

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA MARIA  
CENTRO DE TECNOLOGIA  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL**

**DIAGNÓSTICO AMBIENTAL URBANO DO MEIO  
FÍSICO DE SANTA MARIA - RS**

**DISSERTAÇÃO DE MESTRADO**

**Ana Carla Carvalho Rauber**

**Santa Maria, RS, Brasil,  
2008**

# **DIAGNÓSTICO AMBIENTAL URBANO DO MEIO FÍSICO DE SANTA MARIA – RS**

**por**

**Ana Carla Carvalho Rauber**

Dissertação apresentada ao Curso de Mestrado do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Área de Concentração em Construção Civil e Preservação Ambiental, da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM, RS), como requisito parcial para obtenção do grau de **Mestre em Engenharia Civil.**

**Orientador: Prof. Dr. Rinaldo José Barbosa Pinheiro**

**Co-orientador: Prof. Dr. José Luiz Silvério da Silva**

**Santa Maria, RS, Brasil  
2008**

**Universidade Federal de Santa Maria  
Centro de Tecnologia  
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil**

A Comissão Examinadora, abaixo assinada  
aprova a Dissertação de Mestrado

**DIAGNÓSTICO AMBIENTAL URBANO DO MEIO FÍSICO DE  
SANTA MARIA - RS**

elaborada por  
**Ana Carla Carvalho Rauber**

Como requisito parcial para obtenção do grau de  
**Mestre em Engenharia Civil**

**COMISSÃO EXAMINADORA:**

---

**Rinaldo José Barbosa Pinheiro, Dr. (UFSM)**  
(Presidente/Orientador)

---

**José Luiz Silvério da Silva, Dr. (UFSM)**  
(Co-orientador)

---

**Andrea Valli Nummer, Dr. (UFSM)**

---

**Luiz Antônio Bressani, Ph.D. (UFRGS)**

Santa Maria, 19 de dezembro de 2008.

## **AGRADECIMENTOS**

À Universidade Federal de Santa Maria por me disponibilizar um ensino gratuito e de qualidade.

À CAPES pelo apoio financeiro durante 12 meses do curso.

Ao meu orientador e amigo, Dr. Rinaldo José Barbosa Pinheiro, pela orientação e colaboração durante o período de mestrado.

Ao meu co-orientador e amigo Dr. José Luiz Silvério da Silva e a equipe do Laboratório de Hidrogeologia, em especial ao geógrafo Leonidas Luiz Volcato Descovi Filho, sempre prestativo e atencioso.

Aos meus amigos e geógrafos Isabel Camponogara e Adilson de Chaves pela colaboração na confecção dos mapas e cartogramas.

Ao colega e amigo Cristiano Freitas da Silva pela colaboração e auxílio durante os ensaios de laboratório e ao laboratorista João Nunes Maciel do LMCC, pelos conhecimentos transmitidos com paciência e atenção.

Ao secretário do curso de pós-graduação em Engenharia Civil Eliomar Balbuíno Pappis pela atenção e presteza na solução de problemas

Em especial, ao meu noivo e amigo Marcio Luiz Cassânego, pela sua colaboração, carinho, paciência e amizade durante a elaboração desta pesquisa.

À minha família, que mesmo de longe sempre me apóia e acredita em minha capacidade.

E a todos aqueles que contribuíram de alguma forma para esta pesquisa.

## RESUMO

Dissertação de Mestrado  
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil  
Universidade Federal de Santa Maria

### DIAGNÓSTICO AMBIENTAL URBANO DO MEIO FÍSICO DE SANTA MARIA – RS

Autora: Ana Carla Carvalho Rauber  
Orientador: Prof. Dr. Rinaldo José Barbosa Pinheiro  
Co-orientador: Prof. Dr. José Luiz Silvério da Silva  
Data e local da defesa: Santa Maria, 19 de dezembro de 2008.

O diagnóstico ambiental urbano visa subsidiar os municípios na tomada de decisão perante a preservação dos recursos naturais. Especificamente este trabalho estuda o aspecto ambiental urbano do meio físico. A área de estudo é a Carta das Unidades Geotécnicas de Maciel Filho (1990) do município de Santa Maria, localizado na Depressão Central do Estado do Rio Grande do Sul. A metodologia de pesquisa teve início com estudos de escritório através de pesquisas pré-existentes; da aplicação de ferramentas de geoprocessamento com o uso do *software Spring 4.2* para a elaboração dos mapas temáticos e cartogramas; da identificação e caracterização das unidades geotécnicas realizadas através de ensaios de laboratório e 20 ensaios de condutividade hidráulica ( $k$ ) in situ com a técnica do piezômetro escavado. O estudo do Índice vulnerabilidade natural dos aquíferos pelo método "GOD" de Foster e Hirata (1988) e Foster et al. (2003) com a utilização de dados de 36 poços. A espacialização dos poços tubulares e dos locais dos ensaios de condutividade hidráulica na carta das unidades geotécnicas foi utilizado o sistema de Coordenadas Universal Transversa de Mercator/UTM obtidas com o *Global Position System/GPS*. Avaliou-se a superfície potenciométrica associada aos cartogramas de vulnerabilidade e aos pontos potenciais de contaminação através do programa SURFER 8.0 adotando-se o interpolador *Krigagem* matemática. Como resultados obteve-se, quanto à caracterização geotécnica parâmetros coerentes com as descrições da área de estudo, com relação aos ensaios de condutividade hidráulica in situ os valores situaram-se entre  $10^{-5}$  e  $10^{-9}$  m/s, classificando as unidades desde permeáveis (Colúvios, Depósitos Fluviais, Caturrita, Botucatu, Passo das Tropas) até impermeáveis (Membro Alemoa da Formação Santa Maria). Para o Índice de vulnerabilidade natural dos aquíferos obteve-se 4 classes (insignificante, baixa, média e alta). Do total de poços analisados 11 foram classificados de média a alta vulnerabilidade situados ao sul e norte da carta de unidades geotécnicas de Santa Maria. Foram identificados 35 postos de combustíveis, 6 cemitérios e algumas áreas de depósitos de lixo. A maioria das fontes potenciais de contaminação são pontuais e estão inseridas em áreas bastante susceptíveis a poluição dos solos e dos aquíferos. A metodologia proposta apresentou-se viável e forneceu subsídios para o estudo do meio físico.

Palavras-chaves: meio físico, condutividade hidráulica, vulnerabilidade.

## **ABSTRACT**

Dissertation of Master's Degree  
Program of Master's Degree in Civil Engineering  
Federal University of Santa Maria

### **URBAN ENVIRONMENTAL DIAGNOSTIC OF SANTA MARIA'S PHYSICAL SPACE IN THE STATE OF RIO GRANDE DO SUL**

Author: Ana Carla Carvalho Rauber  
Advisor: Prof. Dr. Rinaldo José Barbosa Pinheiro  
Co-advisor: Prof. Dr. José Luiz Silvério da Silva  
Date and Local of defense: Santa Maria, December, 19<sup>th</sup> of 2008

The urban environment diagnosis aims at subsidizing the districts in the decision-making in the presence of natural resources preservation. This study, specifically, analyze the urban environment aspect of the physical space. The area of this study is the Map of the Geotechnical Engineering Units according to Maciel Filho (1990) of Santa Maria, located in the Central Depression of the State of Rio Grande do Sul. The methodology of this research started with office studies by means of preexisting researchers; geoprocess tools application with the use of the software *Spring 4.2* for the thematic maps and cartograms elaboration; identification and characterization of the geotechnical units carried out thereby laboratory assays and 20 assays of hydraulic conductivity (k) the field carried out using the method of excavated piezometer. The study of the aquifer natural vulnerability were accomplished based on 'GOD' method according to Foster and Hirata (1988) and Foster et al. (2003) using data from 36 wells. The spacialization of the tubular wells and the hydraulic conductivity assays in the Map of the Geotechnical Engineering using the Universal Transverse Mercator/UTM coordinate system from Global Position System /GPS. The potentiometer surface was evaluated associated to the cartograms of vulnerability and the potential points of contamination by the use of SURFER 8.0 software adopting mathematical interpolator Kriging. The results shown that related to the characterization geotechnical coherent parameters with the descriptions of the study area and related to the assays of hydraulic conductivity in the field the range of variation was between  $10^{-5}$  to  $10^{-8}$  m/s, classifying the units since the high permeability (Gravitational and Fluvial Deposits, Caturrita, Botucatu and Passo das Tropas formations) to the low permeability (Santa Maria Formation, Alemoa Member). For the vulnerability natural index from the aquifers 4 classes were obtained (negligible, low, moderate and high). From all wells analyzed 11 were classified from moderate to high vulnerability situated in the south and north from each geotechnical units of Santa Maria. The results also shown that were identified 35 fuel ranks, 06 cemeteries and 06 areas of garbage deposits. The majority of the potential sources of contamination are prompt and are inserted in sufficiently susceptible areas of ground and the aquifers pollution. The methodology was viable and gave supply to the physical space research.

Key-word: physical space, hydraulical conductivity, vulnerability.

## LISTA DE FIGURAS

FIGURA 2.1 - Fontes potenciais de contaminação dos recursos hídricos subterrâneos .....	18
FIGURA 2.2 – Esquema do piezômetro escavado (Bortoli,1999) .....	27
FIGURA 2.3 – Proposição para o fator F Tavenas <i>et al.</i> (1990) .....	28
FIGURA 2.4 - Tipos de aquíferos .....	30
FIGURA 3.1 – Montagem do piezômetro .....	37
FIGURA 3.2 – Piezômetro instalado no campo .....	37
FIGURA 3.3 – Avaliação da vulnerabilidade, metodologia “GOD” .....	39
FIGURA 4.1 – Localização de Santa Maria no Mapa do Brasil e no Estado do Rio Grande do Sul .....	43
FIGURA 4.2 – Mapa Geológico da Folha de Santa Maria – RS .....	45
FIGURA 4.3 – Vista do município de Santa Maria .....	47
FIGURA 4.4 – Carta das Unidades Geotécnicas de Maciel Filho 1990 .....	52
FIGURA 5.1 – Carta das Unidades Geotécnicas de Santa Maria digitalizada, escala original 1:25.000 .....	56
FIGURA 5.2 – Depósito Fluvial na planície do Arroio Cadena (DFL1, DFL2, DFL3) .....	58
FIGURA 5.3 – Perfil de Colúvio (COL1) .....	58
FIGURA 5.4 – Perfil de Colúvio (COL2) .....	58
FIGURA 5.5 – Botucatu (BOT1), arenito .....	59
FIGURA 5.6 – Botucatu (BOT2), arenito silicificado .....	59
FIGURA 5.7 – Caturrita (CAT1) .....	59
FIGURA 5.8 – Caturrita (CAT2) .....	59
FIGURA 5.9 – Membro Alemoa (SMA1) .....	60
FIGURA 5.10 – Membro Alemoa (SMA4) .....	60
FIGURA 5.11 – Passo das Tropas (SMP1).....	60
FIGURA 5.12 – Passo das Tropas (SMP6) .....	60
FIGURA 5.13 – Distribuição granulométrica dos perfis dos Depósitos Fluviais de Várzea .....	63
FIGURA 5.14 – Distribuição granulométrica dos perfis dos Depósitos Coluvionares .....	63

FIGURA 5.15 – Distribuição granulométrica dos perfis da Formação Botucatu .....	64
FIGURA 5.16 – Distribuição granulométrica dos perfis da Formação Caturrita .....	64
FIGURA 5.17 – Distribuição granulométrica dos perfis da Formação Santa Maria Membro Alemoa .....	65
FIGURA 5.18 – Distribuição granulométrica dos perfis da Formação Santa Maria Passo das Tropas .....	65
FIGURA 5.19 – Representação gráfica dos resultados dos ensaios de condutividade com a técnica do piezômetro .....	68
FIGURA 5.20 – Espacialização dos poços tubulares e dos ensaios de condutividade hidráulica .....	70
FIGURA 5.21 – Perfil de um poço tubular inserido na área de estudo (Poço 10), SIAGAS (2008) .....	73
FIGURA 5.22 – Cartograma do índice de vulnerabilidade natural dos aquíferos .....	74
FIGURA 5.23 – Cartograma da superfície potenciométrica .....	76
FIGURA 5.24 – Espacialização dos postos de combustíveis, cemitérios e áreas de depósitos de lixo .....	79



## LISTA DE TABELAS

TABELA 2.1 – Valores típicos do coeficiente de permeabilidade .....	25
TABELA 5.1 – Identificação dos perfis típicos estudados .....	57
TABELA 5.2 – Caracterização das unidades geotécnicas .....	62
TABELA 5.3 – Resultados dos ensaios com piezômetros escavados para determinação do k (in situ) .....	67
TABELA 5.4 – Índice de Vulnerabilidade natural do aquífero .....	72
TABELA 5.5 – Tabela de localização dos 35 postos de combustíveis na área de estudo .....	78
TABELA 5.6 – Localização dos 6 cemitérios inseridos na área de estudo .....	81

## LISTA DE ANEXOS

<b>ANEXO A</b> – Banco de dados dos poços e índice de vulnerabilidade .....	96
---	----

## SUMÁRIO

<b>RESUMO</b> .....	4
<b>ABSTRACT</b> .....	5
<b>LISTA DE FIGURAS</b> .....	6
<b>LISTA DE TABELAS</b> .....	8
<b>LISTA DE ANEXOS</b> .....	9
<b>1 INTRODUÇÃO</b> .....	12
<b>2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b> .....	15
2.1 Diagnóstico Ambiental .....	15
2.2 Meio Ambiente Urbano – Aspectos Físicos .....	16
2.3 Fontes potenciais de poluição urbana .....	17
2.4 Caracterização dos Sistemas de Informação Geográfica (SIG) .....	22
2.5 Condutividade Hidráulica .....	24
2.6 Superfície Potenciométrica .....	29
2.7 Vulnerabilidade natural dos aquíferos .....	31
<b>3 MÉTODOS</b> .....	35
3.1 Estudo de escritório .....	35
3.2 Digitalização da Carta das Unidades Geotécnicas de Santa Maria – RS .....	35
3.3 Identificação e caracterização das Unidades Geotécnicas .....	36
3.4 Cadastro dos poços tubulares .....	38
3.5 Vulnerabilidade natural do aquífero e metodologia G.O.D .....	38
3.6 Espacialização dos poços e dos ensaios de condutividade hidráulica .....	40
3.7 Confeção dos cartogramas do índice de vulnerabilidade e superfície potenciométrica .....	41
3.8 Espacialização das fontes potenciais de poluição urbana .....	41

<b>4 CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO .....</b>	<b>42</b>
4.1 Geologia .....	42
4.2 Geomorfologia .....	46
4.3 Hidrografia e Hidrogeologia .....	48
4.4 Pedologia .....	49
4.5 Geotecnia .....	51
4.6 Clima e Vegetação .....	53
<b>5 APRESENTAÇÃO E DESCRIÇÃO DOS RESULTADOS .....</b>	<b>55</b>
5.1 Carta das Unidades Geotécnicas da Folha de Santa Maria – RS .....	55
5.2 Identificação e caracterização das Unidades Geotécnicas .....	55
5.3 Ensaios de campo de condutividade hidráulica .....	66
5.4 Poços tubulares e vulnerabilidade dos aquíferos .....	69
5.5 Superfície Potenciométrica .....	75
5.6 Espacialização de fontes potenciais de poluição urbana .....	77
<b>6 CONSIDERAÇÕES FINAIS E SUGESTÕES .....</b>	<b>83</b>
<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	<b>87</b>
<b>ANEXO .....</b>	<b>95</b>

# 1 INTRODUÇÃO

A queda da qualidade de vida nas cidades de países desenvolvidos e mesmo em países em desenvolvimento, devido à poluição, é um processo crescente desde o século XX. Com o passar do tempo fatores que indicavam poluição foram destacando-se mostrando a importância do meio ambiente e do planejamento territorial para a qualidade de vida. O planejamento territorial permite uma compreensão do processo de ocupação do espaço e da distribuição dos recursos naturais e recursos de infra-estrutura, estradas, saneamento, disposição de resíduos, energia, entre outros.

Na maioria das vezes a transformação do meio ambiente não acontece de forma equilibrada, ou seja, levando-se em consideração suas características físicas e seus condicionantes naturais. Prova disto é que as cidades seguidamente têm de enfrentar problemas relacionados com as intempéries da natureza, atingidas por cheias que invadem moradias, chuvas que alagam casas e ruas, ou problemas como escorregamentos e deslizamentos de encostas de morros, vitimando às vezes famílias inteiras.

Atualmente o gerenciamento da qualidade ambiental nas cidades tem-se voltado, prioritariamente, para problemas de poluição do ar, ruído, disponibilidade de água, poluição visual, condições precárias de habitação, depósitos de lixo e outros. Somam-se, a estes aspectos, os problemas decorrentes da indução de processos do meio físico, como erosão, escorregamentos, assoreamentos, enchentes, inundações, recalques, afundamentos de solo, contaminação de mananciais e outros, cujas conseqüências agravam as condições de saúde, segurança, e a qualidade de vida nas cidades.

A caracterização e o controle desses processos constituem a base de atuação da geologia e da geotecnia na gestão ambiental de áreas urbanas, cuja inserção pode ocorrer por meio de instrumentos, como por exemplo, documentos cartográficos (mapas e cartas), que objetivam orientar o equacionamento dos problemas ambientais.

Nesta pesquisa serão discutidos os problemas geotécnicos ambientais e hidrogeológicos do município de Santa Maria, Estado do Rio Grande do Sul - RS, utilizando como base a carta das Unidades Geotécnicas (MACIEL FILHO, 1990).

Será analisada a condutividade hidráulica das unidades geotécnicas associada a vulnerabilidade dos aquíferos à contaminação da água subterrânea.

A geotecnia ambiental é a ciência interdisciplinar que estuda a atuação do solo e rocha e suas interações com os ciclos ambientais, incluindo a atmosfera, biosfera, hidrosfera, e litosfera, bem como a geo-micro-biosfera, o que inclui as características de vegetação, raízes e atividades bacterianas no solo, e a subsequente resposta para o comportamento de engenharia do sistema solo-água (GALVÃO, 2002).

Para o mesmo autor, a Geotecnia Ambiental através de suas especializações (Mecânica dos Solos, Mecânica das Rochas) e áreas afins (Hidrologia, Hidrogeologia) possui o atendimento, no todo ou em parte, da grande maioria dos problemas causados ao meio físico pelas atividades de degradação ambiental, resultantes de escavações, construção de barragens, rodovias, aeroportos, disposição de rejeitos e estéreis de mineração, disposição de resíduos sólidos urbanos e industriais, aterros, controle de erosão e redução de material assoreado, minimização de abatimentos súbitos e subsidências, projetos de rebaixamento do lençol freático. Além disso, a geotecnia ambiental engloba atividades de monitoramento de áreas degradadas, descontaminação de solos, avaliação de risco e processos de remediação.

Para o entendimento do estudo sobre a vulnerabilidade dos aquíferos, no município de Santa Maria, é necessário entender que a poluição é provocada principalmente pelas atividades humanas, pelo aumento da população, além do consumo excessivo e o alto grau de desperdício são fatores que colocam em risco a disponibilidade de água doce. Por sua importância estratégica para as gerações presentes e futuras, nossas reservas de água subterrânea necessitam de um cuidado especial, para sua preservação e utilização de forma sustentável.

Segundo Heath (1983), a maioria da poluição subterrânea resulta da disposição de resíduos na superfície da terra, através de escavações rasas ou poços profundos, uso de fertilizantes ou outros produtos químicos, vazamentos em esgotos, tanques de armazenamento e dutos, e em confinamento de animais. A magnitude de qualquer problema de poluição depende do tamanho da área afetada, da quantidade de poluente envolvida, da solubilidade, toxicidade, e densidade do poluente, da composição mineral e das características hidráulicas de solos e rochas através dos quais o poluente se move e do efeito potencial sobre o uso da água subterrânea.

Por outro lado o crescimento desordenado das cidades é sem dúvida uma parcela importante de contribuição no aparecimento de problemas ambientais. Nesse contexto, a cidade de Santa Maria, é palco de diversas ocorrências de problemas ambientais, dentre eles, os esgotos in natura lançados em vários cursos de água, como por exemplo, no Arroio Cadena, e também o antigo Lixão da Caturrita.

A importância de um trabalho de diagnóstico e análise sobre problemas geotécnicos ambientais é subsidiar os municípios na solução dos conflitos existentes no meio ambiente urbano, com o intuito de planejar e evitar danos ambientais futuros, causados pelo acelerado processo de urbanização.

