALLER, L.; BENNETT, T.; LEHR, J. H.; PETTY, R. J.; HACKETT, G. Drastic: a standardized system for evaluating groundwater pollution potential hydrogeologic setting. **Environmental Protection Agency (EPA)**, Washington (DC), Report 600/2-87-035.1987.

ALMEIDA, F. F. M. **Fundamentos geológicos do relevo paulista**. São Paulo: Instituto de Geografia, Universidade de São Paulo, 1964. 99 p.

ALMEIDA, M. A.; FERNANDES, L. A.; DANTAS, A. S. L.; SAKATE, M. T.; GIMENEZ, A. F.; TEIXEIRA, A. L.; BISTRICHI, C. A.; ALMEIDA, F. F. M. Considerações sobre a estratigrafia do Grupo Bauru na região do Pontal do Paranapanema do Estado de São Paulo. In: SIMPÓSIO REGIONAL DE GEOLOGIA, 3., 1981, Curitiba. **Atas...** Curitiba: SBG/Núcleo SP, 1981. v. 2, p. 77-89.

ANDRADE, M. C. A. **Avaliação da vulnerabilidade à contaminação dos aquíferos costeiros pela intrusão salina em trecho da orla de Fortaleza, CE**. 2012. 103 p. Dissertação (Mestrado em Tecnologia Ambiental) - Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo (IPT), São Paulo, 2012.

ANDRIOTTI, J. L. S. **Fundamentos de estatística e geoestatística**. 2. ed. São Leopoldo: Unisinos. 2009.

ARCHIE, G. E. **The electrical resistivity as an AID in determining some reservoir characteristics**. Petroleum Transactions of AIME, 1942. p. 54-62.

ARTUSO, E.; OLIVEIRA, M. M.; LOBO FERREIRA, J. P. C. Avaliação da vulnerabilidade à poluição das águas subterrâneas no setor de Évora do sistema aquífero de Évora – Montemor – Cuba. In: CABRAL, J. J. S. P.; LOBO FERREIRA, J. P. C.; MONTENEGRO, S. M. G. L.; COSTA, W. D. **Água Subterrânea: aquíferos costeiros e aluviões, vulnerabilidade e aproveitamento**. Recife: Editora Universitária da UFPE, 2004. v. 4, 446 p, p. 277-331.

AUGE, M. Vulnerabilidade de aquíferos. **Revista Latino-Americana de Hidrogeologia**, n. 4, p. 85-103. 2004. Disponível em: <<http://ojs.c3sl.ufpr.br/ojs2/index.php/hidrogeologia/article/view/2652/2193>>. Acesso em: 10 mai. 2013.

BARCHA, S. F. **Aspectos geológicos e províncias hidrogeológicas da Formação Bauru na região norte-ocidental do Estado de São Paulo**. 1980. 209 p. Tese (Livre Docência) - Instituto de Biociências, Letras e Ciências Exatas, Universidade Estadual Paulista, São José do Rio Preto, 1980.

BEAR, J. **Dynamics of fluids in porous media**. American Elsevier Publishing Company Inc. New York. Second Printing, 1972. 764 p.

BORGHETTI, N. R. B.; BORGHETTI, J. R.; FILHO, E. F. R. **Aquífero Guarani: a verdadeira integração dos países do Mercosul**. Curitiba, 2004.

BRAGA, A. C. O. **Métodos geoeletrícos aplicados na caracterização geológica e geotécnica - formações Rio Claro e Corumbataí, no município de Rio Claro/SP**. 1997. 169 p. Tese (Doutorado em Geociências e Meio Ambiente) - Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Universidade Estadual Paulista, Rio Claro, 1997.

BRAGA, A. C. O. **Métodos da eletrorresistividade e polarização induzida aplicados nos estudos da captação e contaminação de águas subterrâneas: uma abordagem metodológica e prática**. 2006 a. 126 p. Tese (Livre-Docência na Disciplina Métodos Geoeletrícos Aplicados à Hidrogeologia) - Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Universidade Estadual Paulista, Rio Claro, 2006.

BRAGA, A. C. O.; MALAGUTTI FILHO, W.; DOURADO, J. C. Resistivity (DC) method applied to aquifer protection studies. **Revista Brasileira de Geofísica**, p. 573-581. 2006.

BRAGA, A. C. O. **Métodos geoeletrícos aplicados nos estudos de captação e de contaminação de águas subterrâneas**. Material didático. Universidade Estadual Paulista, Instituto de Geociências e Ciências Exatas. Rio Claro, 2007. 80 p.

BRAGA, A. C. O. Estimativa da vulnerabilidade natural de aquíferos: uma contribuição a partir da resistividade e condutância longitudinal. **Revista Brasileira de Geofísica**, p. 61-69. 2008.

BRANDT NETO, M.; YAMAMOTO, J. K.; TACHIBANA, J.; MATO, L. F. Sedimentos quaternários associados ao baixo vale do Rio Tietê. In: SIMPÓSIO REGIONAL DE GEOLOGIA, 1., 1977, São Paulo. **Atas...**São Paulo: SBG/SP, 1977, p. 248-266.

BRASIL. **Lei nº 6.938 de 31 de agosto de 1981**. Dispõe sobre a Política Nacional de Meio Ambiente, seus fins e mecanismos de formulação e aplicação, e dá outras providências. Diário Oficial da União: República Federativa do Brasil, Poder Legislativo, Brasília, DF. Disponível em: <http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/Leis/L6938.htm>. Acesso em: 14 out. 2013.

BRASIL. Ministério da Saúde. **Portaria nº 2.914 de 12 de dezembro de 2011**. Dispõe sobre os procedimentos de controle e de vigilância da qualidade da água para consumo humano e seu padrão de potabilidade. Diário Oficial da União: República Federativa do Brasil, Poder

Executivo, Brasília, DF, v. 148, n. 239, 14 dez. 2011. Seção 1, p. 39-46. Disponível em: <<http://www.in.gov.br/visualiza/index.jsp?data=14/12/2011&jornal=1&pagina=39&totalArquivos=192>>. Acesso em: 3 mai. 2013.

BURROUGH, P. A.; McDONNELL, R. A. **Principles of geographic information systems**. Oxford: Oxford University Press, 1998.

CABRAL, J. S. P. Movimento das águas subterrâneas. In: MANOEL FILHO, J.; FEITOSA, E. C.; DEMÉTRIO, J. G. A (Org). **Hidrogeologia: Conceitos e Aplicações**. 3. ed. Rio de Janeiro: CPRM, 2008. p. 121-151.