O objetivo geral da pesquisa foi realizar um diagnóstico ambiental urbano do meio físico do município de Santa Maria – RS, tomando como base a Carta das Unidades Geotécnicas de Maciel Filho (1990). Os objetivos específicos foram: digitalizar a Carta das Unidades Geotécnicas; determinar a condutividade hidráulica nas diferentes unidades geotécnicas que ocorrem aflorantes na região; espacializar os ensaios de condutividade hidráulica; avaliar o índice de vulnerabilidade natural dos aquíferos utilizando a metodologia “GOD” desenvolvida por Foster *et al.* (2006); simular o fluxo da água subterrânea através da superfície potenciométrica e espacializar as fontes potenciais de contaminação urbana.

A presente dissertação foi dividida em sete capítulos com o objetivo de facilitar a leitura e a compreensão do trabalho. O capítulo 1 contém a introdução, uma breve discussão sobre o tema, sua importância, bem como os objetivos da pesquisa.

O capítulo 2 apresenta uma revisão bibliográfica realizada durante a pesquisa, além da evolução dos conceitos básicos sobre os assuntos relacionados para a compreensão do estudo.

O capítulo 3 apresenta as etapas do desenvolvimento metodológico para a elaboração desta pesquisa.

A localização da área do estudo, através de uma caracterização geral do município de Santa Maria – RS é apresentada no capítulo 4.

O capítulo 5 apresenta os resultados e discussões da pesquisa desenvolvida.

O capítulo 6 apresenta as conclusões dos resultados obtidos e as sugestões para futuras pesquisas nesta área. As referências bibliográficas utilizadas neste trabalho estão apresentadas no capítulo 7.

## **2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA**

Este capítulo abordará conceitos sobre diagnóstico ambiental, meio ambiente urbano - aspectos físicos, fontes potenciais de poluição urbana, caracterização dos sistemas de informação geográfica (SIG), condutividade hidráulica, vulnerabilidade natural dos aquíferos à contaminação e superfície potenciométrica.

### **2.1 Diagnóstico Ambiental**

Segundo Karnaukhova (2002) atualmente está absolutamente claro que a relação entre o desenvolvimento econômico e a qualidade ambiental é muito mais complexa do que normalmente se admite nos planos e projetos adotados para gestão ambiental. Ainda, o mesmo autor afirma que a consciência cientificamente fundamentada desta complexidade permite ter esperança de que as políticas territoriais elaboradas com mais cuidado poderão harmonizar e reforçar beneficentemente a efetividade tanto do crescimento econômico quanto da garantia da qualidade do ambiente. Para tanto, necessita-se de estudos que permitirão o desenvolvimento prático do suporte informativo para o planejamento, que, por sua vez, seja capaz de refletir com maior completude possível a referida complexidade de relações entre o Homem e Ambiente.

Os estudos de diagnóstico da qualidade ambiental, segundo Pozza (2008), são de fundamental importância para a avaliação do potencial ou limitação do meio frente ao uso e ocupação de uma determinada área.

O completo e correto diagnóstico ambiental do meio físico precisa abranger a integração das características dos componentes naturais como condicionantes das aptidões para uso, bem como as modificações de suas características e da evolução destas ao longo do tempo em que as atividades as afetam. Diagnóstico e análise destes condicionantes são apoios ao gerenciamento de riscos e previsão de acidentes e ao planejamento territorial, bem como à gestão de recursos hídricos e a necessidade de ações de recuperação (KARNAUKHOVA, 2002).



## 2.2 Meio Ambiente Urbano – Aspectos Físicos

De acordo com a Política Nacional do Meio Ambiente (Lei Federal 6938/81), o termo meio ambiente é definido como “o conjunto de condições, leis, influências e alterações de ordem física, química e biológica, que permite, abriga e rege a vida em todas as suas formas”.

A Resolução N°001 de 23 de Janeiro de 1986 do Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA) que regulamenta a exigência de estudos de impacto ambiental no Brasil, determina que o diagnóstico ambiental da área de influência do projeto deve considerar o meio físico, o meio biológico e meio socioeconômico. Salienta-se que o meio físico descrito nesta resolução engloba o subsolo, as águas, o ar e o clima, destacando os recursos minerais, a topografia, os tipos e aptidões do solo, os corpos d’água, o regime hidrológico, as correntes marinhas, as correntes atmosféricas.

Para Oliveira (1995) o meio físico pode ser entendido como sucessão de fenômenos que ocorrem num determinado tempo e espaço, e cujas alterações impostas pelo homem podem gerar impactos e afetar a qualidade ambiental.

O mesmo autor descreve que: “a introdução de uma obra ou qualquer outra forma de uso do solo num determinado ambiente, ainda que garantida com seus próprios fatores de estabilidade e segurança, pode não manter uma relação equilibrada com o meio ambiente, por exemplo, a drenagem de uma estrada pode ter sido adequadamente projetada para captar e eliminar as águas da pista, mas o lançamento concentrado das águas captadas poderá provocar alterações significativas no escoamento superficial dos terrenos e acelerar os processos erosivos”.

Para Karnaukhova (2002) o meio físico é considerado como base elementar para o planejamento de um território. O mesmo autor descreve que o meio físico constitui alicerce das atividades econômicas e deve ser considerado como adaptável às necessidades da sociedade instalada, incluídas as de proteção e preservação das condições naturais.

Segundo Albuquerque Filho (1995) no meio ambiente são considerados fatores abióticos (rocha, ar, água) como componentes do meio físico e bióticos (vegetal e animal) como componentes do meio biológico.

O equacionamento de problemas decorrentes do uso e ocupação do meio físico tem requerido, tanto por parte do setor público como do privado, a utilização de técnicas de abordagem integrada dos vários processos e fenômenos de interesse às atividades e instrumentos de gestão urbana, rural e ambiental (ALBUQUERQUE FILHO, 1995).

Os problemas ambientais estão relacionados ao complexo quadro de crise geral e a falta de uma política quanto ao planejamento da utilização dos recursos naturais, o que tem gerado a sua utilização irracional com algumas perdas irreversíveis, induzindo importantes implicações econômicas devido à degradação ambiental.

Segundo Ferreira (2004) no Brasil, o desencadeamento desordenado da exploração dos recursos naturais, tem provocado sérios reflexos ao meio ambiente. Os resultados são a degradação da qualidade do solo, a extinção de espécies animais e vegetais, o esgotamento das fontes não-renováveis de energia, o encolhimento das áreas de matas nativas e a poluição do solo, das águas e do ar.

A poluição destes recursos naturais, solo, água e ar nos centros urbanos está diretamente relacionada com a instalação de empreendimentos em locais inadequados, tais como: indústrias, postos de combustível, áreas de depósitos de resíduos sólidos (lixões), cemitérios, além da falta de saneamento e problemas como erosão, assoreamento, escorregamentos, enchentes, entre outros.

Tais conseqüências dos fatores citados, segundo Prandini (1995), são manifestações potenciadas ou mesmo totalmente geradas por processos, produtos e resíduos que caracterizam o atual momento civilizatório. Ainda para o mesmo autor, estas modificações projetam um futuro próximo de alterações profundas na biosfera, que pode levar a destruição da própria humanidade.

### **2.3 Fontes potenciais de poluição urbana**

Para se avaliar os riscos de contaminação dos recursos naturais, faz-se necessário a análise sistêmica, ou seja, relacionando as fontes ou cargas contaminantes em superfície e a vulnerabilidade natural existente na área. Desta forma, um estudo e o levantamento das fontes ou atividades potencialmente poluidoras, indicam as reais possibilidades de contaminação que essas atividades

representam (CHAVES, 2007). A Figura 2.1 apresenta algumas fontes potenciais de contaminação urbana, como postos de combustíveis, cemitérios, indústrias, depósitos de resíduos, esgoto doméstico e agricultura.

Para Braga (2002) o conceito de poluição está associado às alterações indesejadas provocadas pelas atividades e intervenções humanas no ambiente.

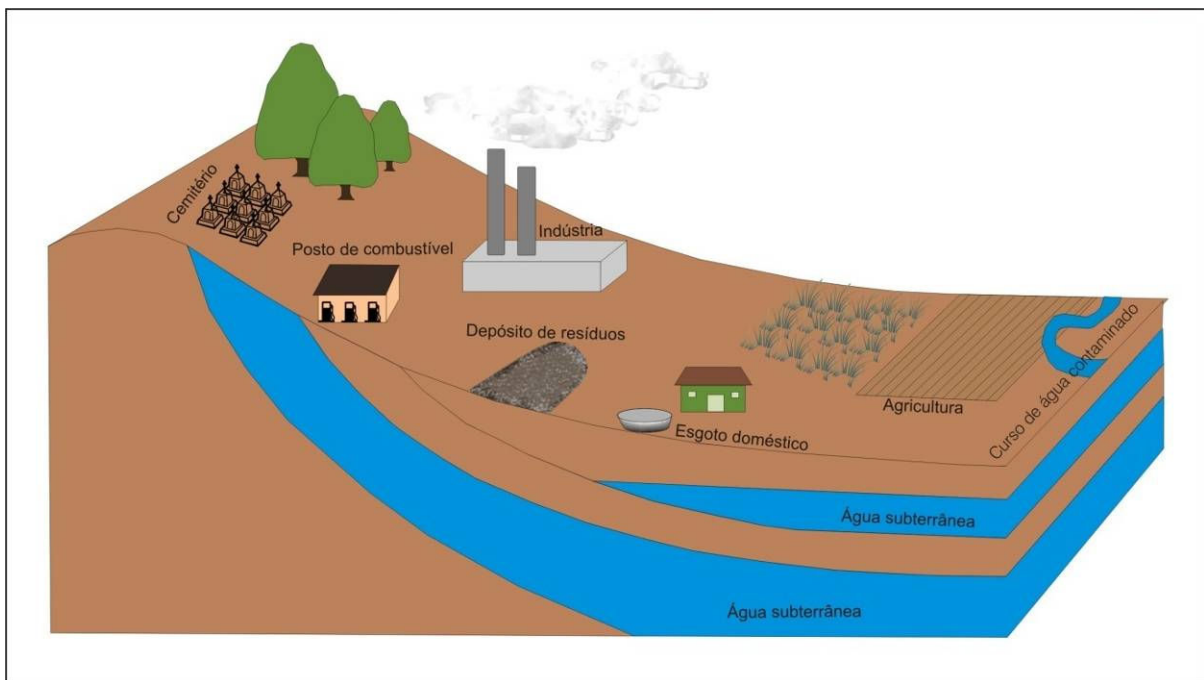


Figura 2.1 - Fontes potenciais de contaminação dos recursos hídricos subterrâneos.  
Fonte: Adaptado de Heath (1983)

As atividades industriais são seguramente as que apresentam maior perigo de contaminação do solo e das águas superficiais e subterrâneas, devido às altas concentrações de produtos químicos e práticas inadequadas de deposição de efluentes e resíduos sólidos (GARCIA, 2004).

Segundo a Agência Nacional de Águas - ANA (2005) o manuseio de produtos tóxicos contaminantes sem a adoção de normas adequadas e a ocorrência de acidentes ou vazamentos nos processos produtivos, de transporte ou de armazenamento de matérias primas e produtos da indústria representam sério risco ao meio ambiente e à saúde humana. Normalmente os contaminantes produzidos pelas indústrias atingem os solos e rios, e posteriormente, dependendo das condições de vulnerabilidade do aquífero (tipo de solo, profundidade do nível de água, entre outros) podem atingir as águas subterrâneas.

Em relação à disposição de resíduos sólidos urbanos em lixões vários autores descrevem seu alto potencial poluidor. Acarretam problemas a saúde pública através da proliferação de vetores de doenças, geração de maus odores e poluição do solo e das águas subterrâneas e superficiais. Em geral estes grandes problemas são resultantes do crescimento populacional, do desenvolvimento tecnológico e industrial, da disposição e tratamento dos resíduos sólidos. Este problema é especialmente crítico nas áreas urbanas (ANA, 2005; CHAVES, 2007).

Na preservação das águas subterrâneas sob o aspecto ambiental, um dos fatores mais importante é a questão do chorume. A decomposição anaeróbica da matéria orgânica presente nos resíduos sólidos produz gases e chorume. Os gases gerados são o sulfídrico, metano, e mercaptano, que possuem odor desagradável, sendo o metano inflamável com risco de provocar explosões.

O chorume é um líquido negro formado por compostos orgânicos e inorgânicos, apresenta altas concentrações de matéria orgânica e metais pesados. A infiltração do chorume contamina o solo e pode atingir a água subterrânea, portanto, os lixões são formas inadequadas de disposição final de resíduos sólidos, sem medidas de proteção ao meio ambiente ou à saúde pública (ANA, 2005). Em relação a este tema Jucá (2004) apresenta um panorama da destinação final de resíduos no Brasil com a situação até o momento e perspectivas futuras. Neste trabalho segundo dados da Pesquisa Nacional de Saneamento Básico - PNSB 22,5% em peso dos resíduos ainda eram dispostos em vazadouros a céu aberto (lixões). Mais alarmante ainda são os 63,1% dos municípios do Brasil que dispõem seus resíduos desta maneira.

Especificamente em Santa Maria destaca-se o trabalho pioneiro de Maciel Filho (1990) com a confecção da carta dos condicionantes à ocupação da cidade, onde foram identificadas algumas áreas de depósito ou aterro com lixos existentes no município de Santa Maria.

Os postos de combustível, oficinas mecânicas e os lava-à-jato também estão entre os principais responsáveis pela contaminação do solo e das águas urbanas, este fato deve-se principalmente pelo elevado número deste tipo de empreendimento nos centros urbanos e também pela idade avançada por grande parte dos tanques de estocagem de combustíveis subterrâneos nos postos. Garcia (2004) em levantamento realizado na Folha de Santa Maria identificou 35 postos de combustíveis, associando ao subsolo onde estão localizados. Já a Agência Nacional

do Petróleo – ANP (2008), tem cadastrados 78 empreendimentos, incluindo-se a área rural o que pode ser explicado pelo aumento da frota de veículos. Segundo o IBGE (2007) o município conta com uma frota de 80.965 veículos.

Os tanques enterrados de armazenamento de combustíveis são objetos de grande preocupação, já que qualquer vazamento, mesmo que mínimo, pode comprometer seriamente o solo e chegar ao lençol freático. Os principais combustíveis utilizados no Brasil são gasolina, óleo diesel e álcool etílico ou etanol. E dentre os lubrificantes a graxa e o óleo lubrificante. Os vazamentos dos tanques de armazenamento de combustíveis, os compostos hidrocarbonetos podem migrar para estruturas como poços, serviços públicos subterrâneos, esgotos ou áreas de descarga naturais de água subterrânea, tais como nascentes ou rios (GUIGUER, 2000; GARCIA, 2004; MARQUES, 2003 apud GARCIA, 2004).

A legislação brasileira que normatiza o funcionamento dos postos de combustíveis é a Resolução N° 273/2000 do CONAMA. Esta resolução considera que todas as instalações de armazenamento de derivados de petróleo e outros combustíveis são empreendimentos potenciais ou parcialmente poluidores do meio ambiente. Dentre os documentos necessários para o licenciamento ambiental dos estabelecimentos citados, solicita-se a caracterização hidrogeológica com definição do sentido de fluxo das águas subterrâneas, a identificação das áreas de recarga, a localização de poços de captação de água num raio de 100m, a caracterização geológica do terreno com análise do solo (permeabilidade e o potencial de corrosão). Esta legislação foi complementada pela Resolução N° 319/2002 do CONAMA, na qual determina que os postos de combustíveis para obterem o licenciamento ambiental devem instalar poços de monitoramento para a detecção de vazamentos de combustível, conforme as NBR 13784/1997 e NBR 14623/2000 da ABNT.

Outra situação preocupante são os cemitérios. De acordo com BRASIL (2007a) - Fundação Nacional da Saúde - FUNASA os cemitérios podem ser fontes geradoras de impactos ambientais. A localização e a operação inadequadas de sepultamentos em meios urbanos podem provocar a contaminação do solo e mananciais hídricos por microorganismos que se proliferam através da decomposição dos corpos. Por exemplo, se o aquífero for contaminado na área do cemitério, esta contaminação pode fluir para áreas próximas, aumentando o risco para a saúde das pessoas que venham a utilizar da água subterrânea através de captação por poços.

Segundo Rodrigues *et al.* (2003) os cemitérios são um risco potencial para o meio ambiente e a saúde pública, os mesmos requerem cuidados técnicos e científicos na sua implantação e operação. O impacto que o mesmo pode provocar ao meio ambiente depende de vários fatores: condições meteorológicas locais (precipitação, umidade, temperatura); geologia e geomorfologia; condições de operação do cemitério (sepultamento direto no solo ou impermeabilização da sepultura); topografia (área e perfil do terreno); características do solo (condutividade hidráulica); hidrogeologia (comportamento do lençol freático).

A contaminação das águas subterrâneas por cemitérios ocorre a partir da liberação de fluídos húmidos chamados de necrochorume, substância esta, gerada com a decomposição dos corpos. O necrochorume é constituído de água, sais minerais, proteínas e 471 substâncias orgânicas, incluindo a cadaverina e a putrescina que são muito tóxicas, além de vírus e bactérias. Portanto, o necrochorume pode ser considerado uma água residuária, sendo um líquido viscoso contendo grande quantidade de matéria orgânica e sais minerais (aproximadamente 40 %). Pelo fato de conter agentes patogênicos (bactérias e vírus), necessita de estudo para a definição da melhor tecnologia para seu tratamento (RODRIGUES *et al.*, 2003; BRASIL, 2007).

Segundo a Resolução N° 335/2003 do CONAMA, o licenciamento ambiental de um cemitério deverá apresentar dentre outros documentos a localização da área, um levantamento planialtimétrico, cadastral e compreendendo o mapeamento de restrições contidas na legislação ambiental, incluindo o mapeamento e caracterização da cobertura vegetal, estudo hidrogeológico (nível do lençol freático), dados de precipitação pluviométrica e caracterização do solo (condutividade hidráulica). Esta resolução foi complementada pela Resolução N° 368/2006, e também pela Resolução N° 402/2008, a qual estabelece aos órgãos estaduais e municipais o prazo até dezembro de 2010 para adequação dos cemitérios existentes, ambas as resoluções são do CONAMA.

Portanto, estudos aplicados à caracterização do meio físico são considerados de extrema importância para avaliações dos resíduos no subsolo, seus fluxos e seus impactos nos seres vivos e sociedade civil.

Na cidade de Santa Maria, Garcia (2004) realizou um estudo, no qual localizou e caracterizou seis cemitérios existentes na folha de Santa Maria. Estudos com relação a impactos ambientais nos cemitérios são recentes no Brasil.

## 2.4 Caracterização dos Sistemas de Informação Geográfica (SIG)

O geoprocessamento pode ser entendido como sendo a utilização de técnicas matemáticas e computacionais para tratar dados obtidos de objetos ou fenômenos geograficamente identificados ou extrair informações desses objetos ou fenômenos, quando eles são observados por um sistema sensor. Portanto, o geoprocessamento tem sido empregado em diversas áreas da Ciência, dentre as quais podem-se citar a Cartografia, Geografia, Agricultura e Floresta, Geologia e Meio Ambiente. Também tem contribuído para estudos de planejamento urbano e rural, meios de transporte, comunicação e energia. As ferramentas utilizadas para realizar o geoprocessamento compõem um conjunto denominado Sistema de Informação Geográfica (SIG) (MOREIRA, 2003).

Segundo Loch (2006) o SIG é uma ferramenta que oferece a possibilidade de integrar os dados de diferentes fontes e tipos, assim como sua manipulação. As operações de análise espacial e a possibilidade de visualização dos dados em qualquer tempo, durante todo o processo, fizeram do SIG um poderoso aliado tanto para análises espaciais como para tomada de decisões.

Um SIG, segundo Moreira (2003) apresenta duas características principais:

- Permite inserir e integrar, numa única base de dados (banco de dados), informações espaciais provenientes de diversas fontes, como: cartografia, imagem de satélites, dados censitários, dados de cadastro rural e urbano, dados de redes e de MNT (Modelo Numérico de Terreno).
- Oferece mecanismo para combinar várias informações através de algoritmos de manipulação e análise, bem como de consulta, recuperação, visualização e plotagem do conteúdo dessa base de dados georreferenciados.

Os SIGs comportam o manuseio de uma quantidade grande de informações espacializadas e que são adequados para a atualização de informações de caráter dinâmico, tais como aquelas relacionadas ao desenvolvimento urbano (GIASSON *et al.*, 2006). O principal problema de regionalização funcional de um território urbano é a seleção de áreas homogêneas em função de suas condições naturais e uso econômico para fins de planejamento de uso e manejo racional.

Segundo o mesmo autor, para o desenvolvimento de uma base de dados em ambiente SIG, para usar na seleção de áreas e regionalização urbana é necessário

o desenvolvimento de base de dados contendo um complexo de mapas, apresentando informações sobre tipo de terra quanto a sua funcionalidade (separando zonas industriais, zonas urbanizadas, áreas de recreação e reservas), a aptidão das terras para cada tipo de uso urbano, a classificação do nível da atividade econômica relacionada à engenharia, a proporção de várias zonas funcionais nas redondezas de complexos naturais e, ainda informações sobre as condições dos componentes naturais (solos, relevo, geologia, vegetação, águas subterrâneas, águas superficiais e ar).

Giasson (2006) afirma que baseado na análise dos mapas desta base de dados pode-se desenvolver mapas das áreas sujeitas a efeitos negativos relacionados a diversas atividades urbanas. Estes mapas são úteis para um reconhecimento detalhado dos impactos antrópicos nos sistemas naturais e na qualidade dos sistemas urbanos, servindo como subsídio para a tomada de decisão para o planejamento de obras civis, na melhoria do território, na determinação da ordem de prioridade de obras e no desenvolvimento de conjuntos de medidas de conservação e proteção.

A forma mais simples de criar estes mapas dinâmicos é o desenvolvimento de um SIG, (GIASSON *et al.*, 2006), nos quais, deve-se incluir minimamente os seguintes planos de informação:

- Mapa topográfico detalhado ou modelo numérico do terreno;
- Mapa de hidrografia;
- Mapa de solos;
- Mapa geológico;
- Mapa da regionalização funcional (tipos de usos urbanos);
- Mapas de poluição dos ambientes naturais (mapas individuais para cada contaminante);
- Mapa de Zonas mais susceptíveis a diversos tipos de alteração;
- Mapas de zonas prioritárias para conservação e áreas mais críticas para preservação.

O SIG utilizado nesta pesquisa foi o *Spring 4.2*. O *software Spring* (Sistema para Processamento de informações Georreferenciadas) é um banco de dados geográfico de segunda geração, gratuito, desenvolvido pelo Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE).



O *Spring* unifica o tratamento de imagens de Sensoriamento Remoto (ópticas e microondas), mapas temáticos, mapas cadastrais, redes e modelos numéricos de terreno (MOREIRA, 2003).

O *Spring* apresenta as seguintes características:

- Opera como um banco de dados geográfico sem fronteiras e suporta grande volume de dados (sem limitações de escala, projeção e fuso), mantendo a identidade dos objetos geográficos ao longo de todo banco;
- Administra tanto dados vetoriais como dados matriciais (raster), e realiza a integração de dados de sensoriamento remoto num SIG;
- Possibilita um ambiente de trabalho amigável e poderoso, por meio da combinação de menus e janelas com uma linguagem espacial facilmente programável pelo usuário (LEGAL – Linguagem Espaço-Geográfica baseada em Álgebra);
- Consegue escalonabilidade completa, isto é, ser capaz de operar com toda a sua funcionalidade em ambientes que variem desde microcomputadores a estações de trabalho de alto desempenho.

Segundo Camponogara (2006), um SIG pode ser utilizado em estudos relativos ao meio ambiente e recursos naturais, na pesquisa de previsão de determinados fenômenos ou no apoio a decisões de planejamento, considerando a concepção de que os dados armazenados representam um modelo do mundo real. Entretanto, para que os elementos básicos de um determinado SIG possam ser utilizados de forma eficiente, é de fundamental importância que os profissionais ou responsáveis pelo projeto, sejam pessoas adequadamente capacitadas e com visão do contexto global e do sistema.

## **2.5 Condutividade Hidráulica**

A condutividade hidráulica ( $k$  - permeabilidade) é a propriedade que o solo apresenta de permitir o escoamento da água através dele (CAPUTO, 1988). Para Guiguer (2000) a condutividade hidráulica é uma medida da habilidade do solo em transportar fluído, considerando suas propriedades.

O processo de infiltração da água no solo é controlado pela condutividade hidráulica, está relacionada à quantidade de líquido que se desloca nos vazios do solo. Esta percolação muitas vezes é prejudicial, pois resulta em uma série de

problemas práticos, tais como: erosão interna em taludes, drenagem, rebaixamento do nível d'água, instabilidade em escavações e contaminação do solo e do lençol freático por líquidos poluentes.

A determinação da condutividade hidráulica é baseada na lei experimental do Engenheiro Francês Henry Darcy, proposta em 1856, a qual verificou que a vazão da água é expressa pela equação 2.1.

$$Q = k (h/L) A \quad (2.1)$$

Na prática a definição do  $k$ , partiu da observação da percolação da água através de uma amostra de solo de comprimento "L" e área "A", a partir de dois reservatórios de nível constante, sendo "h" a diferença de cota entre ambos. Os resultados indicaram que a velocidade de percolação  $v = Q/A$  é proporcional ao gradiente hidráulico  $i = h/L$ .

O coeficiente de condutividade hidráulica da Lei de Darcy depende das propriedades dos poros do solo e também das propriedades do fluido permeante.

A Tabela 2.1 apresenta valores típicos do coeficiente de permeabilidade (médios) em função dos materiais (solos arenosos e argilosos). Consideram-se solos permeáveis, aqueles que apresentam permeabilidade superior a  $10^{-7}$  m/s. Os demais solos são impermeáveis (SOUZA PINTO, 2002).

Tabela 2.1 – Valores típicos do coeficiente de permeabilidade

	Permeabilidade	Tipo de solo	K (m/s)
Solos permeáveis	Alta	Pedregulhos	$> 10^{-3}$
	Alta	Areias	$10^{-3}$ a $10^{-5}$
	Baixa	Siltes e argilas	$10^{-5}$ a $10^{-7}$
Solos impermeáveis	Muito baixa	Argila	$10^{-7}$ a $10^{-9}$
	Baixíssima	Argila	$< 10^{-9}$

A determinação do coeficiente de condutividade hidráulica pode ser feita através de ensaios de laboratório e de campo (in situ). Os ensaios de condutividade hidráulica realizados em laboratório, com equipamentos denominados

permeâmetros são mais utilizados na avaliação de solos compactados durante fases de projeto, devido aos baixos custos comparados com os ensaios de campo. Os resultados dos ensaios de laboratório ajudam na seleção de materiais, normalmente mais indicados como camada impermeabilizante de fundações em aterros sanitários.

Os ensaios de campo (*in situ*) têm como objetivo determinar a condutividade hidráulica de solos nas condições naturais. Sua grande vantagem é poder analisar um volume de solo maior, fornecendo valores de condutividade hidráulica que considerem as variações locais, além disso, podem eliminar os problemas de amolgamento das amostras indeformadas e a dificuldade de amostragem para solos arenosos (PINHEIRO, 2002).

Os principais ensaios de campo descritos na literatura são: ensaio de bombeamento, ensaio de tubo aberto, ensaio com permeâmetro de Guelph, ensaio em infiltrômetro de anel, ensaio de tipo cava infiltração e ensaio com piezômetro (PINTO, 2005).

Em função do método de execução os ensaios podem ser classificados em: ensaio de carga constante, ensaio de carga variável e ensaio de vazão constante.

Segundo Tavenas *et al.* (1986) existem dois tipos de piezômetros amplamente empregados: piezômetro cravado e piezômetro escavado. Nesta pesquisa foram realizados ensaios de campo com piezômetro do tipo escavado (Figura 2.2) e através do método carga variável.

Bortoli (1999), Pinheiro (2000) e Pinto (2005) descrevem a execução de ensaios de condutividade hidráulica com piezômetro escavado. Este ensaio requer basicamente: tubos de PVC com diâmetro de 32 a 40mm, visando permitir o aumento do comprimento do tubo de suporte, até atingir a profundidade de ensaio (cada extensão é realizada por meio de conexões rosqueadas e vedadas); uso de bentonita para a execução do selo; areia para execução do filtro (areia de granulometria grossa recomenda-se que seja usada uma camada adicional de alguns centímetros de areia fina sobre a camada de areia grossa, para evitar que a bentonita provoque colmatção do filtro); bureta graduada para a medição do volume de água infiltrado; e trados e hastes para a execução do furo de sondagem. Usa-se água para saturar o terreno.

A equação básica para a determinação do coeficiente de condutividade hidráulica a partir dos resultados de ensaios com piezômetros foi apresentada por Hvorslev (1951) apud Pinto (2005). Esta equação requer o conhecimento da relação

entre a carga hidráulica aplicada no interior do furo e a vazão medida durante o ensaio, além do fator forma da ponteira. Esse fator forma  $F$  é uma função da geometria do piezômetro e do tipo de ensaio (com aplicação de carga hidráulica constante ou variável). A utilização desta equação também pressupõe que o solo seja homogêneo e isotrópico. Para uma vazão  $Q$  (vazão estabilizada) no piezômetro, sob uma carga hidráulica constante  $h$ , Hvorslev (1951) apud Pinto (2005) propõe a utilização da equação 2.2.

$$k = \frac{Q}{FH} \quad (2.2)$$

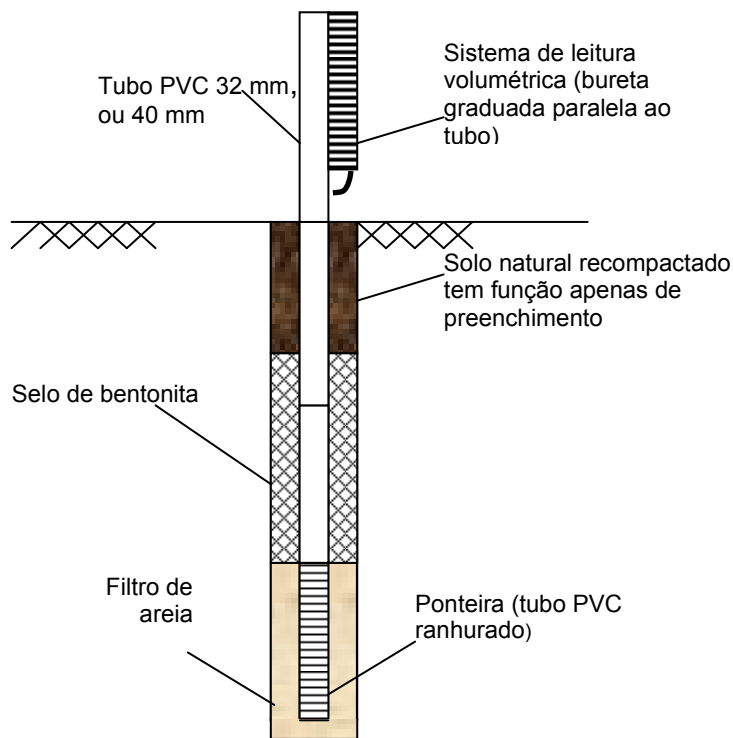


Figura 2.2 – Esquema do piezômetro escavado (Bortoli, 1999)

Para o ensaio de carga hidráulica variável, Hvorslev (1951) apud Pinto (2005) apresenta a equação 2.3.

$$k = \frac{d^2 \left[ \ln \left( \frac{H_1}{H_2} \right) \right]}{F(t_2 - t_1)} \quad (2.3)$$

Onde:  $d$  = diâmetro do tubo

$H_1$  e  $H_2$  = as cargas hidráulicas anotadas nos tempos  $t_1$  e  $t_2$  respectivamente

$F$  = fator de forma;

O fator de forma  $F$  tem sido objeto de discussões na literatura geotécnica. Segundo Pinto (2005) vários autores propuseram formulações para a sua obtenção. A Figura 2.3 apresenta curvas da normalização do fator  $F$  pelo diâmetro do furo de sondagem levando em consideração a geometria do ensaio.

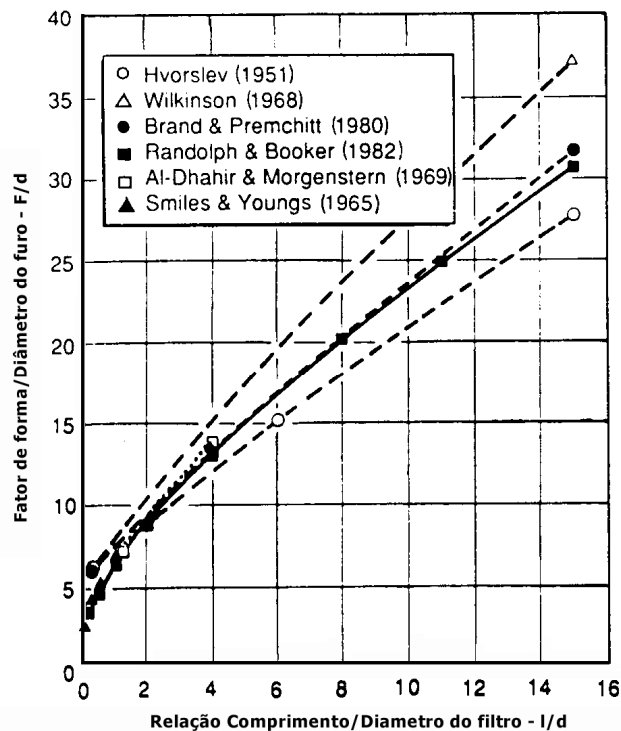


Figura 2.3 – Proposição para o fator  $F$  Tavenas *et al.* (1990).

A equação 2.4 introduz um parâmetro “ $m$ ” que quantifica as diferenças entre as diversas modificações propostas para o fator  $F$ .

$$F = \frac{2m\pi L}{\ln \left[ \frac{mL}{D} + \sqrt{1 + \left( \frac{mL}{D} \right)^2} \right]} \quad (2.4)$$

Onde:  $L$  = altura do filtro granular

$D$  = diâmetro do filtro granular

As equações originalmente desenvolvidas por Hvorslev (1951) apud Pinto (2005) para a interpretação de ensaios com piezômetros correspondiam à condição de solo abaixo do nível de água. A utilização para o solo não saturado foi sugerida por Daniel (1989), considerando  $H$  como a diferença de altura entre o nível da água dentro do piezômetro e a metade da altura do filtro.

Nesta pesquisa foi utilizado o parâmetro  $m = 1$  proposto por Hvorslev (1951) apud Pinto (2005), nos cálculos dos ensaios com piezômetros escavados.

Pinheiro (2004) realizou ensaios de condutividade hidráulica para caracterizar algumas das unidades geotécnicas do município de Santa Maria – RS, dentre elas: a Formação Santa Maria que é constituída de dois Membros (Passo das Tropas e Alemoa), a Formação Botucatu, a Formação Caturrita, as quais serão apresentadas nesta pesquisa.

## 2.6 Superfície Potenciométrica

Segundo Heath (1983) a água subterrânea ocorre em aquíferos sob duas diferentes condições (Figura 2.5). Onde a água só parcialmente preenche o aquífero, a superfície superior da zona saturada é livre para subir ou descer, os aquíferos são denominados não-confinados e/ou aquíferos freáticos. Quando a água completamente preenche o aquífero que está sobreposto por uma camada confinante, o aquífero é denominado confinado e/ou artesianos.

Segundo Guiguer (2000) lençol freático ou nível freático é a superfície por onde a pressão da água nos vazios é igual à pressão atmosférica local. Ainda descreve que a elevação do lençol freático flutua naturalmente durante o ano todo, fazendo parte de um ciclo hidrológico, sendo esta flutuação variável desde alguns centímetros até alguns metros, dependendo da área.

Heath (1983) afirma que o conhecimento da inclinação da superfície freática em aquíferos é muito importante porque indica a direção do movimento da água subterrânea. A posição e a inclinação da superfície freática é determinada medindo-se a posição do nível da água em poços de observação ou tubulação, a qual deve ser determinada relativamente a um plano *datum* que seja comum a todos os poços. O *datum* mais comumente usado é o *National Geodetic Vertical Datum de 1929*,

também comumente referido como *nível do mar*. Nesta pesquisa será usado o Porto de Imbituba, no Estado de Santa Catarina como nível do mar.

A movimentação da água no solo ocorre sempre que existirem diferenças de potencial hidráulico total entre diferentes pontos. Esse movimento dá-se no sentido do decréscimo do potencial, isto é, a água sempre se move de pontos de maior potencial para pontos de menor potencial. Esta diferença de potencial é denominada perda de carga (AZEVEDO *et al.*, 1998).

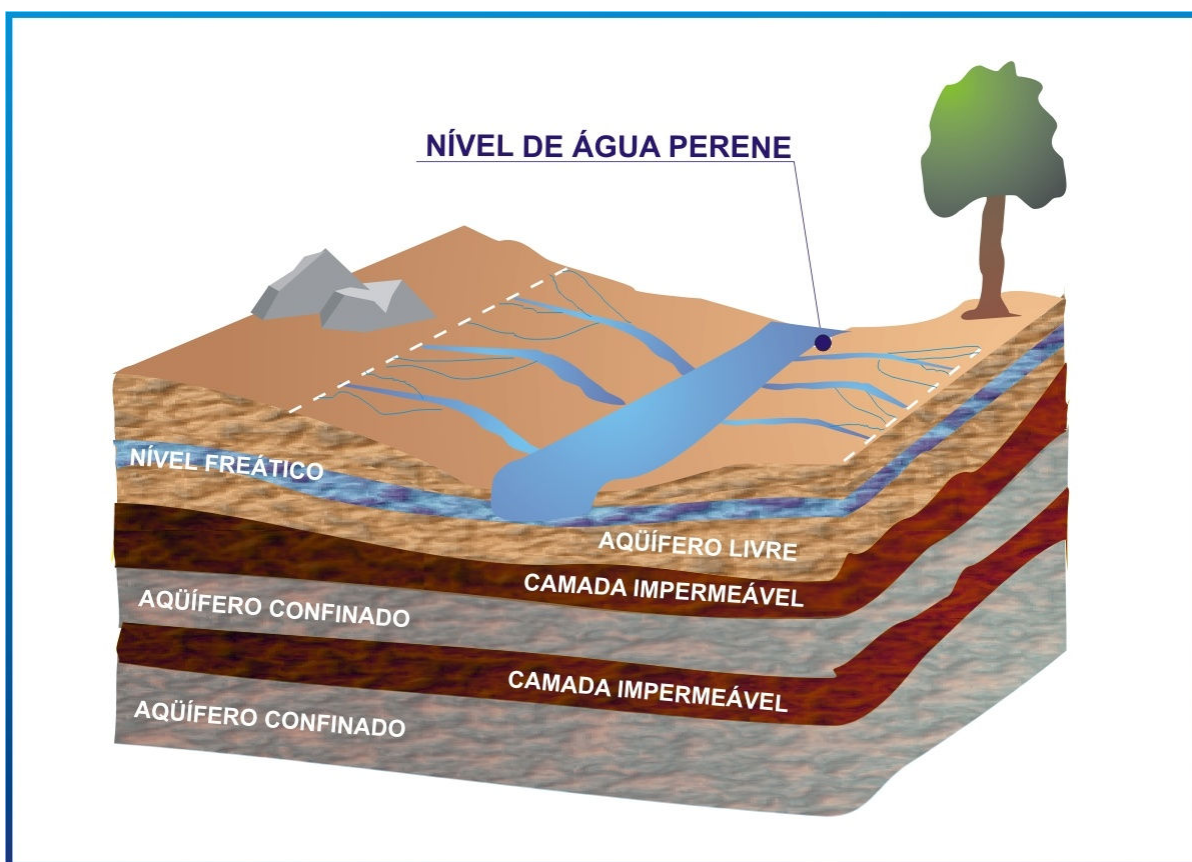


Figura 2.4 - Tipos de aquíferos.  
Fonte: <http://www.oaquiferoguarani.com.br>

Quando em cada ponto do fluido, o potencial hidráulico possuir um valor determinado pode-se, conhecendo o nível piezométrico em vários pontos de um determinado meio, construir mapas de isopotencial hidráulico, denominados mapas piezométricos ou potenciométricos, que mostram a forma e a elevação de uma superfície potenciométrica (SP), (AZEVEDO *et al.*, 1998).

Para o mesmo autor, o traçado dos mapas potenciométricos é semelhante aos dos mapas topográficos, onde as curvas de nível correspondem as isopiezas ou

linhas equipotenciais. Essas linhas conectam pontos de igual carga e representam a altura da superfície freática, acima de um *datum*. Uma vez delineadas as equipotenciais o sentido do fluxo passa a ser conhecido, sendo definido pelas linhas de fluxo, as quais mostram os trajetos idealizados seguidos pelas partículas de água como elas se movem através do aquífero.