CAETANO-CHANG, M. R. **A Formação Pirambóia no centro-leste do Estado de São Paulo**. 1997. 196 p. Tese (Livre Docência em Geologia) – Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Universidade Estadual Paulista, Rio Claro, 1997.

CÂMARA, G.; CASANOVA, M. A.; HEMERLY, A. S.; MAGALHÃES, G. C.; MEDEIROS, C. M. B. **Anatomia de sistema de informações geográficas**. Rio de Janeiro: INPE, 1996. 193 p.

CÂMARA, G.; MEDEIROS, J. S. Princípios básicos em Geoprocessamento. In. ASSAD, E. D.; SANO, E. E. (eds.), **Sistemas de informações geográficas: aplicações na agricultura**. 2. ed. Brasília: EMBRAPA, 1998. Capítulo 1.

CÂMARA, G.; DAVIS, C. **Introdução à ciência da geoinformação**, 2001. Disponível em: <<http://www.dpi.inpe.br/gilberto/livro/introd/>>. Acesso em: 31 mar. 2013.

CARDOSO, L. V. R. Q. **Estudo comparativo entre os métodos DRASTIC e GOD na avaliação da vulnerabilidade das águas subterrâneas à poluição da bacia hidrográfica do rio Cabril – Vila Real**. 2010. 90 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade de Trás-os-Montes e Alto Douro, Vila Real, 2010.

CARMONA, A. J.; MONSALVE, J. J. R. **Sistemas de información geográficos**. Disponível em: <<http://dds.cepal.org/infancia/guide-to-estimating-child-poverty/bibliografia/capitulo-IV/Carmona%20Alvaro%20y%20Monsalve%20Jhon%20%281999%29%20Sistemas%20de%20informacion%20geografica.pdf>>. Acesso em 01 abr. 2013.

CHACHADI, A. G.; LOBO FERREIRA, J. P. Sea water intrusion vulnerability mapping of aquifers using the GALDIT method. **Coastin – a coastal policy research newsletter**, Nova Delhi, n. 4, 12 p. 2001.

CIVITA, M. **Le carte della vulnerabilità degli acquiferi all'inquinamento**. Teoria i Pratica (aquifer vulnerability maps to pollution). Bologna: Pitagora, 1994.

CLEARY, R. W. **Águas subterrâneas**. Princeton Groundwater, Inc. Clean Environment Brasil, Produtos e Tecnologias para o Meio Ambiente. Disponível em: <<http://www.clean.com.br>>. Acesso em: 25 mar. 2013.

COMITÊ DA BACIA HIDROGRÁFICA DO MÉDIO PARANAPANEMA– CBH/MP. **Relatório de situação dos recursos hídricos 2011**. Disponível em: <<http://cbhmp.org/publicacoes/relatorio-de-situacao.html>>. Acesso em: 25 abr. 2013.

COMITÊ DAS BACIAS HIDROGRÁFICAS DOS RIOS AGUAPEÍ E PEIXE– CBH/AP. **Relatório de situação dos recursos hídricos 2011**. Disponível em: <<http://cbhap.org/publicacoes/relatorio-de-situacao.html>>. Acesso em: 15 abr. 2013.

COMITÊ DA BACIA HIDROGRÁFICA DO TIETÊ-BATALHA – CBH/TB. **Relatório de situação dos recursos hídricos 2010**. Disponível em: <<http://www.comitetb.sp.gov.br/index.php?tab=1&acao=com17>>. Acesso em: 20 abr. 2013.

COMITÊ DA BACIA HIDROGRÁFICA DO TIETÊ-JACARÉ – CBH/TJ. **Relatório de situação dos recursos hídricos 2012**. Disponível em: <<http://www.sigrh.sp.gov.br/sigrh/ARQS/RELATORIO/CRH/CBH-TJ/1650/relatOrio%20de%20situaCAo%202012.pdf>>. Acesso em: 22 abr. 2013.

COMPANHIA AMBIENTAL DO ESTADO DE SÃO PAULO – CETESB. **Relatório de qualidade das águas subterrâneas do Estado de São Paulo 1990-1994**. São Paulo, 1996. 90p.

COMPANHIA AMBIENTAL DO ESTADO DE SÃO PAULO – CETESB. **Relatório de qualidade das águas subterrâneas no Estado de São Paulo 1994-1997**. São Paulo, 1998. Série Relatórios. 106 p.

COMPANHIA AMBIENTAL DO ESTADO DE SÃO PAULO – CETESB. **Relatório de qualidade das águas subterrâneas no Estado de São Paulo 1998-2000**. São Paulo, 2001. Série Relatórios. 96 p.

COMPANHIA AMBIENTAL DO ESTADO DE SÃO PAULO – CETESB. **Relatório de qualidade das águas subterrâneas no Estado de São Paulo 2001-2003**. São Paulo, 2004. Série Relatórios. 103 p. e anexos.

COMPANHIA AMBIENTAL DO ESTADO DE SÃO PAULO – CETESB. **Relatório de qualidade das águas subterrâneas no Estado de São Paulo 2007-2009**. São Paulo, 2010. Série Relatórios. 260 p.

COMPANHIA AMBIENTAL DO ESTADO DE SÃO PAULO - CETESB. **Texto explicativo**: relação de áreas contaminadas e reabilitadas do Estado de São Paulo – Dezembro de 2011. Disponível em: <http://www.cetesb.sp.gov.br/userfiles/file/areas-contaminadas/2011/municipios.pdf>. Acesso em: 10 abr. 2012.

COMPANHIA AMBIENTAL DO ESTADO DE SÃO PAULO – CETESB. **Relatório de qualidade das águas subterrâneas no Estado de São Paulo 2010-2012**. São Paulo, 2012a. Série Relatórios. 222 p.

COMPANHIA AMBIENTAL DO ESTADO DE SÃO PAULO – CETESB. **Relatório de qualidade das águas superficiais no Estado de São Paulo 2012**. São Paulo, 2012b. Série Relatórios. 354 p.

CRÓSTA, A. P. (Tradução e Adaptação). **Recursos hídricos**. Campinas: Editora da Unicamp. Bloco 4, Parte I – Os recursos físicos da Terra, 149 p. 2000.

CUNHA, L. S. **Determinação da vulnerabilidade intrínseca à poluição e transporte de contaminação:** uma ferramenta para a gestão de recursos hídricos subterrâneos na área do porto do Pecém, CE. 2009. 209 p. Tese (Doutorado) - Instituto de Geociências, Universidade de Brasília, Brasília, 2009.