Devido à água subterrânea mover-se no sentido do maior para o menor potencial hidráulico, as linhas de fluxo em aquíferos são perpendiculares as linhas equipotenciais, ou seja, linhas de fluxo cortam linhas equipotenciais em ângulos retos. Segundo Heath (1983), esse conjunto de linhas, equipotenciais e de fluxo, é denominado redes de fluxo de águas subterrâneas.

A partir dos mapas piezométricos, é possível estabelecer-se o padrão de fluxo subterrâneo, determinar os limites e divisores da bacia hidrogeológica, definir os gradientes hidráulicos, as perdas de carga, as áreas de recarga e descarga da bacia e estimar-se a quantidade de água em trânsito. O padrão do fluxo subterrâneo expressa o comportamento geral do escoamento subterrâneo, evidenciado pelas redes de fluxo.

O conhecimento do nível freático é importante, pois através dele pode-se verificar o sentido do fluxo da água subterrânea, para indicar locais mais favoráveis à instalação de empreendimentos de alto potencial poluidor nos municípios. Cassanego (2007) avaliou a variação do nível do lençol freático em quatro postos de combustível no município de Santa Maria – RS e Cassanego *et al.* (2008) caracterizaram os fluxos subterrâneos na porção central de cidade de Santa Maria.

## **2.7 Vulnerabilidade natural dos aquíferos**

As águas subterrâneas são aquelas que se encontram sob a superfície da Terra, preenchendo os espaços vazios existentes entre os grãos do solo, rochas e fissuras (rachaduras, quebras, descontinuidades e espaços vazios), (BRASIL, 2007b).

De acordo com a Resolução Nº 15 do Conselho Nacional de Recursos Hídricos (2001) "Aquífero é o corpo hidrogeológico com capacidade de acumular e transmitir água através dos seus poros, fissuras ou espaços resultantes da dissolução e carreamento de materiais rochosos".



A origem da maior parte da água subterrânea é devido a chuva que infiltra (diretamente ou indiretamente) na superfície do solo (FOSTER *et al.*, 2006). Como consequência, as atividades humanas que se desenvolvem na superfície podem ameaçar a qualidade da água subterrânea.

Para Silvério da Silva *et al.* (2004), os aquíferos podem representar zonas de recarga e de descarga pertencentes a uma ou mais bacias hidrográficas, sendo que a recarga direta do aquífero depende da quantidade de chuvas que ocorrem numa determinada região.

Segundo Gregoraschuk (2001) a infiltração para os aquíferos profundos é da ordem de 1 a 3% do total das precipitações pluviométricas anuais para as reservas renováveis. Já Hausman (1995) estimou uma recarga da ordem de 3 a 6% das precipitações para a região central do estado do Rio Grande do Sul. Regiões de muita chuva são potencialmente áreas de recarga, sendo que os pontos principais são os locais de maior capacidade de infiltração e os afloramentos de camadas mais permeáveis.

A conservação das áreas de recarga é essencial para garantir a reposição da água e a recuperação dos níveis dos lençóis subterrâneos, como também para evitar a percolação de contaminantes que venham a degradar a qualidade da água dos aquíferos. Para o uso sustentável da água subterrânea é importante identificar-se as áreas de recarga dos aquíferos (CABRAL *et al.*, 2001).

Segundo Foster *et al.* (2006) a poluição dos aquíferos ocorre nos pontos em que a carga contaminante gerada no subsolo por emissões e lixiviados produzidos pela atividade humana, provenientes das atividades urbanas, industriais, agrícolas e de mineração, são inadequadamente controladas, e em certos componentes excede a capacidade de atenuação natural dos solos e das camadas de cobertura. Portanto, destaca-se a importância dos perfis naturais de subsolo para atenuarem ativamente muitos poluentes da água e há muito têm sido considerados potencialmente eficazes para o despejo seguro dos excrementos humanos e das águas residuais domésticas. No entanto, nem todos os perfis do subsolo e camadas subjacentes são igualmente eficazes na atenuação dos contaminantes, e os aquíferos serão particularmente vulneráveis à poluição nos lugares onde há, por exemplo, rochas muito fraturadas.

O risco potencial de um determinado aquífero ser contaminado está relacionado ao tipo de contaminante e suas características, como: a litologia (tipo de

rocha), a hidrogeologia e os gradientes hidráulicos (diferença de pressão entre dois pontos), entre outros. A maior ou menor susceptibilidade de um aquífero à contaminação e poluição é chamada de vulnerabilidade (BRASIL, 2007).

De acordo com Foster *et al.* (2006), a expressão “vulnerabilidade do aquífero à contaminação” busca representar a sensibilidade de um aquífero aos efeitos adversos de uma carga contaminante a ele imposta. Os mecanismos de recarga da água subterrânea e a capacidade natural de atenuação do contaminante no solo e no subsolo variam amplamente segundo as condições geológicas próximas da superfície do terreno.

Em hidrogeologia o conceito de vulnerabilidade começou a ser usado intuitivamente a partir da década de 1970, na França e de maneira mais ampla na década de 1980. Segundo Foster & Hirata (1987) uma definição importante, seria considerar a vulnerabilidade do aquífero à contaminação como um conjunto de características intrínsecas dos estratos que separam o aquífero saturado da superfície do solo, o que determina a suscetibilidade a sofrer os efeitos adversos de uma carga contaminante aplicada na superfície.

Do mesmo modo, Foster *et al.* (1988), definem o perigo de contaminação da água subterrânea, como sendo a probabilidade de que a água subterrânea na parte superior de um aquífero atinja níveis inaceitáveis de contaminação, em decorrência das atividades que se realizam na cobertura imediata da superfície do solo.

Segundo Frantz (2005), é importante lembrar que o fato de existir um aquífero com elevada vulnerabilidade, não significa que este esteja contaminado, mas sim que esta área é de risco. Sua contaminação ou não vai depender das atividades antrópicas que estão sobre ele localizadas, ou seja, ele pode ser altamente vulnerável, mas correr baixo risco de ser contaminado, por estar localizado numa área distante de fontes contaminantes, principalmente de presença humana e seus resíduos sólidos e líquidos (lixões, cemitérios, distritos industriais, postos de combustíveis, entre outros).

A contaminação dos solos e/ou formações superficiais, além de estar relacionada à disposição de resíduos ou substâncias potencialmente contaminantes depende também de fatores naturais, intrínsecos, bem como de seu grau de atenuação natural, em função da quantidade de fração argila no solo, da sua capacidade de troca de cátions (CTC), da presença de óxidos/hidróxidos e/ou colóides de ferro, manganês e/ou alumínio, e ainda, da quantidade de matéria

orgânica dos solos, dos tipos e da quantidade de organismos biodegradantes, bem como da presença e eficiência da cobertura vegetal na infiltração das chuvas (Silvério da Silva *et al.*, 2004).

Existem vários métodos para avaliar ou mapear a vulnerabilidade natural de aquíferos quanto ao risco de contaminação. Dentre eles destacam-se entre os mais utilizados o modelo “DRASTIC” de Aller *et al.* (1985), que se constitui num sistema padronizado a partir de dados decodificados em planos de informações e é um dos índices de vulnerabilidade mais difundidos atualmente. Já o modelo “GOD” de Foster e Hirata (1993) e Foster *et al.* (2006) trata da vulnerabilidade geral.

Nesta pesquisa será aplicada a metodologia “GOD”. Esta metodologia consiste no mapeamento da vulnerabilidade de aquíferos e na definição de áreas de maior risco, a partir do reconhecimento de atividades humanas que oferecem perigo de contaminação as águas subterrâneas.

Os componentes da vulnerabilidade de um aquífero não são diretamente mensuráveis, mas sim, determinados por meio de combinações de fatores. Dados referentes a vários fatores não podem ser facilmente estimados ou não estão disponíveis, o que obriga a uma simplificação no número de parâmetros requeridos (FRANTZ, 2005). Portanto, a metodologia “GOD” reduz o número desses fatores para apenas três:

- Grau de confinamento hidráulico (**G**);
- Ocorrência do substrato litológico (**O**);
- Distância da superfície do terreno ao nível da água subterrânea (nível estático) (**D**).

Trabalhos anteriores de Chaves (2007) e Frantz (2005) utilizaram este método nas regiões de São Luiz Gonzaga e Sant’ana do Livramento no estado do Rio Grande do Sul e são uma contribuição ao conhecimento dos aquíferos produzidos pelo grupo de pesquisa do Laboratório de Hidrogeologia (LABHIDROGEO) da UFSM. Já Maziero (2005) e Camponogara (2006) utilizaram o método DRASTIC no Sistema Aquífero Guarani no Estado do Rio grande do Sul.

## 3 MÉTODOS

Neste capítulo são descritos os procedimentos adotados para o desenvolvimento desta pesquisa.

### 3.1 Estudo de escritório

O estudo de escritório baseou-se na revisão bibliográfica, em estudos anteriores desenvolvidos na região de Santa Maria, na digitalização da carta das unidades geotécnicas da Folha de Santa Maria de Maciel Filho (1990) escala de 1:25.000, na identificação e caracterização das unidades geotécnicas, na elaboração de um banco de dados dos poços tubulares de abastecimento da água subterrânea cadastrados no site da Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais (CPRM) no: Sistema de Informação da Águas Subterrâneas (SIAGAS), na espacialização dos ensaios de condutividade hidráulica e dos poços, na elaboração de cartogramas do índice de vulnerabilidade da água subterrânea e da superfície potenciométrica indicativa dos fluxos subterrâneos e na espacialização das fontes potenciais de poluição urbana.

### 3.2 Digitalização da Carta das Unidades Geotécnicas de Santa Maria - RS

Para a digitalização e confecção do mapa base utilizou-se os seguintes mapas e cartas:

- Carta das Unidades Geotécnicas da Folha de Santa Maria – RS. Maciel Filho (1990), Imprensa Universitária de Santa Maria, Escala 1:25.000.
- Folha de Santa Maria – SH.22-V-C-IV/1-SE, MI-2965/1-SE. Editado pela Diretoria do Serviço Geográfico do Brasil, Região Sul do Brasil, 1980, Escala 1:25.000.
- Mapa da malha viária do município de Santa Maria, Auto Cad – Prefeitura Municipal de Santa Maria, disponível em CD-ROM (2000).

A carta das unidades geotécnicas e a folha de Santa Maria foram transferidas do meio analógico para o meio digital *raster* via scanner. No aplicativo *Impima* do Sistema de Informações Geográficas (SIG) *Spring* fez-se a mudança do arquivo

TIFF para GRIB e no programa *Spring* 4.2, realizou-se o registro (georreferenciamento), e após a digitalização dos seguintes planos de informação: unidades geotécnicas e redes de drenagem. Posteriormente, foi realizada uma sobreposição do mapa base com o mapa da malha viária do município de Santa Maria, a edição final foi realizada no CorelDRAW 12.

### **3.3 Identificação e caracterização das Unidades Geotécnicas**

Os ensaios de laboratório realizados nesta pesquisa foram os ensaios de caracterização das unidades geotécnicas, a partir de amostras deformadas de depósitos e rochas sedimentares aflorantes no município de Santa Maria. Os ensaios de caracterização foram: determinação da massa específica real dos grãos (NBR 6508/84), limite de plasticidade (NBR 7180/84), limite de liquidez (NBR 6459/84) e análise granulométrica por peneiramento e sedimentação (NBR 7181/84).

As análises de caracterização foram realizadas no Laboratório de Materiais de Construção Civil (LMCC) - UFSM. As amostras para a realização dos ensaios de laboratório foram coletadas na mesma profundidade em que foram realizados os ensaios de condutividade hidráulica.

Foram ensaiadas dezenove amostras, três de Depósitos Fluviais de Várzea (DFL1, DFL2 e DFL3), duas de Depósitos Coluvionares (COL1 e COL2), duas da Formação Botucatu (BOT1 e BOT2), duas da Formação Caturrita (CAT1 e CAT2), cinco da Formação Santa Maria Membro Alemoa (SMA1, SMA2, SMA3, SMA4 e SMA5), e cinco da Formação Santa Maria Membro Passo das Tropas (SMP1, SMP2, SMP3, SMP5 e SMP6).

Os ensaios de campo da condutividade hidráulica foram definidos com base na carta das Unidades Geotécnicas de Maciel Filho (1990), área de estudo desta pesquisa. Primeiramente buscou-se identificar as formações geológicas, verificando se as características morfológicas e geológicas são semelhantes às descritas nos levantamentos, mapas e cartas consultadas no estudo de escritório.

Ao verificar a concordância com os estudos de escritório, foram escolhidos perfis em afloramentos de rochas sedimentares que melhor descrevem as características geológicas das formações, com preferência em locais de fácil acesso.

Os ensaios de campo tiveram como objetivo determinar a condutividade hidráulica das rochas e depósitos naturais. Estes ensaios têm como grande

vantagem envolverem uma massa de solo muito maior, portanto, levam em consideração a heterogeneidade e anisotropia. Evita-se desta forma o possível amolgamento quando da retirada de amostras e a grande dificuldade em manter a estrutura dos solos arenosos.

Os ensaios de condutividade hidráulica in situ realizados nesta pesquisa foram com a técnica do piezômetro escavado descrito por Bortoli (1999). O ensaio com a técnica do piezômetro consistiu em executar um furo de sondagem, com trado manual, de profundidade variável e diâmetro de aproximadamente 65mm (D), em seguida é descido uma tubulação de PVC de 30mm de diâmetro e comprimento variável em função da profundidade desejada para o ensaio. Na parte final do tubo, este apresenta ranhuras de 2 em 2 cm (pequenos cortes para percolação de água) com comprimento (L) de 15cm e 30cm. Preencheu-se a folga entre a parede do furo e o trecho ranhurado com areia de pré-filtro. Acima do trecho ranhurado executa-se uma camada de selante (bentonita mais água) com no mínimo 30cm de espessura, e acima da bentonita quando necessário preenche-se o restante do furo com solo. Uma bureta graduada (diâmetro de 15mm) é conectada a um tubo acima da superfície do solo, auxiliando na leitura do volume de água infiltrada no solo. Preenche-se o interior da bureta com água, a água começa a descer e infiltrar no solo. É estabelecido um intervalo de tempo para as leituras, esse intervalo de tempo varia de acordo com a capacidade de infiltração do solo, ou seja, este ensaio consiste na medição volume de água que infiltra no solo, em um tempo pré-fixado. A variação de uma altura de água  $h_1$  para um nível inferior  $h_2$  na bureta é a carga hidráulica variável do ensaio. Pode-se observar nas Figuras 3.1 e 3.2 a execução dos ensaios de campo (montagem e instalação do piezômetro).



Figura 3.1 – Montagem do piezômetro.



Figura 3.2 – Piezômetro instalado no campo.

São realizadas em média cinco repetições para cada ensaio, posteriormente é calculada a média das repetições. Para o cálculo da condutividade hidráulica foi adotado a equação 2.3 (carga variável) e fator de forma (F) equação 2.4.

### **3.4 Cadastro dos poços tubulares**

Para realizar o cadastramento dos poços tubulares do município de Santa Maria e obter-se as informações dos mesmos, utilizou-se as referências disponibilizadas na página eletrônica <http://www.cprm.gov.br/bases/siagas>, cadastro de usuários de poços subterrâneos SIAGAS do ano de 2008.

Com o uso do programa *Excel* elaborou-se um banco de dados dos poços tubulares, levando-se em consideração somente os poços inseridos na área de abrangência da carta das unidades geotécnicas de Maciel Filho (1990) na escala de 1:25.000, ou seja, dentro a figura formada pelas coordenadas no Sistema de Projeção Universal de Mercator: UTM E (221.600 a 234.000) e UTM N (6.706.000 a 6.720.00) aproximadamente. Para obter-se as coordenadas em Sistema UTM, utilizou-se a carta topográfica do serviço militar SH. 22.V.C.IV/1-SE Santa Maria MI-2965/1-SE, escala 1:25.000. No banco de dados (ANEXO A) constam as seguintes informações dos poços: código do poço, latitude, longitude, UTM E, UTM N, localização, cota do terreno, nível estático (N.E.), profundidade final, litologia, superfície potenciométrica, Grau de confinamento (**G**), Ocorrência de substrato litológico (**O**), Distância da superfície do terreno ao nível da água subterrânea (**D**), Índice de vulnerabilidade e classificação da vulnerabilidade.

A superfície potenciométrica foi obtida pela relação entre a cota altimétrica na “boca do poço” e o nível da água, estas informações também constam na página eletrônica do SIAGAS.

### **3.5 Vulnerabilidade natural do aquífero e metodologia GOD**

Foram selecionados dentro da área de estudo 36 poços tubulares, os quais apresentavam todos os parâmetros necessários para a execução do método “GOD” revisado por Foster *et al.* (2006).

A avaliação da Vulnerabilidade da água subterrânea através da metodologia **GOD** envolve três etapas, conforme figura 3.3. Esta figura representa o esquema da combinação de três valores atribuídos conforme a situação de cada um dos parâmetros descritos no método.

O grau de confinamento hidráulico (**G**) é o primeiro parâmetro avaliado na metodologia e o valor atribuído ao aquífero varia entre zero (surgente) a 1,0 (não-confinado). Sendo o valor 1,0 indicativo de maior risco de contaminação. O G, nesta pesquisa foi obtido com base na formação geológica onde localiza-se cada poço e através da análise do perfil litológico disponível dos poços cadastrados no SIAGAS.

O segundo parâmetro é a ocorrência do substrato litológico (**O**), o qual classifica as amostras quanto às características litológicas. As notas atribuídas a esse parâmetro variam de 0,4 a 1,0, sendo que 0,4 representa a situação de menor risco de contaminação e 1,0 o maior risco. Para atribuir a nota baseou-se no trabalho de Maciel Filho (1990), em suas descrições litológicas.

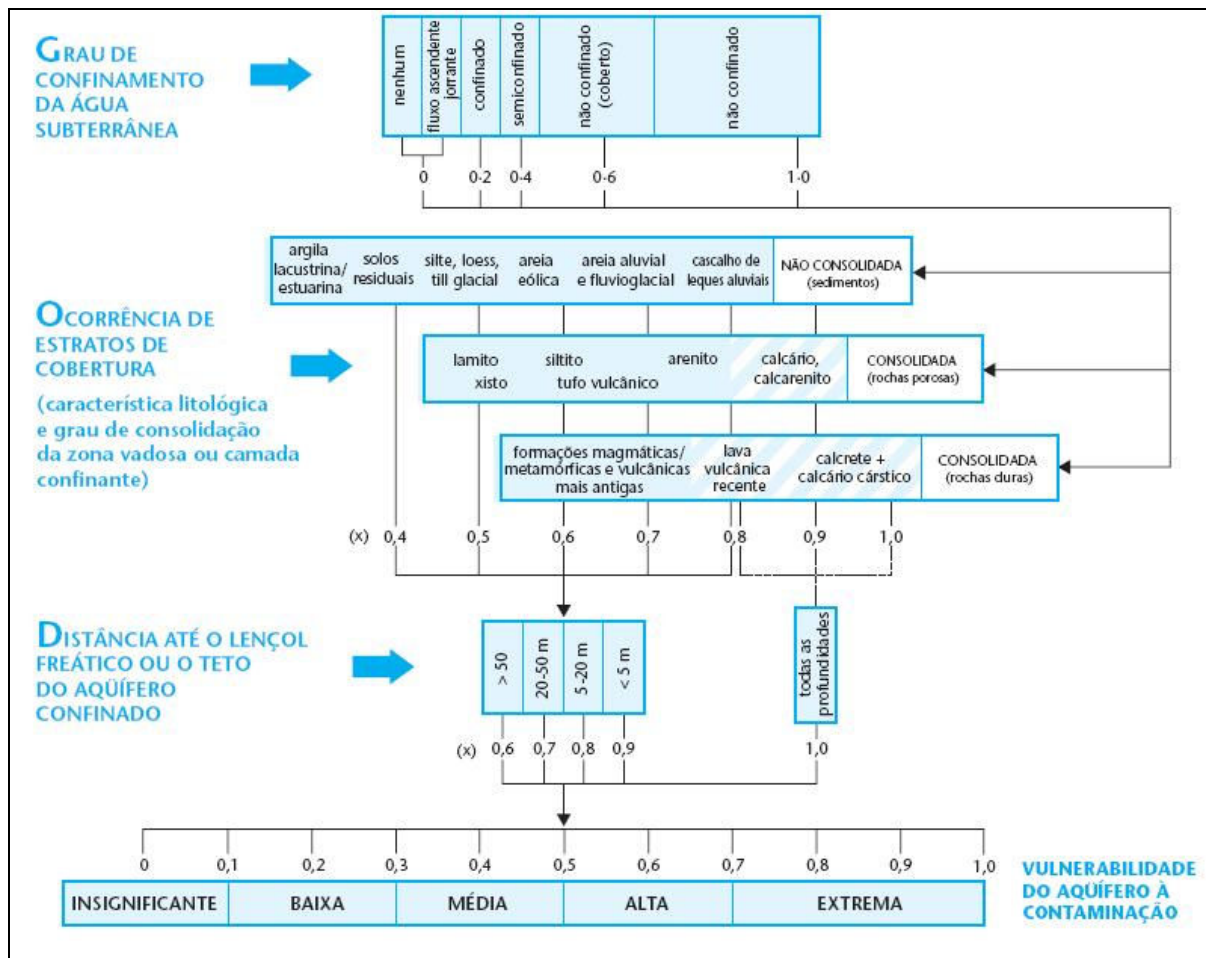


Figura 3.3 – Avaliação da vulnerabilidade, metodologia “GOD”. Fonte: Foster *et al.* (2006).