CUSTODIO, G. E. Consideraciones sobre el concepto de vulnerabilidad de los acuíferos a la polución. In: SEMINARIO HISPANO - ARGENTINO SOBRE TEMAS ACTUALES DE HIDROLOGÍA SUBTERRÁNEA. SERIE CORRELACION GEOLÓGICA, 2., 1995, San Miguel de Tucumán. **Anais...** San Miguel de Tucumán, 1995. p. 99-122.

DEPARTAMENTO DE ÁGUAS E ENERGIA ELÉTRICA - DAEE. **Estudo de águas subterrâneas – região administrativa 6 - Ribeirão Preto.** São Paulo: DAEE, 1974. 2 v.

DEPARTAMENTO DE ÁGUAS E ENERGIA ELÉTRICA - DAEE. **Estudo de águas subterrâneas - regiões administrativas 7, 8 e 9 - Bauru, São José do Rio Preto e Araçatuba.** São Paulo: DAEE, 1976. v. 1 e v. 2.

DEPARTAMENTO DE ÁGUAS E ENERGIA ELÉTRICA - DAEE. **Estudo de águas subterrâneas - regiões administrativas 10 e 11 - Presidente Prudente e Marília.** São Paulo: DAEE, 1979. v. 1 e v. 2.

DEPARTAMENTO DE ÁGUAS E ENERGIA ELÉTRICA – DAEE; UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA “JÚLIO DE MESQUITA FILHO” – UNESP; SECRETARIA DO MEIO AMBIENTE DO ESTADO DE SÃO PAULO – SMA. **Mapa Geológico do Estado de São Paulo.** Escala 1:250.000. São Paulo: DAEE, Unesp, SMA, 1984.

DEPARTAMENTO DE ÁGUAS E ENERGIA ELÉTRICA – DAEE. **Plano estadual de recursos hídricos:** primeiro plano do Estado – Síntese. São Paulo, 1990. 97 p.

DEPARTAMENTO DE ÁGUAS E ENERGIA ELÉTRICA - DAEE. **Sistema de informações para gerenciamento de recursos hídricos do Estado de São Paulo,** São Paulo, 2000.

DEPARTAMENTO DE ÁGUAS E ENERGIA ELÉTRICA – DAEE; INSTITUTO GEOGRÁFICO E CARTOGRÁFICO – IGC; GOVERNO DO ESTADO DE SÃO PAULO. **Mapa das unidades hidrográficas de gerenciamento de recursos hídricos do Estado de São Paulo.** Escala 1:1.000.000. São Paulo: DAEE, IGC, Governo do Estado de São Paulo, 2003.

DEPARTAMENTO DE ÁGUAS E ENERGIA ELÉTRICA – DAEE; INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS – IPT; INSTITUTO GEOLÓGICO – IG; COMPANHIA DE PESQUISA DE RECURSOS MINERAIS – CPRM. **Mapa de Águas Subterrâneas do Estado de São Paulo.** Escala 1.000.000. São Paulo: DAEE, IPT, IG, CPRM, 2005.

DIAS, L. S. O.; ROCHA, G. A.; BARROS, E. U. A.; MAIA, P. H. P. Utilização do radar interferométrico para delimitação automática de bacias hidrográficas. **Bahia Análise & Dados,** Salvador, v. 14, n. 2, p. 265-271, set. 2004.

DOERFLIGER, N., ZWAHLEN, F. EPIK: a new method for outlining of protection areas in karstic environment. In: GUNAY, G.; JONSHON, A. I. (Ed.). **On Karst Water and Environmental Impacts**. Antalya, Turkey, Balkema, Rotterdam, 1997. p. 117-223.

ESCADA, D. C. S. **Mapeamento da vulnerabilidade e perigo à contaminação das águas subterrâneas do município de Cajamar – SP**. 2009. 110 p. Dissertação (Mestrado em Geociências) - Instituto de Geociências, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2009.

ENVIRONMENTAL SYSTEMS RESEARCH INSTITUTE - ESRI. **Using ArcGIS Geostatistical Analyst**, versão 9.0. Guia do usuário. 2003.

ENVIRONMENTAL SYSTEMS RESEARCH INSTITUTE - ESRI. **ArcGIS Professional GIS for the Desktop**, versão 9.2. Software. 2006.

ENVIRONMENTAL SYSTEMS RESEARCH INSTITUTE - ESRI. **ArcGIS Professional GIS for the Desktop**, versão 10.0. Software. 2010.

FEITOSA, F. A. C.; MANOEL FILHO, J. (Coord.). **Hidrogeologia: conceitos e aplicações**. 3. ed. Rio de Janeiro: CPRM, LABHID-UFPE, 2008. 812 p.

FELLER, M.; OLEAGA, A.; PACHECO, F. **Determinação de perímetros de proteção de poços e vulnerabilidade e risco de contaminação de aquíferos**. Consórcio Guarani, 2009. 92 p. Manuais e documentos técnicos do projeto de proteção ambiental e desenvolvimento sustentável do Sistema Aquífero Guarani.

FERNANDES, A. J.; ODA, G. H.; IRITANI, M. A. **Mapeamento da vulnerabilidade natural de aquíferos fraturados pré-cambrianos da região metropolitana de Campinas**. Instituto Geológico, Secretaria do Meio Ambiente do Estado de São Paulo. São Paulo: Instituto Geológico, Volume 1: Relatório Técnico Final. 2002.

FERNANDES, L. A. **A cobertura cretácea suprabasáltica no Paraná e Pontal do Paranapanema: os grupos Bauru e Caiuá**. 1992. 129 p. Dissertação (Mestrado em Geologia Sedimentar) - Instituto Geológico, Universidade de São Paulo, São Paulo, 1992.

FERNANDES, L. A.; COIMBRA, A. M. A Bacia Bauru (Cretáceo Superior, Brasil). In: Academias Brasileiras de Ciências, 1996, São Paulo. **Anais...** São Paulo: ABC, 1996. v. 68, n. 2.

FETTER, C. W. **Applied hydrogeology**. 4. ed. New Jersey: Prentice Hall, 2001. 598 p.

FIGUEROLA, J. C. **Tratado de geofísica aplicada**. 1. ed. Madrid: Instituto Geológico e Mineiro da Espanha, 1974. 520 p.

FOSTER, S.; HIRATA, R. **Contaminação das águas subterrâneas**. Organização Mundial de Saúde, Organização Panamericana de Saúde, Centro Panamericano de Engenharia Sanitária e Ciências Ambientais. Lima, 1987.

FOSTER, S.; HIRATA, R. **Avaliação do risco de poluição das águas subterrâneas: uma metodologia baseada em dados existentes**. Organização Mundial de Saúde, Organização

Panamericana de Saúde, Centro Panamericano de Engenharia Sanitária e Ciências Ambientais. Lima, 78 p. 1988.

FOSTER, S.; HIRATA, R.; GOMES, D.; D'ELIA, M.; PARIS, M. **Proteção da qualidade da água subterrânea: um guia para empresas de abastecimento de água, órgãos municipais e agências ambientais.** Edição brasileira: SERVIMAR – Serviços Técnicos Ambientais Ltda, 2006. Banco Mundial. 104 p.

FRANCÉS, A.; PARALTA, E.; FERNANDES, J.; RIBEIRO, L. **Development and application in the Alentejo region of a method to assess the vulnerability of groundwater to diffuse agricultural pollution: the susceptibility index.** 3rd Internacional Conference on Future Groundwater Resources at Risk, Lisbon, Portugal. 2001.

FUNDAÇÃO SISTEMA ESTADUAL DE ANÁLISE DE DADOS – SEADE. **Perfis municipais.** 2013. Disponível em: <<http://www.seade.gov.br/produtos/perfil/perfil.php>>. Acesso em: 25 abr. 2013.

GEOSPATIAL DESIGN. **Grid Convert**, versão 1. Software. 2013.

GIAFFERIS, G. P.; OLIVEIRA, E. L. Investigação da qualidade das águas subterrâneas do município de Bauru. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ÁGUAS SUBTERRÂNEAS (ABAS), 14., 2006, Curitiba. *Anais...* 10 p.

GOGU, R. C.; DASSARGUES, A. Current and future trends in groundwater vulnerability assessment. **Environmental Geology**, v. 3, n. 6, p. 549-559. 2000.

GOLDEN SOFTWARE INC. **SURFER 8 - User's guide/contouring and 3D surface mapping for scientists and engineers**, versão 8. Software. 2002.

GONÇALVES, A. R. L. **Geologia ambiental da área de São Carlos.** 1986. 138 p. Tese (Doutorado em Geologia Geral e de Aplicação) - Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, São Paulo, 1986.

GOWLER, A. Underground purification capacity. **IAHS Publishers**, v. 2, n. 142, p.1063-1072.1983.

HENRIET, J. P. Direct applications of the Dar Zarrouk parameters in ground water surveys. **Geophysical Prospecting**, n. 24, p. 344-353. 1975.

HEREDIA, O. S.; CIRELLI, A. F. Groundwater chemical pollution risk: assessment through a soil attenuation index. **Environmental Geology**, n. 53, p. 249–255. 2007.

HIRATA, R. Os recursos hídricos subterrâneos e as novas exigências ambientais. **Revista do Instituto Geológico de São Paulo**, v. 14, n. 1, p. 39-62. 1993.

HIRATA, R. **Estudo da contaminação por nitrato no distrito de Tibiriçá, Bauru.** São Paulo: DAE/IG-USP, 2 volumes. Relatório Técnico. 2000.

HORTON, R. E. The role of infiltration in the hydrological cycle. **Transactions, American Geophysical Union**, v. 14, p. 446-460. 1933. Disponível em:

<http://www.researchgate.net/publication/200472451_The_role_of_infiltration_in_the_hydrologic_cycle>. Acesso em: 3 mai. de 2013.

INSTITUTO GEOLÓGICO – IG; COMPANHIA DE TECNOLOGIA DE SANEAMENTO AMBIENTAL DO ESTADO DE SÃO PAULO – CETESB; DEPARTAMENTO DE ÁGUAS E ENERGIA ELÉTRICA – DAEE. **Mapeamento da Vulnerabilidade e risco de poluição das águas subterrâneas no Estado de São Paulo**. IG, CETESB, DAEE. Coordenado por Ricardo Cesar Aoki Hirata, Carai Ribeiro de Assis Bastos, Gerônimo Albuquerque Rocha. São Paulo. 1997.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA - IBGE. **Malhas Digitais**. 2007. Disponível em: <http://downloads.ibge.gov.br/downloads_geociencias.htm>. Acesso em: 10 mar. 2012.

INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS DO ESTADO DE SÃO PAULO – IPT. **Sondagens elétricas verticais**. São Paulo: IPT. Folhas de campo e curvas originais, 1977.

INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS DO ESTADO DE SÃO PAULO – IPT. **Sondagens elétricas verticais**. São Paulo: IPT. Folhas de campo e curvas originais, 1978.

INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS DO ESTADO DE SÃO PAULO – IPT. **Sondagens elétricas verticais**. São Paulo: IPT. Folhas de campo e curvas originais, blocos 39, 44 e 45. 1980a.

INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS DO ESTADO DE SÃO PAULO – IPT. **Sondagens elétricas verticais**. São Paulo: IPT. Folhas de campo e curvas originais, 1980b.

INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS DO ESTADO DE SÃO PAULO - IPT. **Mapa Geológico do Estado de São Paulo**. Escala 1:500.000. São Paulo: IPT. v. 1 e v. 2, 1981a.

INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS DO ESTADO DE SÃO PAULO – IPT. **Sondagens elétricas verticais**. São Paulo: IPT. Folhas de campo e curvas originais, bloco 45. 1981b.

INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS DO ESTADO DE SÃO PAULO – IPT; UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA “JÚLIO DE MESQUITA FILHO” – UNESP. **Banco de dados geofísicos da bacia do Paraná**. Rio Claro: IPT, Unesp. Projeto de pesquisa. 9 p. 2013.

INTERPEX LIMITED. **IX1D**, versão 2. Software. 2008.

IRITANI, M. A.; EZAKI, S. **Cadernos de educação ambiental: as águas subterrâneas do Estado de São Paulo**. Governo do Estado de São Paulo, Secretaria do Meio Ambiente, Instituto Geológico. São Paulo, 2009. 104 p.

IRITANI, M. A.; FERREIRA, L. M. R.; FERNANDES, A. J.; EZAKI, S. (Org.). **Projeto ambiental estratégico aquíferos: síntese das atividades período 2007 – 2010**. Instituto Geológico, Secretaria do Meio Ambiente do Estado de São Paulo. São Paulo: Instituto Geológico. Cadernos do Projeto Ambiental Estratégico Aquíferos, n. 3, 144 p. 2011.

KULKAMP, M. S.; KAIPPER, B. I. A.; CORSEUIL, H. X. Influência do etanol na atenuação natural de hidrocarbonetos de petróleo em um aquífero contaminado com uma mistura de diesel e etanol. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL (ABES), 22., 2003, Joinville. **Anais...**Joinville: V Feira Internacional de Tecnologias de Saneamento Ambiental, 2003. p. 1-7, Ilus. 22. Disponível em: <http://www.bvsde.paho.org/bvsacd/abes22/dx.pdf>. Acesso em: 25 mar. 2013.