As informações geológicas de subsuperfície foram obtidas de descrições de perfis geológicos da CPRM (1994) e atualizadas no SIAGAS (2008). Também se considerou as informações do Mapa Hidrogeológico da Folha de Santa Maria (1:100.000) do ano de 1994 e do Mapa Hidrogeológico do Estado CPRM (2006).

A distância do nível da água subterrânea (**D**) é o último parâmetro, cuja nota é atribuída de acordo com o nível estático do poço, e confere valores entre 0,6 e 1,0, sendo 0,6 considerado como menor risco de contaminação (> 50m a distância ao nível de água subterrânea ou ao teto do aquífero) e 0,9 maior risco de contaminação, pois quanto mais raso menor é a espessura de rochas para o contaminante atravessar, logo maior a vulnerabilidade. O valor do nível estático foi obtido diretamente no SIAGAS, os poços que não apresentaram valores de nível estático foram descartados.

Para a obtenção do índice de vulnerabilidade foi realizado o produto entre os três valores ( $G \times O \times D$ ). Após esta fase, classificou-se o índice de vulnerabilidade de acordo com as classes de vulnerabilidades existentes na metodologia, sendo elas: Insignificante (0,0 a 0,1); Baixa (0,1 a 0,3); Média (0,3 a 0,5); Alta (0,5 a 0,7); Extrema (0,7 a 1,0) Foster *et al.* (2006).

### **3.6 Espacialização dos poços e dos ensaios de condutividade hidráulica**

Os poços tubulares foram espacializados no mapa base das unidades geotécnicas com uso das coordenadas geográficas dos poços tubulares disponíveis no Sistema de Informação da Águas Subterrâneas (SIAGAS).

Os ensaios de campo de condutividade hidráulica foram localizados e após espacializados através do “*Global Position System*” (GPS), foi adotado o datum SAD-69 Minas Gerais em coordenadas no “*Sistema Universal Transversa de Mercator*” (UTM), considerando-se como origem o Equador e o meridiano 51° Oeste de Greenwich, acrescida da quilometragem 10.000km e 500km respectivamente e como Datum Vertical Imbituba - Santa Catarina e Datum Horizontal SAD-69 Minas Gerais.

### **3.7 Confeção dos cartogramas do índice de vulnerabilidade e superfície potenciométrica**

A espacialização dos cartogramas do índice de vulnerabilidade e da superfície potenciométrica foi realizada no programa SURFER 8.0. Foram testados alguns métodos de interpolação pelo SURFER, optando-se pela *Krigagem* matemática, devido ao tipo de distribuição dos poços a serem interpolados na área avaliada.

A *Krigagem* é um método geoestatístico de malhas muito flexível que provou ser útil e popular em muitos campos, produz mapas visualmente interessantes a partir de dados irregularmente espacializados. Dentro do programa SURFER, a *Krigagem* pode ser um interpolador exato ou um interpolador suavizador dependendo dos parâmetros especificados pelo usuário. Incorpora anisotropia e tendências subjacentes de uma maneira eficiente e natural (SURFER 8.0 USER'S GUIDE, 2004).

Os cartogramas foram sobrepostos ao mapa de Santa Maria com a finalidade de facilitar ao leitor a localização dos dados espacializados. Posteriormente os planos de informação do SURFER foram importados ao programa CorelDRAW 12 para a realização da edição final.

### **3.8 Espacialização das fontes potenciais de poluição urbana**

As fontes potenciais de poluição urbana, postos de combustíveis e cemitérios, foram espacializadas no mapa base das unidades geotécnicas no programa Spring 4.2, através das coordenadas geográficas obtidas no trabalho de Garcia (2004). Segundo Garcia (2004) as coordenadas foram adquiridas à campo através do “*Global Position System*” (GPS).

Após a espacialização dos pontos potenciais realizou-se a edição final dos mapas no programa CorelDraw 12.

As áreas de depósitos de lixo foram espacializadas através de um cruzamento de dados entre a carta das unidades geotécnicas e a carta dos condicionantes à ocupação de Santa Maria de Maciel Filho (1990).

Espacializou-se também as fontes potenciais de poluição nos cartogramas de vulnerabilidade e superfície potenciométrica.

## **4 CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO**

Neste capítulo são apresentadas as características físicas da área de estudo desta pesquisa, segundo critérios geológicos, geomorfológicos, hidrográficos e hidrogeológicos, pedológicos, geotécnicos e clima e vegetação.

A cidade de Santa Maria encontra-se situada no centro geográfico do Estado do Rio Grande do Sul, entre as coordenadas geográficas 53°19'32" e 54°19'32" longitude oeste, e 29°20'28" e 30°00'16" latitude sul.

A área do município compreende aproximadamente 1.780 km<sup>2</sup>, possui uma altitude média de 113 m em relação ao nível do mar. Situa-se a aproximadamente 290 km da capital do estado Porto Alegre.

Segundo estimativa do IBGE 2007, o município possui 263.403 mil habitantes fixos e 30.000 mil habitantes flutuantes, sendo que, cerca de 95% desta população encontra-se na zona urbana.

A figura 4.1 apresenta o mapa do Brasil com a localização do Estado do Rio Grande do Sul e do município de Santa Maria.

### **4.1 Geologia**

Santa Maria apresenta seu substrato formado por rochas sedimentares, além de rochas de origem vulcânica em menor quantidade. As rochas sedimentares representam os vários ciclos deposicionais em área continental, com variações definidas pelas diferentes fácies nas seqüências de mesma idade e por trocas climáticas nas seqüências de idades diferentes (OLIVEIRA, 2004). As rochas vulcânicas formam derrames sucessivos de lavas originados durante o mesozóico que recobriu a Bacia do Paraná. As rochas mais antigas encontradas no município correspondem a um pacote de rochas sedimentares Triássicas.

Um trabalho pioneiro que serve de ponto de partida para o estudo da geologia da região, foi realizado por Bortoluzzi (1974). Maciel Filho (1977) apresenta a caracterização geotécnica das formações sedimentares de Santa Maria, o que resultou na publicação da carta das Unidades Geotécnicas de Santa Maria. A coluna

estratigráfica adotada no trabalho de Maciel Filho é a proposta por Bortoluzzi em 1974.

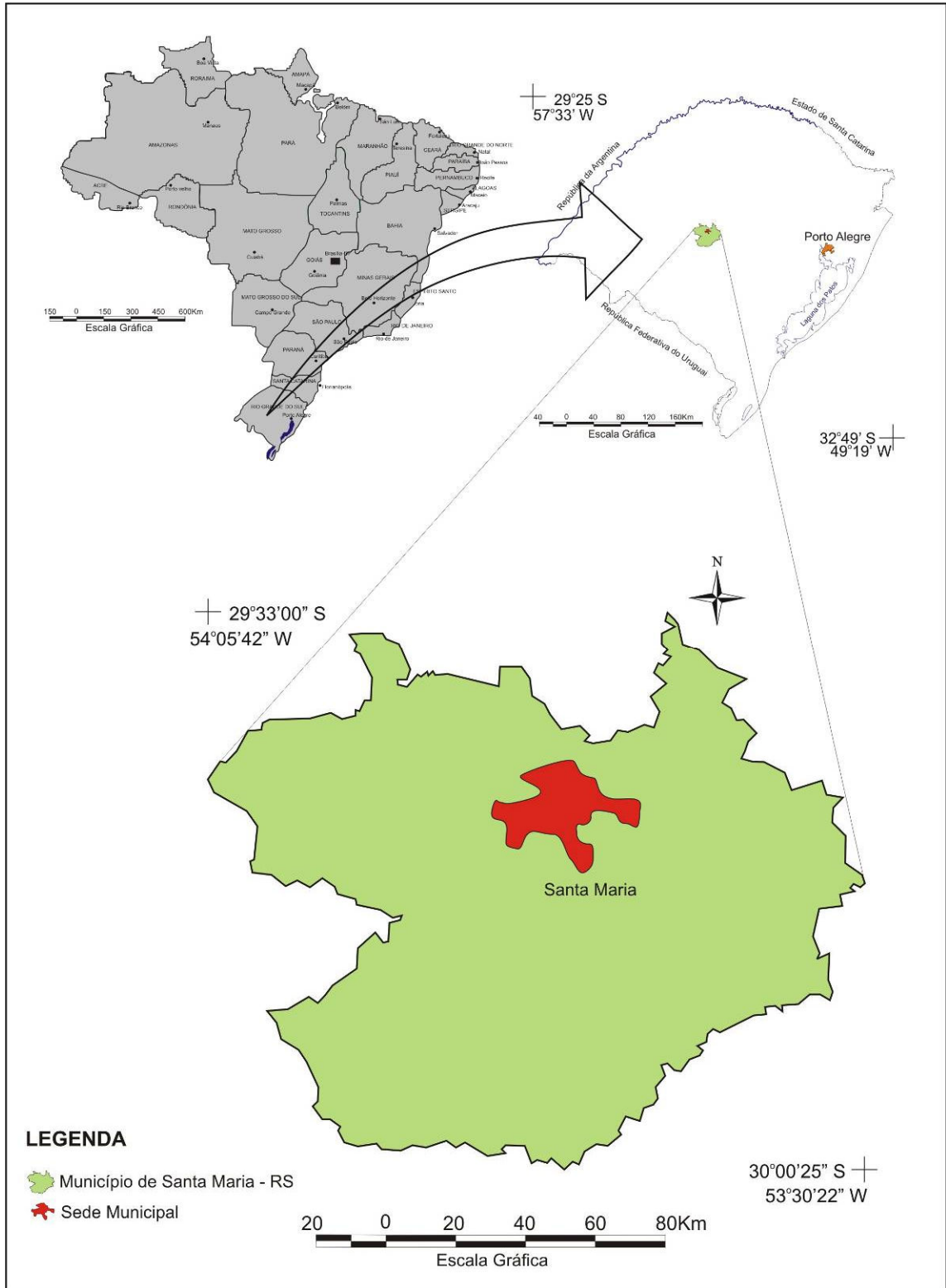


Figura 4.1 – Localização de Santa Maria no Mapa do Brasil e no Estado do Rio Grande do Sul.

As unidades estratigráficas que ocorrem em Santa Maria são as Formações: Rosário do Sul, Santa Maria, Caturrita, Botucatu e Serra Geral. A figura 4.2 apresenta o Mapa Geológico da Folha de Santa Maria – RS.

Formação Rosário do Sul – Esta formação tem pouca expressão na área de estudo, é constituída por rochas sedimentares de origem fluvial, predominantemente arenitos finos a médios (ferruginosos ou levemente calcíferos), com alta porcentagem de silte e argila (avermelhados, amarelados e esbranquiçados). São essencialmente quartzosos, com algum feldspato e mica, freqüentemente apresentam intercalações de siltitos arenosos e siltitos argilosos, possuem estratificação cruzada, acanalada ou paralela (MACIEL FILHO, 1977).

Formação Santa Maria – Maciel Filho (1990) divide a Formação Santa Maria em: arenito basal Santa Maria (Passo das Tropas) e Formação Santa Maria exceto arenito basal (Alemoa). Bortoluzzi (1974) define como Passo das Tropas membro inferior, e Alemoa como membro superior.

- Arenito basal Santa Maria (Passo das Tropas) - Arenito Grosseiro, feldspático, poroso. Em alguns pontos é conglomerático, com grânulos de quartzo e bolas de argila. Normalmente é bem estratificado, apresenta alguns locais com aspecto maciço. O feldspato aparece como pontos brancos. A cor da rocha é rosada e sua origem é fluvial (MACIEL FILHO, 1990).

- Formação Santa Maria exceto arenito basal (Alemoa) – É constituída por siltitos argilosos maciços e arenitos argilosos, vermelhos, com folhelhos na base, apresentam mica e concreções calcíferas irregulares. Sua argila mais comum é montmorilonita.

Formação Caturrita – Bortoluzzi (1974) definiu essa unidade como membro da Formação Botucatu. Segundo Maciel Filho (1990) é constituída por camadas de arenitos finos a médios, de cor rosa a cinza claro de composição essencialmente quartzosa a matriz argilosa do grupo montmorilonitas e ilitas contendo em algumas partes considerável teor de feldspato, intercaladas freqüentemente por camadas ou lentes de siltitos de espessura menor e cor avermelhada.

Formação Botucatu – A formação Botucatu é constituída por arenitos finos a médios, com percentagem reduzida de silte e argila (BORTOLUZZI, 1974). A porção superior da formação caracteriza-se por apresentar sedimentação eólica, é composta por arenitos essencialmente quartzosos contendo feldspatos alterados cimentados por sílica ou óxido de ferro, possui estratificação cruzada de grande porte (MACIEL FILHO, 1990).

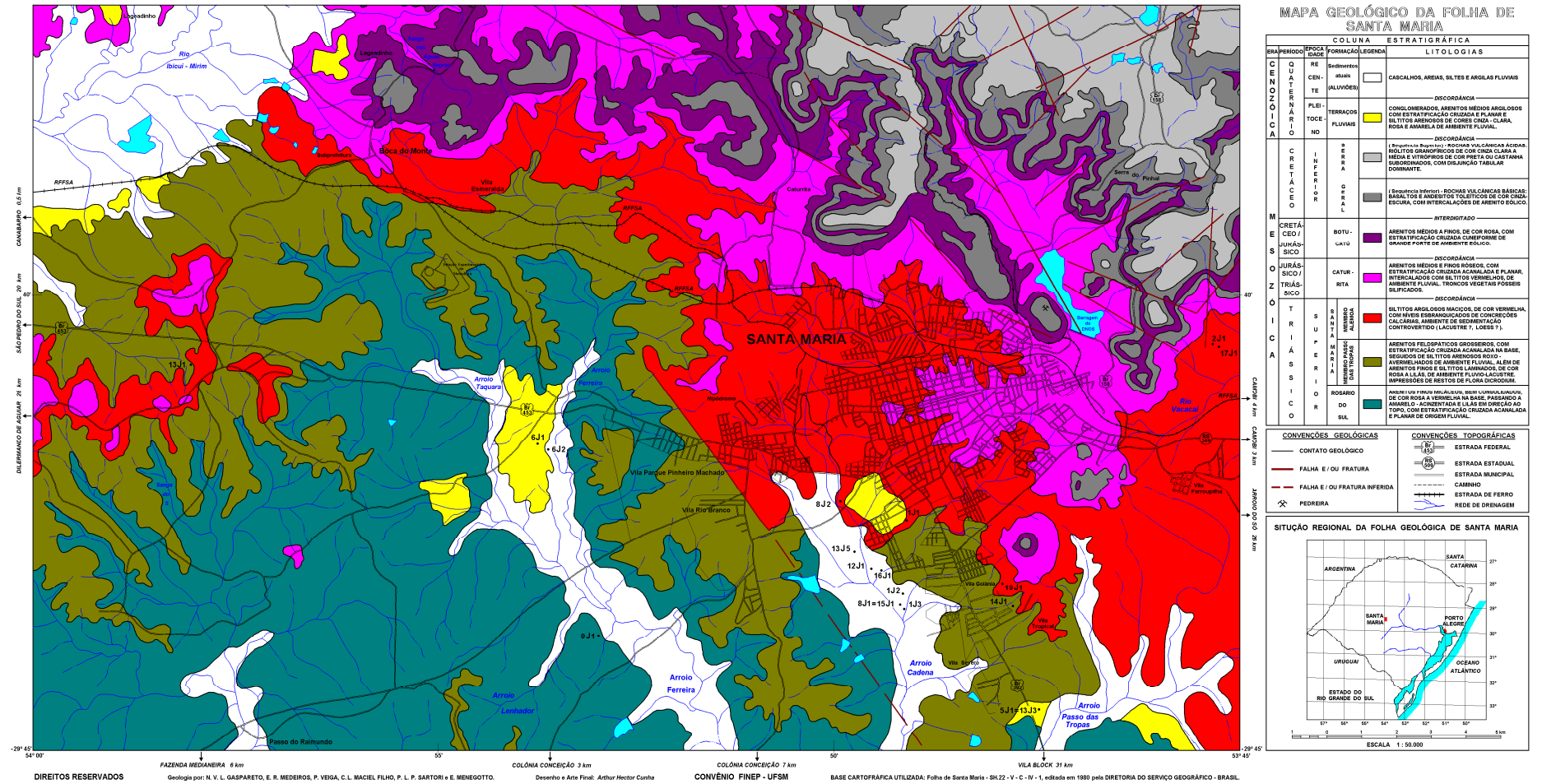


Figura 4.2 – Mapa Geológico da folha de Santa Maria

Formação Serra Geral (Basaltos, Diabásio e Riólito) – A formação Serra Geral é constituída por duas seqüências vulcânicas, uma básica e outra ácida. Os derrames básicos são formados por basaltos com intercalações de arenitos eólicos e os derrames ácidos por vitrófiros e granófiros. Foram identificados cinco derrames básicos e quatro ácidos (MACIEL FILHO, 1990).

Depósitos Coluvionares – São depósitos formados essencialmente pela ação da gravidade na região logo abaixo das escarpas naturais do arenito silicificado intertrapes e das camadas superiores de arenito Botucatu, próximo ao contato com as rochas vulcânicas (basaltos). Podem ser formados por blocos de basaltos e de arenito dos mais variados tamanhos, imersos ou emergentes de uma massa de solo com matéria orgânica.

Depósitos Fluviais de Várzeas – Os depósitos fluviais de várzea em Santa Maria ocorrem devido aos rios Arenal e Vacacaí que fornecem grandes quantidades de areia. Segundo Maciel Filho (1990), os depósitos fluviais recentes são os do Cadena e do Vacacaí-Mirim. Os depósitos do Rio Cadena são compostos por sedimentos arenosos e argilosos, de cor geralmente cinza, sua espessura varia de 3m a 5m. Os depósitos do rio Vacacaí-Mirim são compostos por areia fina com cascalho e às vezes silte, sua espessura fica em torno de 7m. Os aluviões do Cadena recobrem as Formações Caturrita, Santa Maria e Rosário do Sul e os aluviões do Vacacaí-Mirim apenas as Formações Caturrita e Santa Maria.

## **4.2 Geomorfologia**

Segundo Maciel Filho (1990) Santa Maria situa-se junto ao rebordo do Planalto Meridional Brasileiro, denominado como Serra Geral. O relevo da região apresenta três feições bem distintas. A primeira é das planícies aluviais, modeladas em sedimentos quaternários, com uma topografia plana e sujeita a inundações (Cadena, Vacacaí-Mirim e Ferreira), as altitudes de várzea ficam em torno de 40 a 60 m. A segunda corresponde à área das coxilhas, modeladas em rochas sedimentares triássicas, constituída por colinas alongadas, com uma topografia suavemente ondulada. As principais coxilhas são de Pau Fincado, Bonita, Santa Catarina e Pinheiros. As planícies aluviais e as coxilhas fazem parte da Depressão

Central Gaúcha com declives suaves, com amplitudes que variam entre 70 e 160m e representam área de degradação.