LANDIM, P. M. B. **Introdução aos métodos de estimação espacial para confecção de mapas**. Material didático. Universidade Estadual Paulista, Instituto de Geociências e Ciências Exatas. Rio Claro, 2000. 20 p. Disponível em: <http://www.rc.unesp.br/igce/aplicada/DIDATICOS/LANDIM/interpo.pdf>. Acesso em: 10 ago. 2013.

LE GRAND, H. System for evaluating contamination potential of some waste sites. **American Water Work Association Journal**, v. 56, n. 8, p. 959-974. 1964.

MAILLET, R. The fundamental equations of electrical prospecting. **Geophysics**, v. 12, n. 4. p. 529-556. 1947.

MATIAS, J. M. G. **Subsistema aquífero da Mata do Urso: vulnerabilidade natural e risco de contaminação**. 2010. 122 p. Dissertação (Mestrado) - Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade de Coimbra, Coimbra, 2010.

MAZAC, O.; KELLY, W. E.; LANDA, I. A hydrogeophysical model for relations between electrical and hydraulic properties of aquifers. **Journal of Hydrology**, v. 79, p. 1-19. 1985.

MAZAC, O.; CISLEROVA, M.; KELLY, W. E.; LANDA, I.; VENHODOVA, D. Determination of hydraulic conductivities by surface geoelectrical methods. In: WARD, S. (Ed.). **Geotechnical and environmental geophysics**. 1990. p. 125-131.

MEAULO, F. J. Mapeamento da vulnerabilidade natural à poluição dos recursos hídricos subterrâneos de Araraquara, SP. **HOLOS Environment**, Rio Claro/SP, v. 6, p. 1-19. 2006.

MELO, M. S.; STEIN, D. P.; ALMEIDA, M. A. Aspectos litoestratigráficos do Grupo Bauru. In: ENCONTRO DE GEOLOGIA E HIDROGEOLOGIA, 1982, São Paulo. **Atas...** São Paulo: SBG/ABAS, 1982, n. 9, p. 01-19.

MEZZARILA, S.; AZEVEDO, A. A. B.; TOMINAGA, L. K.; PRESSINOTTI, M. M. N.; MASSOLI, M. Léxico estratigráfico do Estado de São Paulo. **Boletim do Instituto Geográfico e Geológico**, v. 5, n. 1, p. 1-161. 1981.

MICROSOFT CORPORATION. **Microsoft Office Excel**. Software. 2007.

MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE - MMA. **Caderno setorial de recursos hídricos: saneamento**. Brasília: Ministério do Meio Ambiente, 2006. 68 p.

MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE – MMA. **Águas subterrâneas: um recurso a ser conhecido a ser protegido**. Brasília: Ministério do Meio Ambiente, 2007. 40 p.

- MOREIRA, C. A. **Geofísica aplicada no monitoramento de área de disposição de resíduos sólidos domiciliares**. 2009. 169 p. Tese (Doutorado em Geociências e Meio Ambiente) - Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Universidade Estadual Paulista, Rio Claro, 2009.
- MOREIRA, C. A.; CAVALHEIRO, M. L. D.; PEREIRA, A. M.; CARON, F. Relações entre condutividade hidráulica, transmissividade, condutância longitudinal e sólidos totais dissolvidos para o aquífero livre de Caçapava do Sul (RS), Brasil. **Revista de Engenharia Sanitária e Ambiental**, v.17, n.2, p. 193-202. 2012.
- MOREIRA, C. A.; BRAGA, A. C. O. Aplicação de métodos geofísicos no monitoramento de área contaminada sob atenuação natural. **Revista de Engenharia Sanitária e Ambiental**, v. 14, n. 2, p. 257-64. 2009.
- NATIONAL RESEARCH COUNCIL – NRC. **Groundwater vulnerability assessment: predicting relative contamination potential under conditions of uncertainty**. Washington, DC: National Academy Press. 1993.
- NOGUEIRA, A. K. **Uso de geoprocessamento para mapeamento de vulnerabilidade como instrumento de gestão de águas subterrâneas em Aparecida de Goiânia/GO**. 2010. 135 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia do Meio Ambiente) - Escola de Engenharia Civil, Universidade Federal de Goiás, Goiânia, 2010.
- OKORO, E. I; EGBOKA, B. C. E.; ONWUEMESI, A. G. Evaluation of the aquifer characteristic of Nanka sands using hydrogeological method in combination with Vertical Electrical Sounding (VES). **Journal of Applied Sciences and Environmental Management**, v. 14, n. 2, p. 5-9. 2010.
- OLIVEIRA, M. J.; SOUTO, F. A. F.; ROSÁRIO, J. M. L.; SACASA, R. J. V.; MOURA, H. P. **Vulnerabilidade natural e sazonal do aquífero livre no loteamento Marabaixo III – Macapá – AP**. Universidade Federal do Amapá, 2003.
- ONO, S. **Sistema de suporte à decisão para gestão de água urbana – URBSSD**. 2008. 148 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Hidráulica e Sanitária) - Departamento de Engenharia Hidráulica e Sanitária, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2008.
- ORELLANA, E. **Prospección geoelectrica en corriente continua**. Madrid: Paraninfo, Biblioteca Tecnica Philips, 1972. 523 p.
- OSÓRIO, Q. S.; DUTRA, D. A.; CASSOL, R. Vulnerabilidade natural de aquíferos e risco de poluição das águas subterrâneas: uma abordagem geográfica. **Geografia, Ensino & Pesquisa**, v. 12, p. 929-943. 2008.
- PAULA E SILVA, F.; CAVAGUTI, N. Nova caracterização estratigráfica e tectônica do Mesozóico na cidade de Bauru - SP. In: SIMPÓSIO SOBRE BACIAS CRETÁCIAS BRASILEIRAS, 2., 1992, p.141-144.
- PAULA E SILVA, F.; BIANCHI NETO, C.; RICARDI, A. E. M.; SAPIO, A. J. Estudo estratigráfico do Grupo Bauru na região de Presidente Prudente com base em perfis geofísicos de poços para água. **Revista Geociências**, Rio Claro, v. 1, p. 63-82. 1994.

PAULA E SILVA F. **Geologia de subsuperfície e hidroestratigrafia do Grupo Bauru no Estado de São Paulo**. 2003. 166 p. Tese (Doutorado em Geologia Regional) - Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Universidade Estadual Paulista, Rio Claro, 2003.

PAULA E SILVA F., KIANG, C. H. e CAETANO-CHANG, M. R. Hidroestratigrafia do Grupo Bauru (K) no Estado de São Paulo. **Revista Águas Subterrâneas**, v. 19, n. 2. 2005.

PONÇANO, W. L.; CARNEIRO, C. D. R.; BISTRICHI, C. A.; ALMEIDA, F. F. M. DE; PRANDINI, F. L. **Mapa geomorfológico do Estado de São Paulo**. São Paulo: Instituto de Pesquisas Tecnológicas, 1981. n. 1183, 94 p.

PORSANI, J. L.; CARLOS, I. M.; ELIS, V. R.; PRADO, R. L. Métodos geofísicos integrados para a caracterização hidrogeológica dos aquíferos da microbacia Andes, Bebedouro, em São Paulo. **Sociedade Brasileira de Geologia**, v. 43, n. 3, p. 597-614. 2012.

PRANDI, E. C. **Gestão integrada das águas do Sistema Aquífero Bauru nas bacias hidrográficas dos rios Aguapeí e Peixe/SP**. 2010. 192 p. Tese (Doutorado em Geociências e Meio Ambiente) - Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Universidade Estadual Paulista, Rio Claro, 2010.

QAMHIEH, N. S. A. R. **Assessment of groundwater vulnerability to contamination in the West Bank, Palestine**. 2006. 126 p. Master in Environmental Sciences - Faculty of Graduate Studies, An-Najah National University, Nablus, Palestine, 2006.

REBOUÇAS, A. C.; BRAGA, B. TUNDISI, J. G. **Águas doces no Brasil: capital ecológico, uso e conservação**. 2. ed. São Paulo: Escrituras, 2002. 704 p.

REYNOLDS-VARGAS, J.; FRAILE, J., HIRATA, R. Trends in nitrate concentrations and determination of their origin using stable isotopes (^{18}O and ^{15}N) in groundwater of the Western Central Valley, Costa Rica. **A Journal of the Human Environment**, v. 35, n. 5, p. 229-236. 2006.

RICCOMINI, C.; GIMENEZ FILHO, A.; STEIN, D. P.; ALMEIDA, F. F. M.; PIRES NETO, A. G.; DEHIRA, L. K.; MELO, M. S.; BRAGA, T. O.; PONÇANO, W. L. Características da porção basal da Formação Caiuá no Noroeste do Paraná. In *Simpósio Regional de Geologia*, 3., 1981, Curitiba. **Atas...** Curitiba: SBG/SP, 1981, v. 2, p. 34-48.

RUSSO, A. S. **Estimativa da vulnerabilidade de aquíferos utilizando sistemas de informações geográficas e geoestatística – UGRHI – PCJ**. 2009. 75 p. Dissertação (Mestrado) - Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2009.

SAINATO, C. M.; LOSINNO, B. N.; GALINDO, G.; LANDINI, A. M.; FAZIO, A. M. Geofísica aplicada a la evaluación de la vulnerabilidad a la contaminación en zonas rurales de la provincia de Buenos Aires, Argentina. **Águas Subterrâneas**, v. 20, n. 2, p. 71-82. 2006.

SALOMÃO, F. X. T. Solos do arenito Bauru. In: PEREIRA, V. P.; CRUZ, M. E.; CRUZ, M. C. P. **Solos altamente suscetíveis à erosão**. Jaboticabal/SP: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 1994. p. 51-68.

- SANTOS, M. G. **Mapeamento da vulnerabilidade e risco de poluição das águas subterrâneas dos sistemas aquíferos sedimentares da região de Campos dos Goytacazes – RJ**. 2004. 131 p. Dissertação (Mestrado em Geociências) – Instituto de Geociências, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2004.
- SANTOS, P. R. P. **Estudo da vulnerabilidade à poluição do aquífero Marizal na região de influência do Polo Industrial de Camaçari (PIC) – BA**. 2010. 128 p. Dissertação (Mestrado Profissional em Gerenciamento e Tecnologias Ambientais no Processo Produtivo) - Departamento de Engenharia Ambiental, Universidade Federal da Bahia, Salvador, 2010.
- SECRETARIA DE MEIO AMBIENTE DO ESTADO DE SÃO PAULO – SMA. **Resolução SMA n° 14**. Define as diretrizes técnicas para o licenciamento de empreendimentos em áreas potencialmente críticas para a utilização de água subterrânea. São Paulo, 05 de março de 2010. SMA, 2010.
- SETZER, J. **Atlas climático e ecológico do Estado de São Paulo**. São Paulo: Editora da Comissão Interestadual da Bacia do Paraná-Uruguaí e Centrais Elétricas de São Paulo, 1966. p. 35-39.
- SHEVNIN, V.; RODRÍGUEZ, O. D.; MOUSATOV, A.; RYJOV, A. Estimation of hydraulic conductivity on Clay content in soil determined from resistivity data. **Geofísica Internacional**, v. 45, n. 3, p. 195-207. 2006.
- SILVA, A. B. **Sistemas de informações georreferenciadas: conceitos e fundamentos**. Campinas: Editora da UNICAMP, 2003. 240 p.
- SOARES, P. C. Divisão estratigráfica do Mesozóico no Estado de São Paulo. **Revista Brasileira de Geociências**, São Paulo, v. 5, p. 229-251. 1975.
- SOARES, P. C.; LANDIM, P. M. B.; FÚLFARO, V. J.; SOBREIRO NETO, A. F. Ensaio de caracterização estratigráfica do Cretáceo no Estado de São Paulo: Grupo Bauru. **Revista Brasileira de Geociências**, São Paulo, v.10, p. 177-185, 1980.
- SOUPIOS, P. M.; KOULI, M., VALLIANATOS, F., VAFIDIA, A.; STAVROULKIS, G. Estimation of aquifer hydraulic parameters from surficial geophysical methods: a case study of Keritis Basin in Chania (Crete - Greece). **Journal of Hydrology**, v. 338, p. 122-131. 2007.
- SOUZA, N. A. **Vulnerabilidade à poluição das águas subterrâneas: um estudo do aquífero Bauru na zona urbana do município de Araguari, MG**. 2009. 135 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Faculdade de Engenharia Civil, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2009.
- STIGTER T. Y.; VIEIRA J.; NUNES L. M. **Avaliação da susceptibilidade da contaminação das águas subterrâneas no apoio à tomada de decisão. Caso de estudo: implantação de campos de golfe no concelho de Albufeira (Algarve)**. In: Proc. 6º Congresso da Água, APRH, Porto, CD-ROM. 2006.
- SUGUIO, K.; FÚLFARO, V. J.; AMARAL, G.; GUIDORZI, L. A. Comportamentos estratigráficos e estrutural da Formação Bauru nas regiões administrativas 7 (Bauru), 8 (São

José do Rio Preto) e 9 (Araçatuba) no Estado de São Paulo. In: SIMPÓSIO DE GEOLOGIA REGIONAL, 1., 1977, São Paulo. **Atas...** São Paulo: SBG, 1977. p. 231-247.