A transição da Depressão para o Planalto se dá através da unidade geomorfológica Serra Geral - Área Serrana (PINHEIRO *et al.*, 2002). Nessa unidade são comuns os declives superiores a 15%. Considera-se parte desta unidade os morros testemunhos isolados na Depressão. As altitudes das encostas variam de 120 a 470m. O substrato rochoso é composto pelas Formações Caturrita, Botucatu e Serra Geral. Esta unidade caracteriza a terceira feição do relevo da região, o qual é modelado em rochas vulcânicas, com elevações de topo aplaiado e com patamares, nas encostas. Na área Serrana, a escarpa é festonada e constitui um prolongamento da Serra Geral, conhecida com denominações locais de serras de São Martinho e do Pinhal. Na Figura 4.3 pode-se observar o município de Santa Maria, visto da Serra Geral.



Figura 4.3 – Vista do município de Santa Maria.



### 4.3 Hidrografia e Hidrogeologia

Segundo Robaina (2002) a cidade de Santa Maria compreende dois sistemas hídricos importantes, situa-se num divisor d'água, onde estão inseridas as nascentes das duas principais bacias hidrográficas do Estado. Para leste escoam as águas que irão configurar a Bacia Hidrográfica do Guaíba e para Oeste os rios que contribuem na formação da Bacia Hidrográfica do Uruguai, destacando-se o rio Ibicuí. Especificamente na região de Santa Maria, os mais importantes cursos d'água fazem parte das sub-bacias do Arroio Cadena, Vacacaí-Mirim, Arroio Arenal, Arroio Sarandi e Arroio Ferreira.

Os dados hidrológicos da Carta Geotécnica de Santa Maria de Maciel Filho (1990) têm como base os conhecimentos geológicos da área estudada e observações de fontes e de perfis de alguns poços, a fim de obterem-se dados preliminares da água subterrânea e os cuidados que devem ser tomados para sua proteção, destacando as condições de infiltração de cada unidade, o sentido do fluxo e a vulnerabilidade dos aquíferos. Informações sobre água subterrânea e condições prováveis de aproveitamento também se obteve no Mapa Hidrogeológico da Folha de Santa Maria, CPRM (1994), escala 1:100.000.

A Formação Rosário do Sul possui permeabilidade moderada a baixa com aquíferos de baixa produção, exploráveis apenas por poços escavados. A infiltração se processa através do solo residual, podendo receber água de outras formações por recarga indireta. A vulnerabilidade é média a baixa e nas áreas de topografia baixa, o nível freático está muito próximo à superfície.

O aquífero da Formação Arenito Basal Santa Maria (Passo das Tropas), pode ser livre ou confinado. O nível freático do aquífero livre mantém-se por longa extensão abaixo da camada impermeável, sem haver confinamento, à medida que se aprofunda torna-se confinado. A infiltração se processa através do solo residual, e por drenância descendente dos aluviões que o recobrem. Segundo Maciel Filho (1990) para Santa Maria, este aquífero é o mais importante por ser o mais explorado. O solo, por ser permeável seca mais rapidamente após as chuvas.

A Formação Santa Maria exceto arenito basal (Alemoa) é praticamente impermeável. A parte superior funciona como capa impermeável enquanto os siltitos e arenitos argilosos da base são semipermeáveis. Devido à impermeabilização, a água fica retida no solo superficial, mantendo-o geralmente muito úmido. A

importância desta camada é o seu funcionamento como selo isolante entre o que está acima e abaixo dela. Esta formação pode ser utilizada como selante para disposição de resíduos.

Segundo Maciel Filho (1990) a Formação Caturrita é complexa com relação aos aquíferos, pois possuem camadas semipermeáveis e impermeáveis. Grande parte dos arenitos possui muito silte e argila expansiva que lhe diminui a permeabilidade. O arenito basal geralmente é grosseiro e permeável. Onde predomina as fácies siltico-argilosa, formam-se aquíferos suspensos ou cativos em arenitos com permeabilidade moderada a baixa. A vulnerabilidade da formação é proporcional à facilidade de infiltração. A urbanização se desenvolve sobre este arenito, ele já se encontra em grande parte poluído, sendo normalmente desprezado pelos perfuradores de poços profundos.

O arenito da Formação Botucatu possui permeabilidade alta, bem como os solos residuais. A infiltração se processa pelo solo, na área de exposição desta unidade. A vulnerabilidade é elevada, pela facilidade de infiltração e o pequeno e rápido caminho que a água deve percorrer.

A permeabilidade da Formação Serra Geral é fissural, a água se desloca com facilidade entre as fraturas. Este aquífero tem pouca capacidade de armazenamento, fica limitado ao espaço fraturado entre os blocos de rocha. A infiltração se processa pelo solo residual, que pode representar desde espessuras insignificantes até profundidades que correspondem ao corpo todo do derrame. A vulnerabilidade deste aquífero é proporcional à facilidade da infiltração.

Nos Depósitos Fluviais de Várzeas, a infiltração se processa por infiltração da água da chuva, e por drenância dos aquíferos que estão em contato. São vulneráveis a contaminação, pois é permeável e com o lençol freático a pouca profundidade, estando em alguns locais e épocas do ano na superfície. Pela existência de depósitos de lixo nos aluviões do Cadena, admite-se que o aquífero esteja contaminado em toda área e redondezas. Deve-se evitar a exploração por poços escavados nesta área.

#### **4.4 Pedologia**

Segundo Maciel Filho (1977) é visível na região de Santa Maria a influência da topografia e da litologia na espessura do solo. Em locais mais baixos os solos são mais espessos, especialmente nas áreas de baixada onde o nível freático está

quase aflorando. Quanto à litologia têm-se solos profundos em zonas mais arenosas e solos rasos em zonas argilosas.

Os solos superficiais da Formação Rosário do Sul, apresentam uma espessura variável em função da permeabilidade da rocha e do relevo, geralmente variam de 60 cm a 1 m, são solos do tipo podzólico vermelho amarelo, mais profundos, e podzólico bruno acinzentado, mais raso.

O solo da Formação arenito basal Santa Maria (Passo das tropas) é profundo, em torno de 2 a 3 m, é arenoso, com boa quantidade de argila devido à completa alteração dos feldspatos, é do tipo podzólico vermelho amarelo (MACIEL FILHO, 1974). O solo da Formação Santa Maria exceto arenito basal (Alemoa) é geralmente raso, cerca de 50 cm, do tipo podzólico bruno acinzentado ou planossolo, possui baixa permeabilidade. Porém sobre as camadas de Arenito argiloso ou siltito argiloso o solo é um pouco mais profundo (MACIEL FILHO, 1990).

Segundo Maciel Filho (1974) sobre a Formação Caturrita desenvolveu-se solos semelhantes aos da Formação Santa Maria, pois a rocha matriz é semelhante (arenosos e argilosos), mas com uma predominância de solos arenosos, também é classificado como podzólico bruno acinzentado.

A Formação Botucatu apresenta um solo residual e friável. Estes solos estão muito influenciados pela topografia, estão normalmente cobertos por coluvião, por estas razões são geralmente rasos e arenosos, é classificado como podzólico vermelho escuro abruptico com textura areno/argilosa (MACIEL FILHO, 1974).

Os solos da Formação Serra Geral são influenciados também pela topografia. A alteração do basalto ou diabásio oferece variações muito grandes, ora a rocha está próxima da superfície, ou nela mesma, ora o derrame encontra-se totalmente alterado (MACIEL FILHO, 1974). Este solo é classificado como terra roxa estruturada de textura argilosa. O riólito da Formação Serra Geral pode formar solo contendo grandes blocos e matacões. Nas declividades altas onde não aflora a rocha, ocorrem solos litólicos com fragmento do riólito misturado a material terroso, apresenta cerca de 1 m de espessura (MACIEL FILHO, 1974).

Para Maciel Filho (1990) os solos dos Depósitos Coluvionares são normalmente compostos por solos arenosos provenientes do Botucatu ou compostos por uma mistura de basalto, riólito, arenito, mas são melhor caracterizados quando são observados de onde provém cada mancha desse material. Os depósitos fluviais de várzea apresentam solos superficiais com

espessura de 1 m, sendo um solo jovem e pouco desenvolvido, por serem compostos de areia fina a grossa com cascalho. Sua permeabilidade normalmente é alta.

#### 4.5 Geotecnia

A identificação das principais características geotécnicas apresentadas neste item foram retirados de Maciel Filho (1990).

A Figura 4.4 apresenta a Carta das Unidades Geotécnicas de Maciel Filho (1990). O mapeamento geotécnico desenvolve-se com base na geologia de um determinado local, representa todos os componentes de um ambiente geológico de significância para o planejamento do uso do solo, projetos, construções e manutenções.

A Formação Rosário do Sul possui escavabilidade muito irregular, devido a sua litologia, arenitos e siltitos. A profundidade média do material escavável é em torno de 5 a 8 m. As condições de suporte são médias a boas. Os cortes abertos em arenito apresentam boas condições de estabilidade, porém, quando a siltitos intercalados diminui essa resistência, devido ao fenômeno de desagregação superficial.

A unidade arenito basal Santa Maria (Passo das Tropas) é facilmente escavável. As partes que sofreram cimentação pelo ferro constituem o melhor material da região para compactação. Estudos recentes em perfis geotécnicos sobre esta formação são apresentados em Pinheiro *et al.* (2007).

A Formação Santa Maria (Alemoa), em termos geotécnicos é classificada como rocha evolutiva ou solo pré-adensado, muito resistente. A resistência à erosão desta unidade é fraca, o solo quando desprovido de vegetação fica sujeito à formação de ravinas que se aprofundam rapidamente. Como fundação esta unidade apresenta dois aspectos, a capacidade de carga e a expansividade. Novos dados sobre a caracterização geotécnica desta formação podem ser encontrados em Emmer (2004) na área do Campo Experimental de Engenharia Geotécnica da UFSM e Pinto (2005) na área da Central de Tratamento de Resíduos da Caturrita.

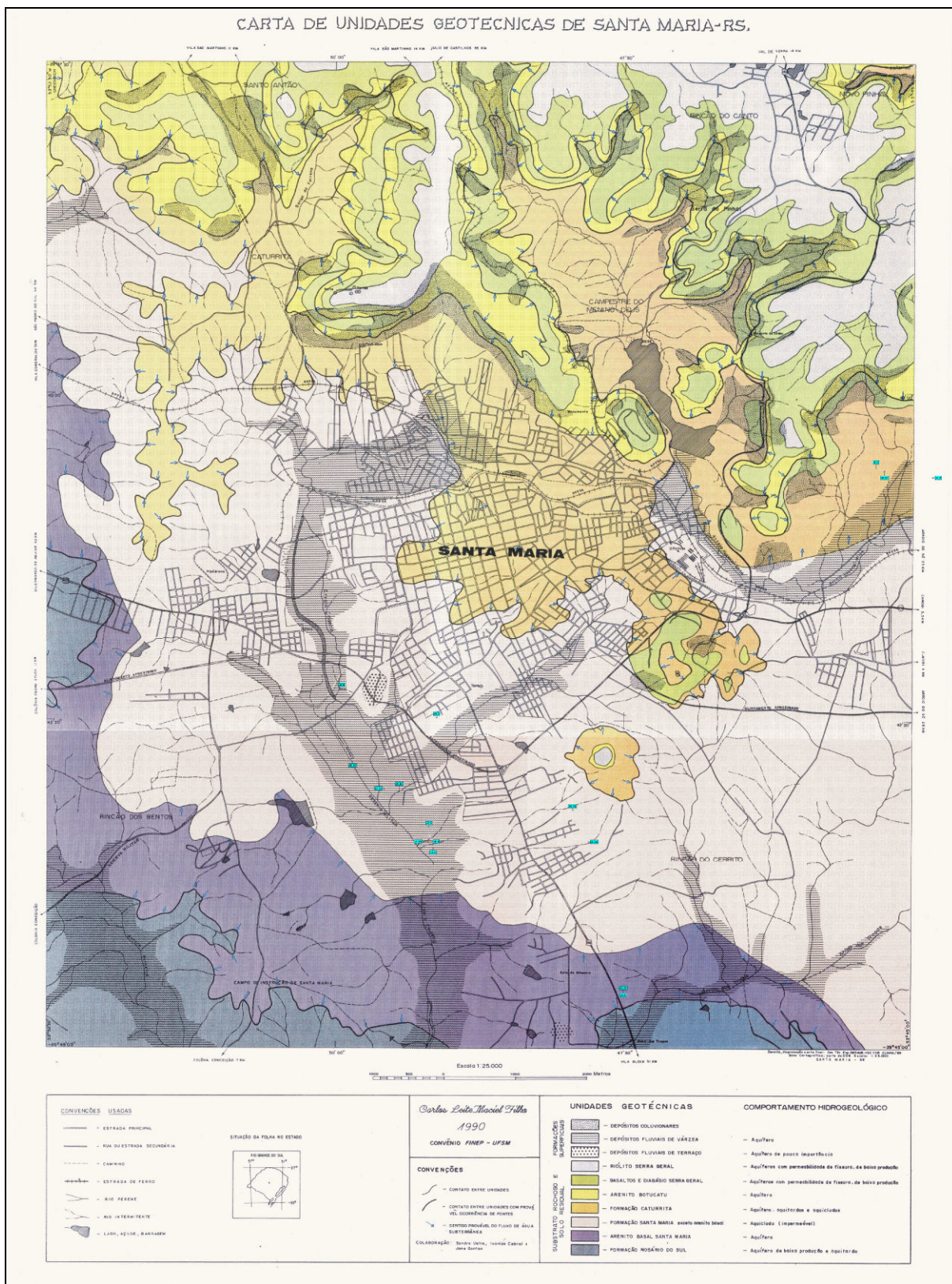


Figura 4.4 – Carta das Unidades geotécnicas de Maciel Filho (1990).

Na Formação Caturrita a resistência dos solos à erosão é baixa, progride rapidamente quando o solo superficial é retirado. Com relação às fundações as camadas arenosas espessas não oferecem problemas, basta somente encontrar a profundidade adequada da capacidade de carga. Em camadas com pouca profundidade os solos argilosos provocam problemas de expansão, como na Formação Santa Maria. A rocha pode ser classificada como branda ou solo sobreconsolidado.

A Formação Botucatu tem um comportamento geotécnico variável, desde rocha dura até arenito brando e mesmo areia com pouca coesão, quando alterada. A resistência à erosão das partes litificadas é alta, porém das partes alteradas e solo residual arenoso é baixa. Oferece variável resistência a escavação, conforme o grau de litificação. Como sub-leito de estradas esta unidade mostra boa capacidade de suporte, apresenta também boas condições para abertura de túneis.

A Formação Serra Geral, tanto o basalto como o riólito possuem comportamento geotécnico semelhante, quando são, comportam-se como rocha dura. A brita, pedras de calçamento, e as de alicerces usadas em Santa Maria provêm desta rocha. Esta unidade, como fundação, não apresenta problemas especiais, o solo geralmente comporta-se como pré-adensado. Os taludes são estáveis. Esta unidade não é indicada para absorção de esgotos por sumidouros, devido a baixa permeabilidade do solo residual, como pela elevada permeabilidade das fraturas que podem levar os poluentes aos aquíferos.

Os problemas geotécnicos dos depósitos fluviais de várzea estão associados a pouca profundidade do lençol freático, a inundações nas épocas de cheias e a pouca resistência a fundações.

#### **4.6 Clima e Vegetação**

Santa Maria apresenta características climáticas bem definidas com relação às quatro estações do ano.

De acordo com o Mapa Hidrogeológico da folha de Santa Maria (1994), a precipitação média anual é de 1769 mm, e os meses de maio, junho e setembro são os mais chuvosos, enquanto novembro e dezembro são os mais secos. A umidade

relativa média anual é de 72%, alcançando os valores mínimos no trimestre dezembro, janeiro e fevereiro (64%).

Segundo Barros Sartori (1979), a cidade de Santa Maria está localizada em uma região de clima subtropical e possui temperaturas médias anuais aproximadamente de 22°C, sendo que as temperaturas médias e mínimas variam, no verão acima de 30°C e no inverno abaixo de 5°C, a ocorrência de geada entre junho e agosto é muito comum.

Segundo Maciel Filho (1977), o município de Santa Maria é constituído principalmente por uma cobertura vegetal rasteira do tipo savana. Sua vegetação arbórea é mais abundante na região do rebordo do planalto e nos vales profundos. Salienta-se que o planalto norte do município é praticamente o limite meridional da *Araucária Brasiliensis* que é encontrada ainda como vestígio nos locais com maior altitude.

## **5 APRESENTAÇÃO E DESCRIÇÃO DOS RESULTADOS**

O presente capítulo apresenta os resultados obtidos nesta pesquisa, de acordo com os objetivos propostos. O capítulo divide-se em: carta das unidades geotécnicas da Folha de Santa Maria – RS, identificação e caracterização das unidades geotécnicas, ensaios de campo de condutividade hidráulica, poços tubulares e avaliação do índice de vulnerabilidade natural dos aquíferos, além da apresentação da superfície potenciométrica e da espacialização de fontes potenciais de poluição urbana.

### **5.1 Carta das Unidades Geotécnicas da Folha de Santa Maria – RS**

A carta das unidades geotécnicas de Santa Maria foi elaborada por Maciel Filho (1990) e está baseada em trabalhos realizados anteriormente na região, tem a finalidade de apresentar os conhecimentos geológicos, hidrogeológicos, geotécnicos e pedológicos referentes à área mapeada. As unidades geotécnicas apresentadas na carta caracterizam-se pelas formações geológicas existentes.

A carta das unidades geotécnicas foi digitalizada no programa *Spring 4.2* com o objetivo de realizar a espacialização e a apresentação dos ensaios de condutividade hidráulica, dos poços tubulares simulados e algumas fontes potenciais de poluição urbana existentes, relacionando-os com as formações geológicas. Maiores detalhes estão apresentados no item 3.2.

A área geográfica que abrange a folha da carta das unidades geotécnicas delimitou a área de estudo desta pesquisa. A Figura 5.1 apresenta a carta digitalizada das unidades geotécnicas de Santa Maria – RS.

### **5.2 Identificação e caracterização das Unidades Geotécnicas**

Com o conhecimento das formações geológicas existentes em afloramentos na área de estudo, pode-se determinar os locais de realização dos ensaios de condutividade hidráulica em perfis típicos que caracterizam as diversas unidades geotécnicas as quais constituem a região de Santa Maria. A Tabela 5.1 apresenta a nomenclatura, localização, identificação dos perfis estudados nesta pesquisa. Alguns ensaios aqui apresentados já foram realizados e publicados anteriormente.



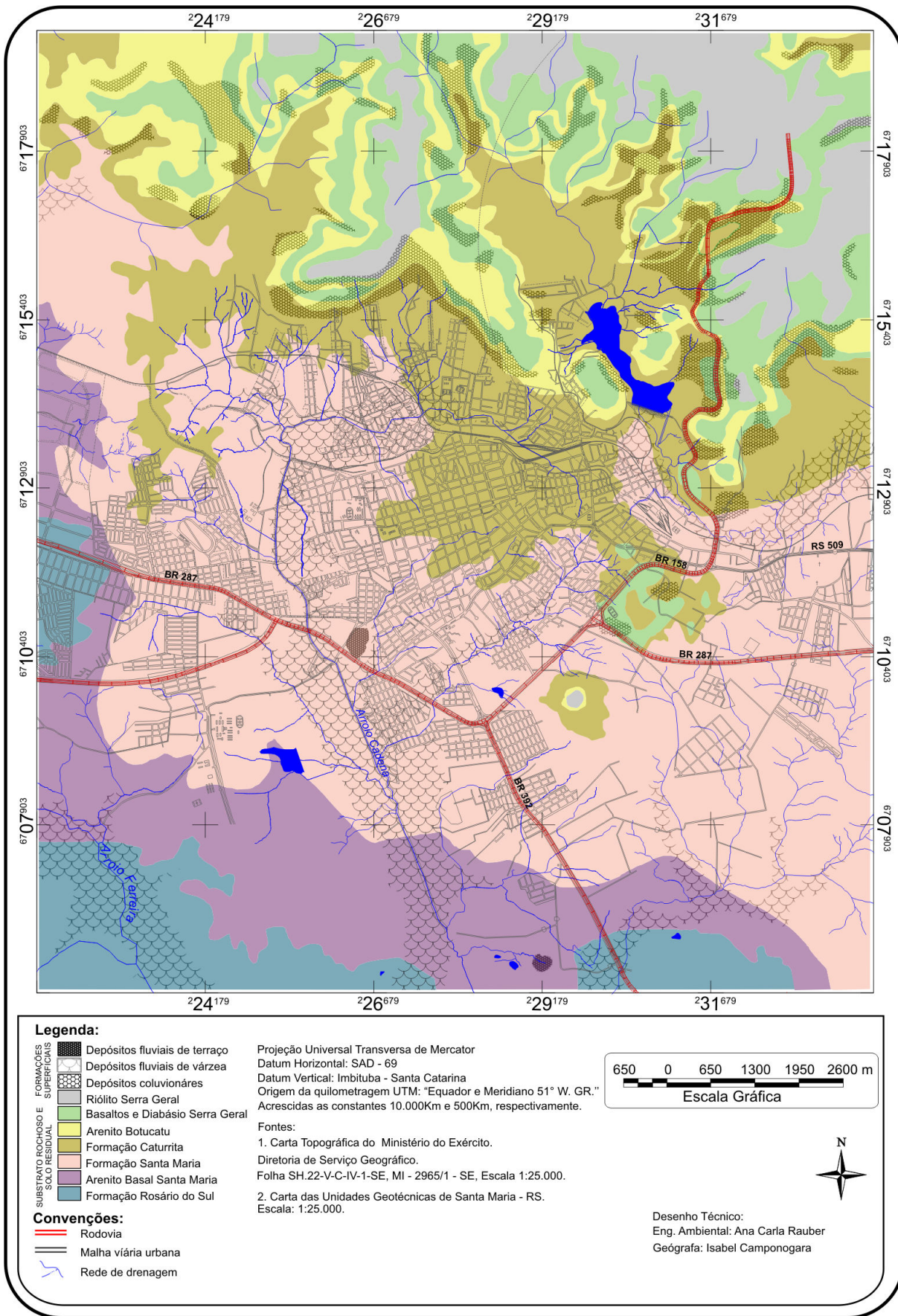


Figura 5.1 – Carta das Unidades Geotécnicas de Santa Maria digitalizada, escala original 1:25.000.