SUGUIO, K.; BARCELOS, J. H. Calcretes of the Bauru Group (Cretaceous), Brazil: Petrology and Geological Significance. **Boletim do Instituto Geológico**, São Paulo, v.14, p. 31-47. 1983.

TAVARES, P. R. L.; CASTRO, M. A. H.; COSTA, C. T. F.; SILVEIRA, J. G. P.; ALMEIDA JÚNIOR, F. J. B. Mapeamento da vulnerabilidade à contaminação das águas subterrâneas localizadas na Bacia Sedimentar do Araripe, Estado do Ceará, Brasil. **Revista da Escola de Minas**, v. 62, n. 2, p. 227-236, 10 p., jun. 2009.

TEIXEIRA, W.; TOLEDO, M. C. M. de; FAIRCHILD, T. R.; TAIOLI, F. (Org.) **Decifrando a Terra**. São Paulo: Oficina de Textos, 2000. 568 p.

TELFORD, W. M.; GELDART, L. P.; SHERIFF, R. E. **Applied geophysics**. 2. ed. New York: Cambridge University Press, 2004. 774 p.

TODD, D. K. **Groundwater hydrology**. 2. ed. New York: Wiley, 1980. 535 p.

TUCCI, C. E. M.; BELTRAME, L. F. Infiltração e armazenamento no solo. In: Tucci, C. E. M. **Hidrologia: Ciência e Aplicação**. 2. ed. Porto Alegre: Universidade, 2000. p. 335-372.

UNITED STATES GEOLOGICAL SURVEY - USGS. **O ciclo da água**. Disponível em: <<http://ga.water.usgs.gov/edu/watercycleportuguese.html>>. Acesso em: 02 mar. 2013.

VALLADOLID, M.; MARTÍNEZ-BASTIDA, J. J.; ARAUZO, M. Intrinsic and specific vulnerability of groundwater in central Spain: the risk of nitrate pollution. **Hydrogeology Journal**, Madrid, v. 18, p. 681-698. 2010.

VAN DUIJVENBOODEN, W.; VAN WAEGENINGH, H. G. **Vulnerability of soil and groundwater to pollutants**. Proceedings and Information No. 38 of the International Conference held in The Netherlands. TNO Committee on Hydrological Research, Delft, The Netherlands. 1987.

VAN STEMPVOORT, D.; EWERT, L.; WASSENAAR, L. **AVI: a method for groundwater protection mapping in the prairie provinces of Canada**. 1992. 23 p.

VARNIER, C.; IRITANI, M. A.; VIOTTI, M.; ODA, G. H.; FERREIRA, L. M. R. Nitrate nas águas subterrâneas do sistema aquífero Bauru, área urbana do município de Marília (SP). **Revista do Instituto Geológico**, São Paulo, v. 31, n. 1/22, p. 1-21, 2010.

VARNIER, C.; HIRATA, R.; GUERRA, S. P. **Padrões de ocupação urbana e contaminação por nitrato nas águas subterrâneas do sistema aquífero Bauru, centro-oeste do Estado de São Paulo**. Relatório Científico Final. Instituto Geológico, Secretaria de Meio Ambiente do Estado de São Paulo. São Paulo, 2012. p. 22.

VEIGA, T. O.; SILVA, J. X. Geoprocessamento aplicado à identificação de áreas potenciais para atividades turísticas: o caso do município de Macaé/RJ. In: SILVA, J. X.; ZAIDAN, R. T. **Geoprocessamento e análise ambiental**. Rio de Janeiro: Bertrand Brasil, 2004.

VÍAS, J. M.; ANDREO, B.; PERLES, M. J.; CARRASCO, F. A comparative study of four schemes for groundwater vulnerability mapping in a diffuse flow carbonate aquifer under Mediterranean climatic conditions. **Environmental Geology**, v. 47, n. 4, p. 586-595. 2005.

VIEIRA, P. C. Sugestões para estudo de captação de água subterrânea no Grupo Bauru: considerações tectônicas. **Revista do Instituto Geológico**, São Paulo, v. 2, n. 2, p. 5-16. 1981.

VRBA, J.; ZAPOROZEC, A. Guidebook on mapping groundwater vulnerability. **International Association of Hydrogeologists (IAH)**, Hanover, v. 16, p. 31-48. 1994.

YAMADA, T. **Ferramentas de geoprocessamento para análise da vulnerabilidade natural das águas sub-superficiais à poluição, área urbana e seu entorno, município de São Carlos – SP**. 2007. 81 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Urbana) - Centro de Ciências Exatas e de Tecnologia, Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2007.

ZAIDAN, R. T.; SILVA, J. X. **Geoprocessamento e meio ambiente**. São Paulo: Bertrand Brasil, 2011. 324 p.

ZANETTI, N. **Estimativa da vulnerabilidade natural do aquífero livre no município de Rio Claro/SP**. 2012. 110 p. Dissertação (Mestrado em Geociências e Meio Ambiente) - Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Universidade Estadual Paulista, Rio Claro, 2012.

BIBLIOGRAFIA CONSULTADA

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE ÁGUAS SUBTERRÂNEAS - ABAS. **Educação – águas subterrâneas, o que são?** Disponível em: <<http://www.abas.org/educacao.php#ind21>>. Acesso em: 18 set. 2012.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT. **NBR 6023/2002, Informação e documentação:** elaboração de referências. Rio de Janeiro: ABNT, 2002.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT. **NBR 10520/2002, Informação e documentação:** citações em documentos. Rio de Janeiro: ABNT, 2002.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT. **NBR 14724/2011, Informação e documentação:** elaboração de trabalhos acadêmicos. Rio de Janeiro: ABNT, 2011.

ANEXO A – Dados cadastrais das SEVs utilizadas na pesquisa.