Tabela 5.1 – Identificação dos perfis típicos estudados.

Unidades Geotécnicas	Símbolo	Localização	Coordenadas UTM	
			Leste	Norte
Depósitos Fluviais	DFL1	Parque de Manutenção MNT/3, Rua Venâncio Aires	225023	6711912
	DFL2			
	DFL3			
Colúvio	COL1	Av. João Luiz Pozzobon	230540	6711954
	COL2	BR 158, Vila Bilibiu	228.650	6712839
Botucatu	BOT1	Rua Silva Jardim	229021	6713250
	BOT2	BR 158, Garganta do Diabo	231433	6715515
Caturrita	CAT1	Av. João Luiz Pozzobon	230563	6712045
	CAT2	Trevo BR 158/BR 287	229939	6710990
Santa Maria Alemoa	SMA1	Central de Tratamento de Resíduos da Caturrita (CTRC), Caturrita	222278	6715621
	SMA2			
	SMA3	Trevo BR 158/BR 287	229801	6711060
	SMA4	Campo Experimental da Eng. Geotécnica (CEEG) - UFSM	-	-
	SMA5			
Santa Maria Passo das Tropas	SMP1	Aterro de Resíduos Industriais Perigosos (ARIP), Passo da Capivara	233047	6702853
	SMP2			
	SMP3			
	SMP4			
	SMP5	UFSM, Estrada Pains	-	-
	SMP6	BR 392	229875	6706411

Pinto (2005) realizou ensaios de caracterização da condutividade hidráulica na CTRC, Formação Santa Maria Membro Alemoa, denominados por (SMA1, SMA2), e Emmer (2004) realizou ensaios no Campo Experimental da Engenharia Geotécnica da UFSM (SMA4 e SMA5). Pinheiro (2007) realizou estudos semelhantes na Formação Santa Maria Membro Passo das Tropas (SMP1, SMP2, SMP3, SMP4). Alguns dos locais onde foram executados os ensaios (perfis típicos) estão fora da Folha de Santa Maria (1:25.000), mas optou-se por incluí-los nesta pesquisa, pois apresentam características que identificam as unidades geotécnicas e estão em continuidade com área estudada. Das unidades geotécnicas descritas no

item 4.5 ainda não foram estudadas as Formações Rosário do Sul e a Serra Geral. As Figuras 5.2 a 5.12 apresentam os locais estudados.



Figura 5.2- Depósito Fluvial na planície do Arroio Cadena (DFL1, DFL2, DFL3).



Figura 5.3 – Perfil de Colúvio (COL1).



Figura 5.4 – Perfil de Colúvio (COL2).



Figura 5.5 – Botucatu (B0T1), arenito.



Figura 5.6 – Botucatu (BOT2), arenito silicificado.



Figura 5.7 – Caturrita (CAT1).



Figura 5.8 – Caturrita (CAT2).

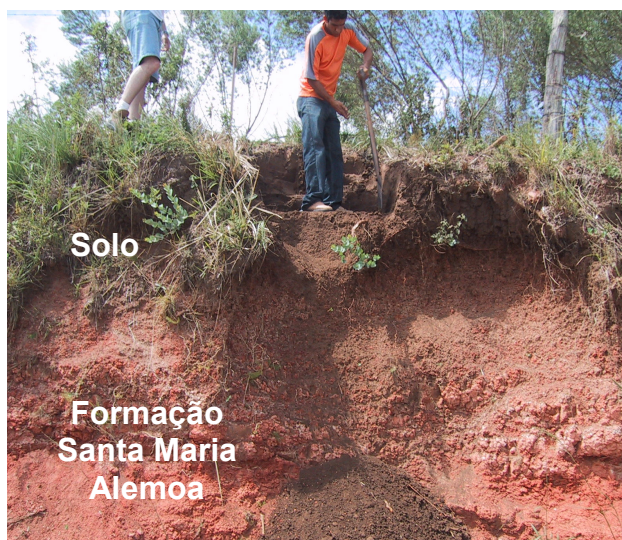


Figura 5.9 – Membro Alemoa (SMA1).



Figura 5.10 – Membro Alemoa (SMA4).



Figura 5.11 – Passo das Tropas (SMP1).



Figura 5.12 – Passo das Tropas (SMP6).

A Tabela 5.2 apresenta os resultados dos ensaios de caracterização realizados nas amostras coletadas nos perfis típicos. Os ensaios realizados foram a

determinação da massa específica real dos grãos, os limites de consistência e da granulometria realizado por peneiramento e sedimentação com uso de defloculante. As especificações para estes ensaios foram apresentadas no item 3.3. As curvas granulométricas dos perfis representativos das unidades geológica-geotécnicas estão apresentadas nas figuras 5.13 a 5.18.

Os perfis caracterizados como depósito fluvial do Arroio Cadena apresentam texturas que variam de areias a argilas. Os resultados obtidos em 3 perfis demonstram estas características. Os perfis DFL1 e DFL3 são areias siltosas com baixa plasticidade (SC-SM), com fração areia superior a 50% e fração argila inferior a 15%. O perfil DFL2 apresenta uma textura argilosa, com alta plasticidade, tendo uma fração argila superior a 60% (Figura 5.13).

Os Depósitos coluvionares foram estudados em 2 perfis típicos (Figura 5.3 e 5.4). Ambos são constituídos por uma matriz, classificada geotecnicamente como silte (ML). Apresentam uma quantidade expressiva de fragmentos de arenito e basalto em tamanhos variados. Apresenta de baixa a média plasticidade e podem conter uma quantidade expressiva de matéria orgânica, como o perfil COL1.

Nos perfis da Formação Botucatu nota-se a presença significativa da fração areia fina (50% à 85%). Sendo que o perfil BOT2 apresenta-se mais silicificado e não plástico, sendo classificado como areia mal graduada (SP-SW). Já o perfil BOT1 apresenta-se com mais finos, baixa plasticidade e classificado como silte (ML). Este perfil está muito próximo do contato com a Formação Caturrita. Devido a presença de finos (silte) no perfil BOT1 sugere-se estudos complementares em outros afloramentos típicos para um melhor entendimento dos resultados.

Os perfis da Formação Caturrita apresentaram uma diferenciação quanto à granulometria e plasticidade. O perfil CAT1 é de constituição mais fino, plástico e classificado geotecnicamente como um silte (ML). Já o perfil CAT2 é mais grosseiro, com predomínio de areia fina, não plástico, classificado com areia bem graduada com silte (SW-SM). Ambos apresentam uma fração argila inferior a 10%.

A Formação Santa Maria Membro Alemoa apresentam uma predominância das frações fina (46% a 92%), de média a alta plasticidade ( $LL > 45\%$ ), classificados geotecnicamente com argilas de baixa e alta plasticidade (CL e CH). Podem ocorrer variações na quantidade de silte e areia. Emmer (2004) e Pinto (2005) nos perfis estudados do Campo Experimental da UFSM e da Central de Tratamentos de Resíduos da Caturrita identificaram como argilomineral predominante interestratificados de illita-montmorilonita.

Tabela 5.2 – Caracterização das unidades geotécnicas.

	Unidades	$\gamma_s$ (g/cm <sup>3</sup> )	LL (%)	LP (%)	IP (%)	Pedre- gulho (%)	Areia Grossa (%)	Areia Média (%)	Areia Fina (%)	Silte (%)	Argila (%)	Sistema Unificado de Classificação dos Solos (ASTM, 2003)
Depósitos Fluviais	DFL1	2,61	18	14	4	0	5	23	28	31	13	SC-SM areia siltosa
	DFL2	2,59	72	28	44	0	1	2	12	23	62	CH argila muito plástica
	DFL3	2,57	23	18	5	0	2	11	67	8	12	SC-SM areia siltosa
Depósitos Coluvionares	COL1	2,64	48	35	13	0	21	16	21	26	16	ML silte arenoso
	COL2	2,80	29	25	4	0	12	20	15	44	9	ML silte arenoso
Botucatu	BOT1	2,56	32	24	8	0	0	3	50	39	8	ML silte
	BOT2	2,72	22	N.P.	N.P.	0	0	1	85	5	9	SP-SM areia mal graduada
Caturrita	CAT1	2,65	48	33	15	0	0	0	14	78	8	ML silte
	CAT2	2,64	28	N.P.	N.P.	0	0	4	66	28	2	SW-SM areia bem grad. c/ silte
Santa Maria Alemoa	SMA1	2,73	48	26	22	0	8	15	31	30	16	CL argila pouco plást. c/ areia
	SMA2	2,74	86	28	58	0	3	3	16	46	32	CH argila muito plástica
	SMA3	2,67	45	19	24	0	0	2	23	53	22	CL argila pouco plástica
	SMA4	2,71	51	25	36	0	2	2	9	45	44	CH argila muito plástica
	SMA5	2,75	73	34	39	0	0	1	7	42	50	CH argila muito plástica
Santa Maria Passo das Tropas	SMP1	2,73	N.P.	N.P.	N.P.	0	18	46	10	20	6	SP-SM areia mal grad. c/ silte
	SMP2	2,76	N.P.	N.P.	N.P.	0	14	38	9	35	4	SP-SM areia mal grad. c/ silte
	SMP3	2,72	N.P.	N.P.	N.P.	-	-	-	-	-	-	-
	SMP5	3,04	N.P.	N.P.	N.P.	2	48	24	11	9	6	SP-SM areia mal graduada
	SMP6	2,75	32	24	8	0	3	50	20	20	7	SM areia siltosa

Legenda:  $\gamma_s$  = peso específico real dos grãos; LL – Limite de Liquidez; LP – Limite de Plasticidade; IP – Índice de Plasticidade; N.P. – Não plástico.

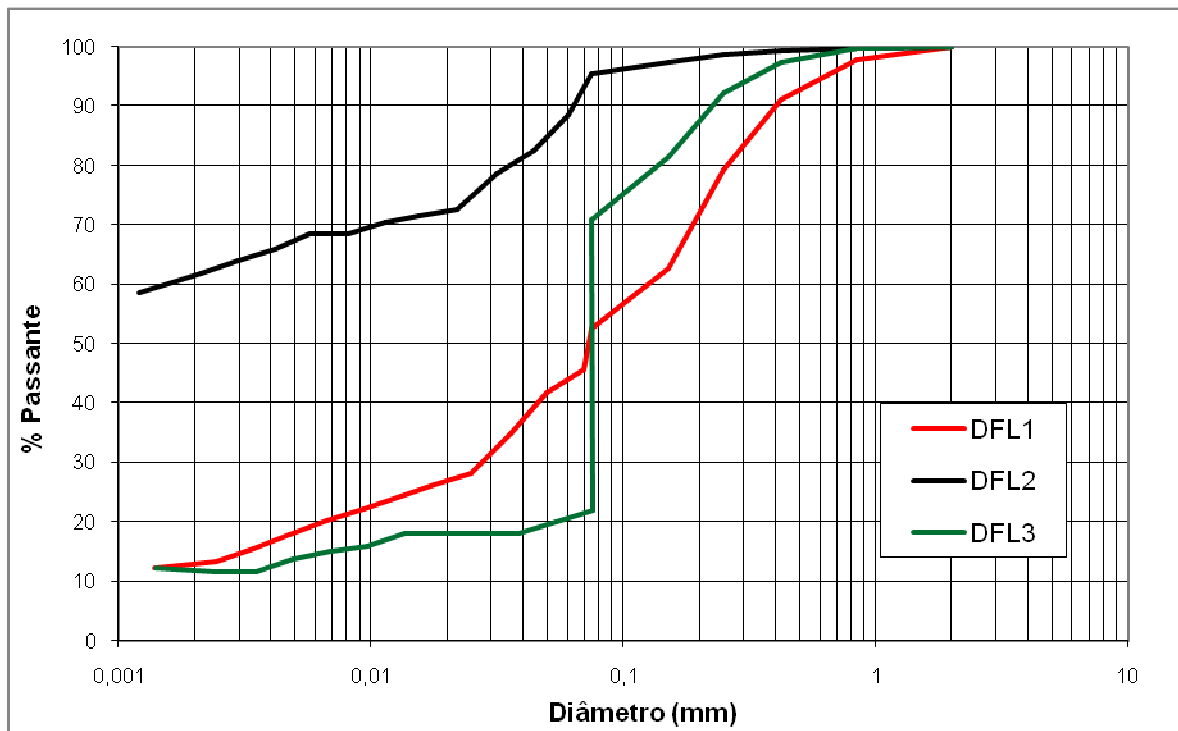


Figura 5.13 – Distribuição granulométrica dos perfis dos Depósitos Fluviais de Várzea.

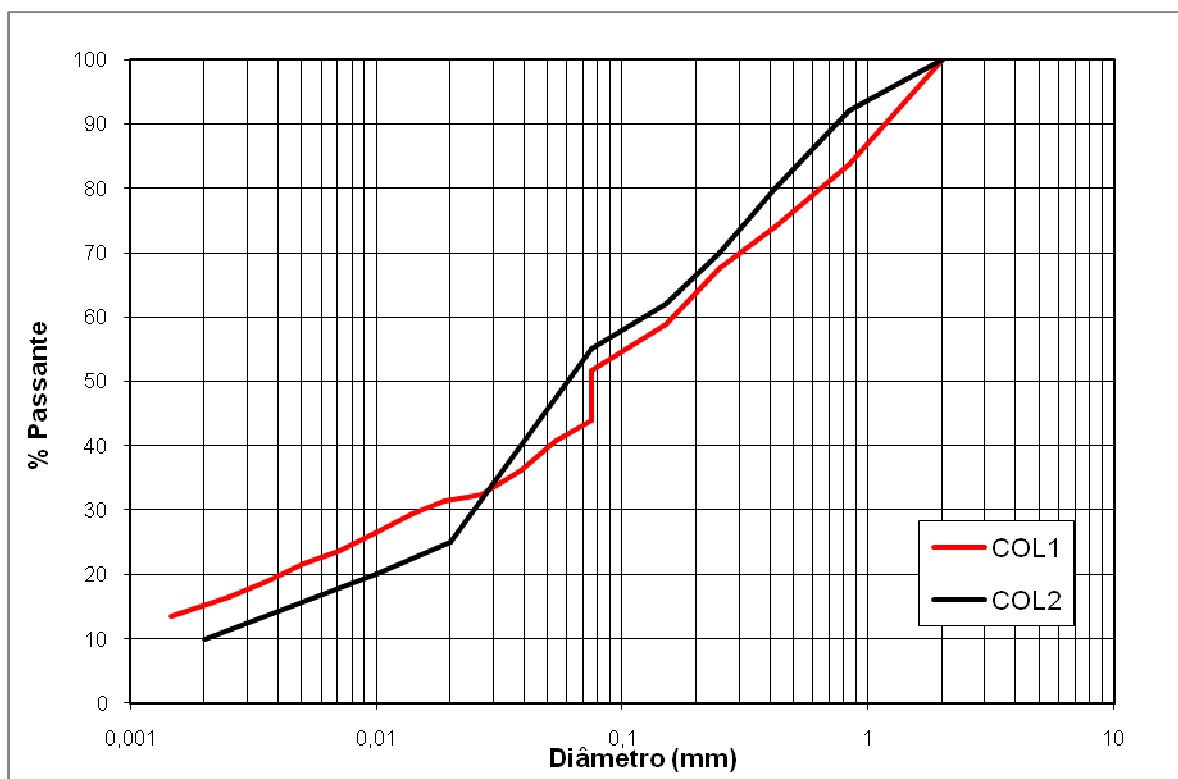


Figura 5.14 – Distribuição granulométrica dos perfis dos Depósitos Coluvionares.



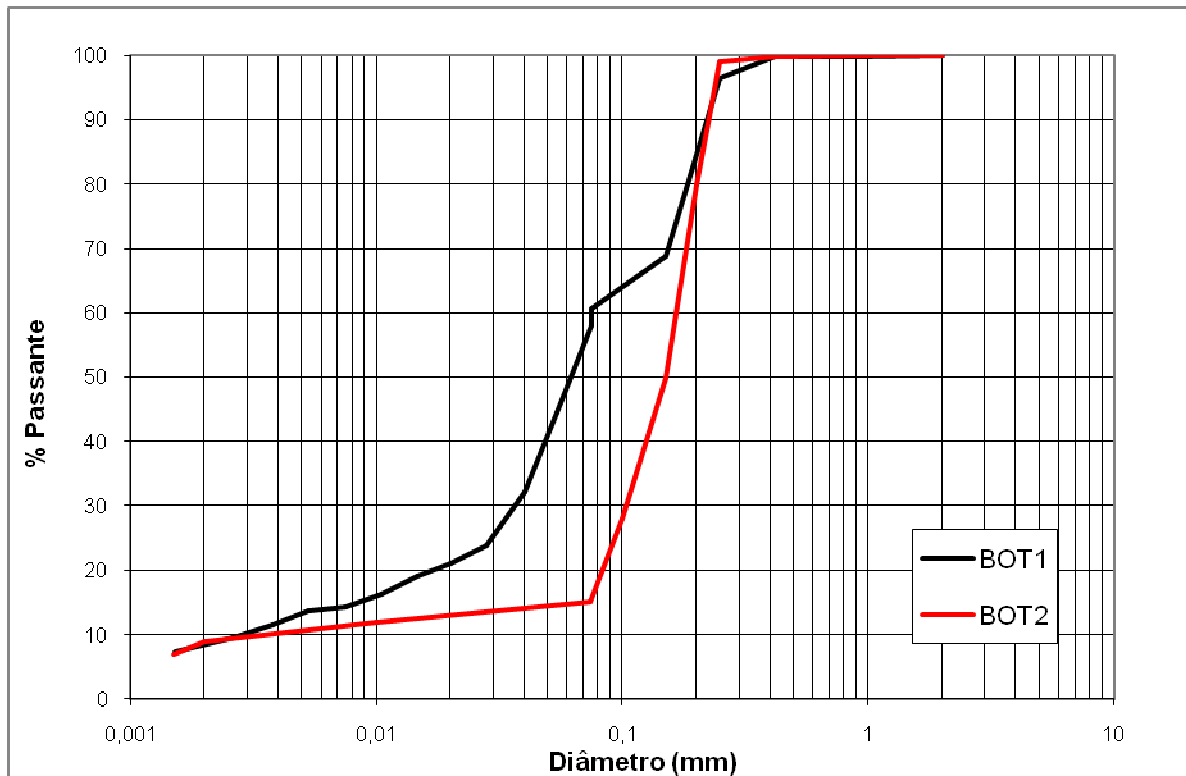


Figura 5.15 – Distribuição granulométrica dos perfis da Formação Botucatu.