<i>Cliente</i>	<i>Ano</i>	<i>Bloco</i>	<i>Nº SEV</i>	<i>UTM E (m)</i>	<i>UTM N (m)</i>
Paulipetro	1980	39	4	611.800	7.574.500
Paulipetro	1980	44	1	598.550	7.533.350
Paulipetro	1980	44	2	598.650	7.533.350
Paulipetro	1980	44	3	596.700	7.532.850
Paulipetro	1980	44	4	599.570	7.533.500
Paulipetro	1980	44	5	598.550	7.533.150
Paulipetro	1980	45	1	688.000	7.516.000
Paulipetro	1980	45	2	686.140	7.515.120
Paulipetro	1980	45	3	690.560	7.513.820
Paulipetro	1980	45	4	689.040	7.509.000
Paulipetro	1980	45	5	690.560	7.511.000
Paulipetro	1980	45	6	689.040	7.512.800
Paulipetro	1980	45	7	689.040	7.511.080
Paulipetro	1980	45	8	690.560	7.516.460
Paulipetro	1980	45	9	691.500	7.515.800
Paulipetro	1980	45	10	692.070	7.513.320
Paulipetro	1980	45	11	692.070	7.510.300
Paulipetro	1980	45	12	692.070	7.517.050
Paulipetro	1980	45	13	693.300	7.515.500
Paulipetro	1980	45	14	693.940	7.513.230
Paulipetro	1980	45	15	692.430	7.513.140
Paulipetro	1980	45	16	695.140	7.518.540
Paulipetro	1980	45	17	695.510	7.516.620
Paulipetro	1980	45	18	689.800	7.510.050
Paulipetro	1980	45	19	690.820	7.512.530
Paulipetro	1980	45	20	692.760	7.521.150
Paulipetro	1980	45	21	659.250	7.486.750
Paulipetro	1980	45	22	651.450	7.478.200
Paulipetro	1980	45	23	672.150	7.507.950
Paulipetro	1980	45	24	666.300	7.500.350
Paulipetro	1980	45	25	692.720	7.521.100
Paulipetro	1980	45	26	696.300	7.521.950
Paulipetro	1980	45	27	687.100	7.529.350
Paulipetro	1980	45	28	647.050	7.473.250
Paulipetro	1980	45	29	645.600	7.493.650
Paulipetro	1980	45	30	641.950	7.482.000
Paulipetro	1980	45	31	675.950	7.496.800
Paulipetro	1980	45	32	647.250	7.507.950
Paulipetro	1980	45	33	674.970	7.484.350
Paulipetro	1980	45	34	664.000	7.480.200
Paulipetro	1980	45	35	686.950	7.495.150
Paulipetro	1980	45	36	686.050	7.502.750
Paulipetro	1980	45	37	662.250	7.492.650
Paulipetro	1980	45	38	667.150	7.488.200
Paulipetro	1980	45	39	678.070	7.474.150

<i>Cliente</i>	<i>Ano</i>	<i>Bloco</i>	<i>Nº SEV</i>	<i>UTM E (m)</i>	<i>UTM N (m)</i>
Paulipetro	1980	45	40	608.350	7.551.000
Paulipetro	1980	45	41	620.700	7.556.400
Paulipetro	1980	45	42	622.600	7.551.750
Paulipetro	1980	45	43	614.550	7.543.550
Paulipetro	1980	45	44	618.900	7.537.900
Paulipetro	1980	45	45	622.850	7.532.750
Paulipetro	1980	45	46	618.700	7.546.800
Paulipetro	1980	45	47	623.600	7.545.930
Paulipetro	1980	45	48	643.520	7.523.030
Paulipetro	1980	45	49	643.780	7.519.480
Paulipetro	1980	45	50	643.950	7.516.470
Paulipetro	1980	45	51	644.180	7.513.450
Paulipetro	1980	45	52	652.280	7.517.100
Paulipetro	1980	45	53	649.550	7.521.250
Paulipetro	1980	45	54	647.650	7.524.250
Paulipetro	1980	45	55	645.750	7.527.200
Paulipetro	1980	45	56	631.000	7.521.300
Paulipetro	1980/81	45	57	634.700	7.515.050
Paulipetro	1980/81	45	58	653.600	7.520.570
Paulipetro	1980/81	45	59	652.000	7.524.300
Paulipetro	1980/81	45	60	630.370	7.535.150
Paulipetro	1980/81	45	61	634.500	7.534.250
Paulipetro	1981	45	62	644.120	7.557.370
Paulipetro	1981	45	63	648.070	7.549.570
Paulipetro	1981	45	64	646.320	7.544.220
Paulipetro	1981	45	65	650.670	7.556.650
Paulipetro	1981	45	66	638.970	7.550.950
Paulipetro	1981	45	67	652.700	7.537.100
Paulipetro	1981	45	68	636.420	7.553.320
Paulipetro	1981	45	69	641.550	7.548.570
Paulipetro	1981	45	70	616.820	7.522.820
Paulipetro	1981	45	71	621.370	7.518.750
Paulipetro	1981	45	72	613.400	7.529.630
Paulipetro	1981	45	73	605.900	7.532.570
Paulipetro	1981	45	74	616.070	7.534.400
Paulipetro	1981	45	75	623.430	7.527.200
Paulipetro	1981	45	76	618.450	7.526.950
DAEE	1977	-	36	703.050	7.549.600
DAEE	1977	-	38	704.550	7.521.250
DAEE	1977	-	39	681.850	7.547.350
DAEE	1977	-	40	676.950	7.551.200
DAEE	1977	-	41	665.250	7.562.000
DAEE	1978	-	183/1	607.600	7.549.750
DAEE	1978	-	183/2	615.650	7.542.200
DAEE	1978	-	184/1	639.100	7.546.400
DAEE	1978	-	184/2	634.400	7.544.450
DAEE	1978	-	184/3	648.000	7.539.100
DAEE	1978	-	184/4	638.400	7.540.650

<i>Cliente</i>	<i>Ano</i>	<i>Bloco</i>	<i>Nº SEV</i>	<i>UTM E (m)</i>	<i>UTM N (m)</i>
DAEE	1978	-	184/5	648.800	7.538.150
DAEE	1978	-	210/1	637.550	7.538.700
DAEE	1978	-	210/2	643.400	7.531.600
DAEE	1978	-	210/3	648.800	7.537.350
DAEE	1978	-	210/4	651.050	7.536.100
DAEE	1980	-	1	653.510	7.520.550
DAEE	1980	-	2	655.330	7.518.600
DAEE	1980	-	3	651.080	7.520.550
DAEE	1980	-	4	650.580	7.519.210
DAEE	1980	-	5	651.570	7.518.390
DAEE	1980	-	6	649.810	7.516.890
DAEE	1980	-	7	651.950	7.514.690
DAEE	1980	-	8	653.700	7.511.990