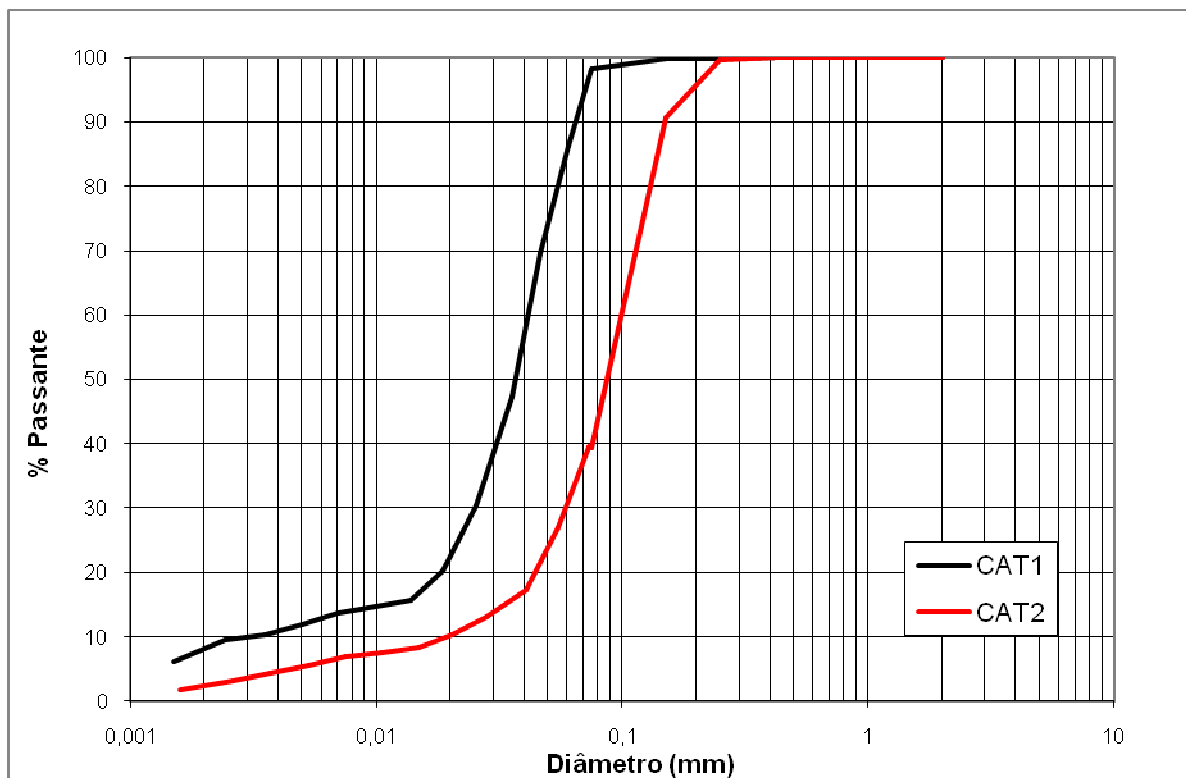


Figura 5.16 – Distribuição granulométrica dos perfis da Formação Caturrita.

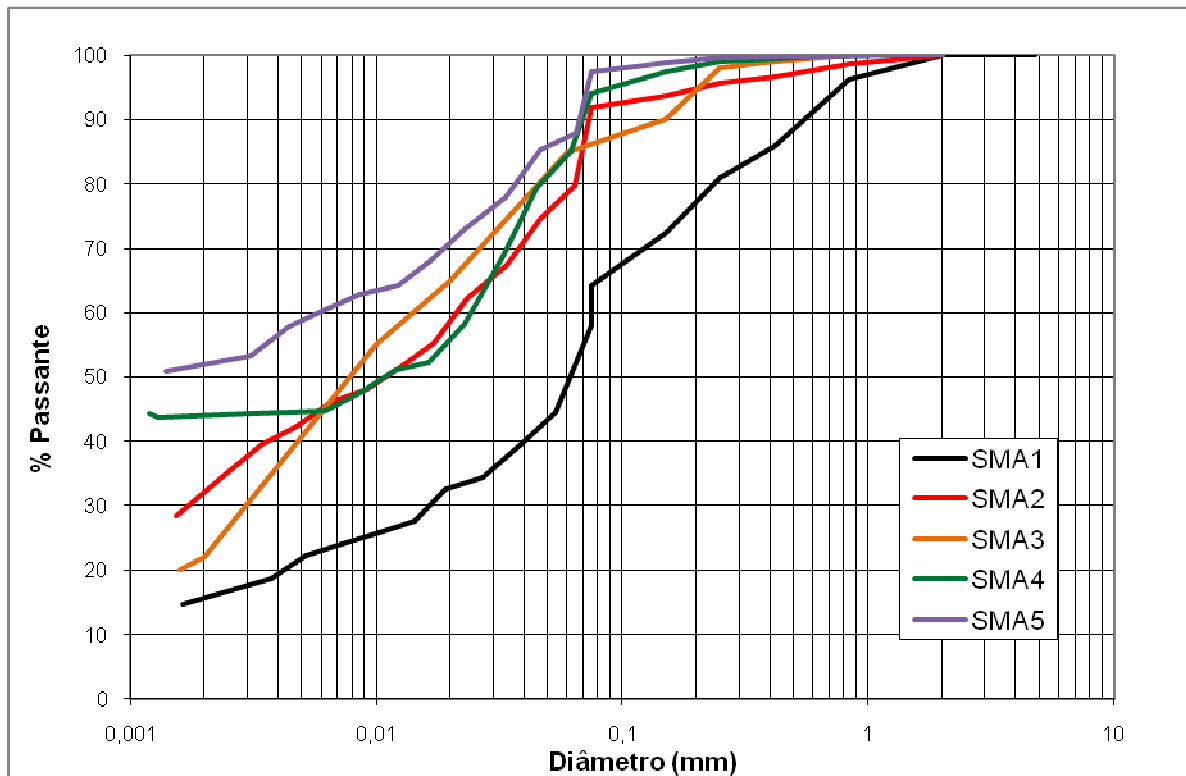


Figura 5.17 – Distribuição granulométrica dos perfis da Formação Santa Maria Membro Alemoa.

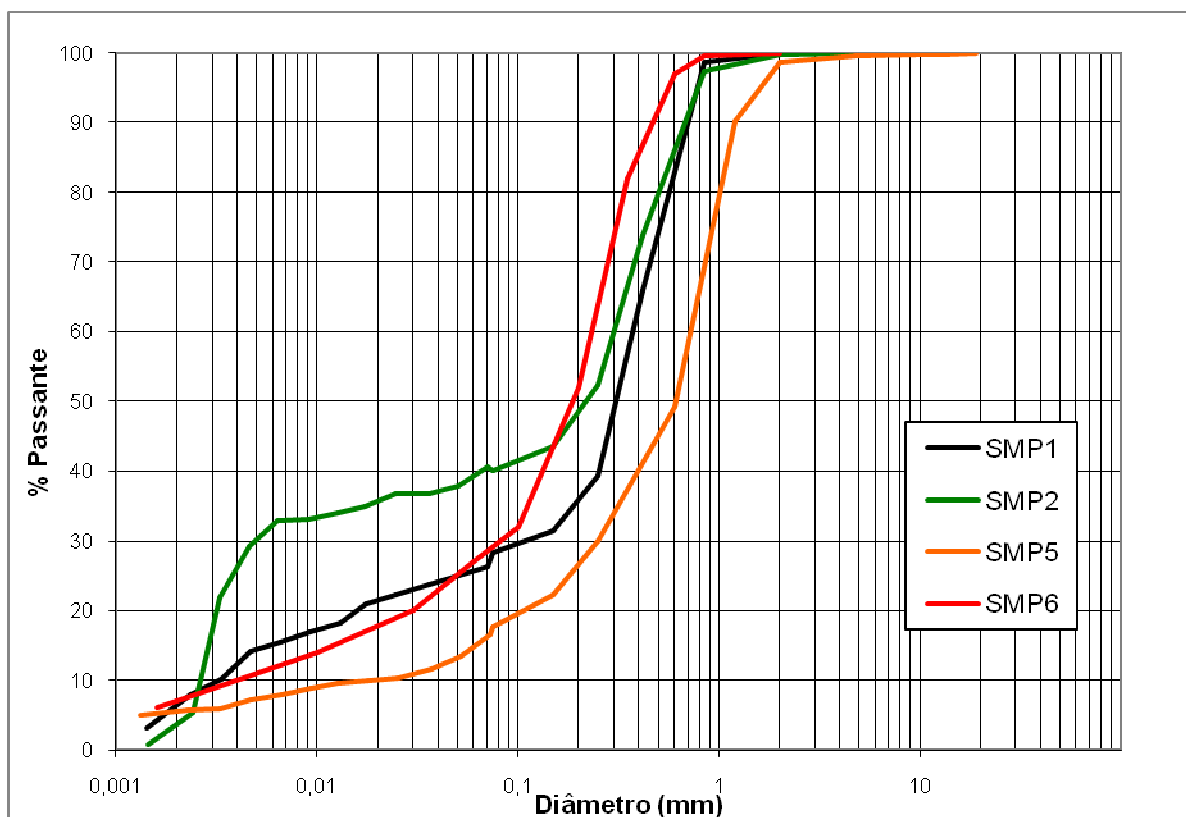


Figura 5.18 – Distribuição granulométrica dos perfis da Formação Santa Maria Passo das Tropas.

Na parte inferior da Formação Santa Maria Membro Passo das Tropas foram realizados ensaios em 3 locais típicos da área de estudo. Verificou-se o predomínio da fração areia (61 a 85%), em geral apresentam-se não plásticos (exceto o perfil SMP6). Geotecnicamente foram classificados predominantemente como areias mal graduadas com ou sem silte (SP- SM), fração argila inferior a 7%.

De acordo com os gráficos de distribuição granulométrica confirma-se a existência de variabilidade nas quantidades relativas nas frações: areia, silte e argila o que deve ser atribuído ao paleoambiente gerador do depósito sedimentar.

### **5.3 Ensaios de campo de condutividade hidráulica**

Os ensaios de condutividade hidráulica (k) foram realizados em diferentes profundidades, em função do acesso aos perfis típicos identificados das unidades geológica-geotécnicas. Os ensaios mais profundos em furos de sondagem penetrométricas (SMP1, 2, 3 e 4) a altura do filtro granular foi de 1,0m. Nos outros ensaios em profundidades menores, a altura do filtro granular foi 0,15 e 0,30m. Para realizar o selamento do furo foi utilizado uma pasta de água e bentonita. Estes ensaios tiveram como objetivo avaliar a condutividade hidráulica de depósitos (fluviais e gravitacionais) e rochas sedimentares que predominam na cidade de Santa Maria, com condições de campo preservadas. As considerações e fórmulas adotadas para o cálculo da condutividade hidráulica estão apresentadas os itens 2.5 (revisão bibliográfica) e 3.5 (metodologia). Os resultados dos ensaios e respectivas profundidades são apresentados na tabela 5.3. A Figura 5.19 apresenta graficamente a amplitude de todos os valores obtidos de condutividade hidráulica na região de Santa Maria.

Os Depósitos Fluviais do Arroio Cadena são caracterizados pela sua textura arenosa e argilosa. Esta diferenciação granulométrica se verificou nos ensaios de condutividade (in situ). O perfil argiloso (DFL2) apresentou um comportamento menos permeável que os perfis arenosos (DFL1 e DFL2).

Os perfis coluvionares apresentaram valores médios de coeficiente de condutividade hidráulica na ordem de  $10^{-5}$  m/s, os mais elevados dentre as unidades estudadas. Este valor de coeficiente é o esperado para os depósitos coluvionares, pois segundo a bibliografia, apresentam-se porosos, mesmo que predomine muitas

vezes a fração argila. Em estudos realizados por Perazzolo (2003) em colúvios argilosos nas cidades de Bento Gonçalves e Caxias do Sul os valores de condutividade hidráulica determinados situaram-se entre  $1,9 \times 10^{-6}$  m/s a  $8,3 \times 10^{-7}$  m/s.

Tabela 5.3 – Resultados dos ensaios com piezômetros escavados para determinação do k (in situ).

Unidade Geotécnica	Ensaio	Prof. (m)	K (m/s)	Valor médio (m/s)
Depósitos Fluviais	DFL1	1,10	$1,3 \times 10^{-5}$	$1,5 \times 10^{-5}$
	DFL2	1,00	$3,3 \times 10^{-6}$	
	DFL3	1,00	$2,9 \times 10^{-5}$	
Colúvio	COL1	0,5	$6,9 \times 10^{-5}$	$4,4 \times 10^{-5}$
	COL2	4,0	$1,9 \times 10^{-5}$	
Botucatu	BOT1	0,65	$5,3 \times 10^{-6}$	$2,8 \times 10^{-6}$
	BOT2	0,5	$4,4 \times 10^{-7}$	
Caturrita	CAT1	0,45	$1,9 \times 10^{-6}$	$1,5 \times 10^{-6}$
	CAT2	1,0	$1,0 \times 10^{-6}$	
Santa Maria Membro Alemoa	SMA1	1,5	$6,0 \times 10^{-8}$	$2,2 \times 10^{-8}$
	SMA2	1,75	$2,3 \times 10^{-8}$	
	SMA3	1,0	$7,2 \times 10^{-9}$	
	SMA4	1,0	$1,0 \times 10^{-8}$	
	SMA 5	1,3	$8,8 \times 10^{-9}$	
Santa Maria Passo das Tropas	SMP1	6,65	$2,6 \times 10^{-7}$	$2,9 \times 10^{-6}$
	SMP2	6,50	$3,6 \times 10^{-6}$	
	SMP3	6,82	$2,7 \times 10^{-6}$	
	SMP4	6,57	$3,6 \times 10^{-6}$	
	SMP5	0,50	$7,0 \times 10^{-6}$	
	SMP6	0,85	$6,5 \times 10^{-7}$	

A Formação Botucatu apresentou valores médios de coeficiente de condutividade hidráulica na ordem de  $2,8 \times 10^{-6}$  m/s. Valores estes similares aos encontrados por Pinheiro (2000) ao estudar os arenitos intertraps desta formação na cidade de Santa Cruz do Sul.

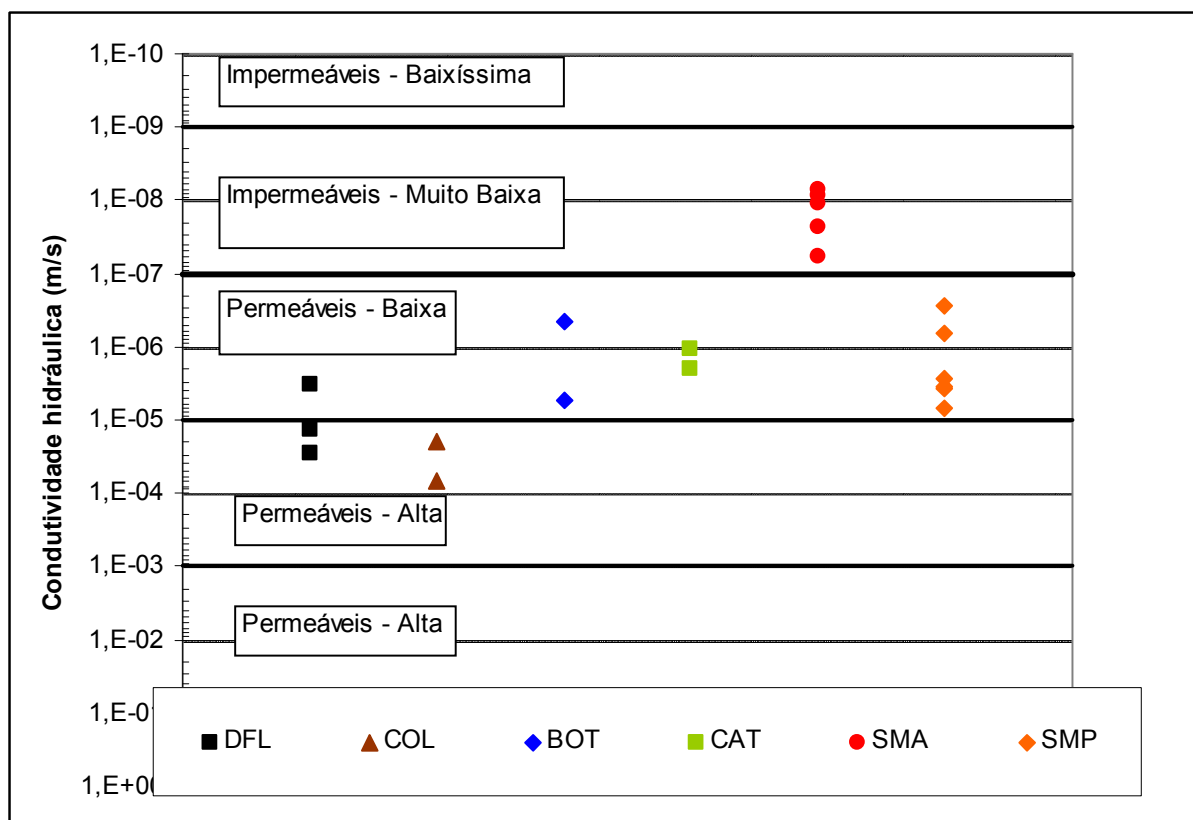


Figura 5.19 – Representação gráfica dos resultados dos ensaios de condutividade com a técnica do piezômetro.

Os resultados obtidos para os perfis da Formação Caturrita foram similares ao encontrados para a Formação Botucatu. A condutividade hidráulica obtida foi na ordem de  $10^{-6}$  m/s.

Os valores mais baixos de condutividade hidráulica obtidos foram para a parte superior da Formação Santa Maria (Membro Alemoa). Formação na qual, predominam materiais mais finos (siltes e argilas) em relação à fração areia. A condutividade hidráulica variou de  $6,0 \times 10^{-8}$  a  $7,2 \times 10^{-9}$  m/s. Estes resultados indicam que a formação é caracterizada como impermeável (Figura 5.19). Pinheiro (2000) encontrou valores de condutividade entre  $5,2 \times 10^{-8}$  x a  $4,1 \times 10^{-9}$  m/s para esta formação em estudos de estabilidade de encostas na cidade de Santa Cruz do Sul.

O Membro Passo das Tropas (parte inferior da formação Santa Maria) onde predominam as frações areia grossa/média sobre a fina os resultados dos ensaios apresentam uma condutividade hidráulica entre  $2,7 \times 10^{-6}$  (mais permeáveis) a  $6,5 \times 10^{-7}$  m/s. Sendo que o menor valor de condutividade (SMP6) foi encontrado para o perfil onde predomina a areia média sobre a grossa, perfil este classificado como um material de alteração desta unidade (solo saprolítico).

#### 5.4 Poços tubulares e vulnerabilidade dos aquíferos

Para estabelecer o índice de vulnerabilidade natural dos aquíferos inicialmente realizou-se um cadastro de 40 poços tubulares na área de estudo, mas devido à aglomeração de alguns poços em determinadas regiões e por apresentarem características geológicas semelhantes, optou-se por espacializar 36 poços. Todos os poços cadastrados apresentaram as informações necessárias para a aplicação da metodologia “GOD”, ou seja: o **G**rau de confinamento, a **O**corrência de substrato litológico e a **D**istância da superfície do terreno ao nível da água subterrânea.

Segundo o Plano Ambiental Municipal de (2002) o município possui em torno de 90% dos poços profundos abertos ilegalmente, estando estas águas normalmente contaminadas, porém, salienta-se que os poços selecionados nesta pesquisa são os poços que estão no cadastro de usuários de poços subterrâneos SIAGAS, com diâmetros iguais ou superiores a 4” (polegadas), operados com bomba submersa. Não considerou-se os poços tubulares (menor diâmetro) operados com “airlift” (compressor), muito comuns na cidade. O Anexo A apresenta o número de poços cadastrados com suas respectivas informações. A Figura 5.20 apresenta a espacialização dos 36 poços tubulares.

Do total de poços cadastrados na área de estudo 18 estão penetrantes na Formação Santa Maria Membro Alemoa, 11 na Formação Caturrita, 3 na Formação Santa Maria Passo das Tropas, 2 na Formação Rosário do Sul e 2 em Basaltos e Diabásio Serra Geral. A Formação Santa Maria é que abrange maior superfície exposta dentro da área de estudo, portanto, comporta o maior número de poços.

Com relação ao índice de vulnerabilidade natural dos aquíferos, após classificar os poços de acordo os procedimentos descritos no item 3.4 da metodologia, obteve-se o produto dos 3 parâmetros avaliados (Grau de confinamento, Ocorrência do substrato geológico e Distância ao nível de água subterrânea).

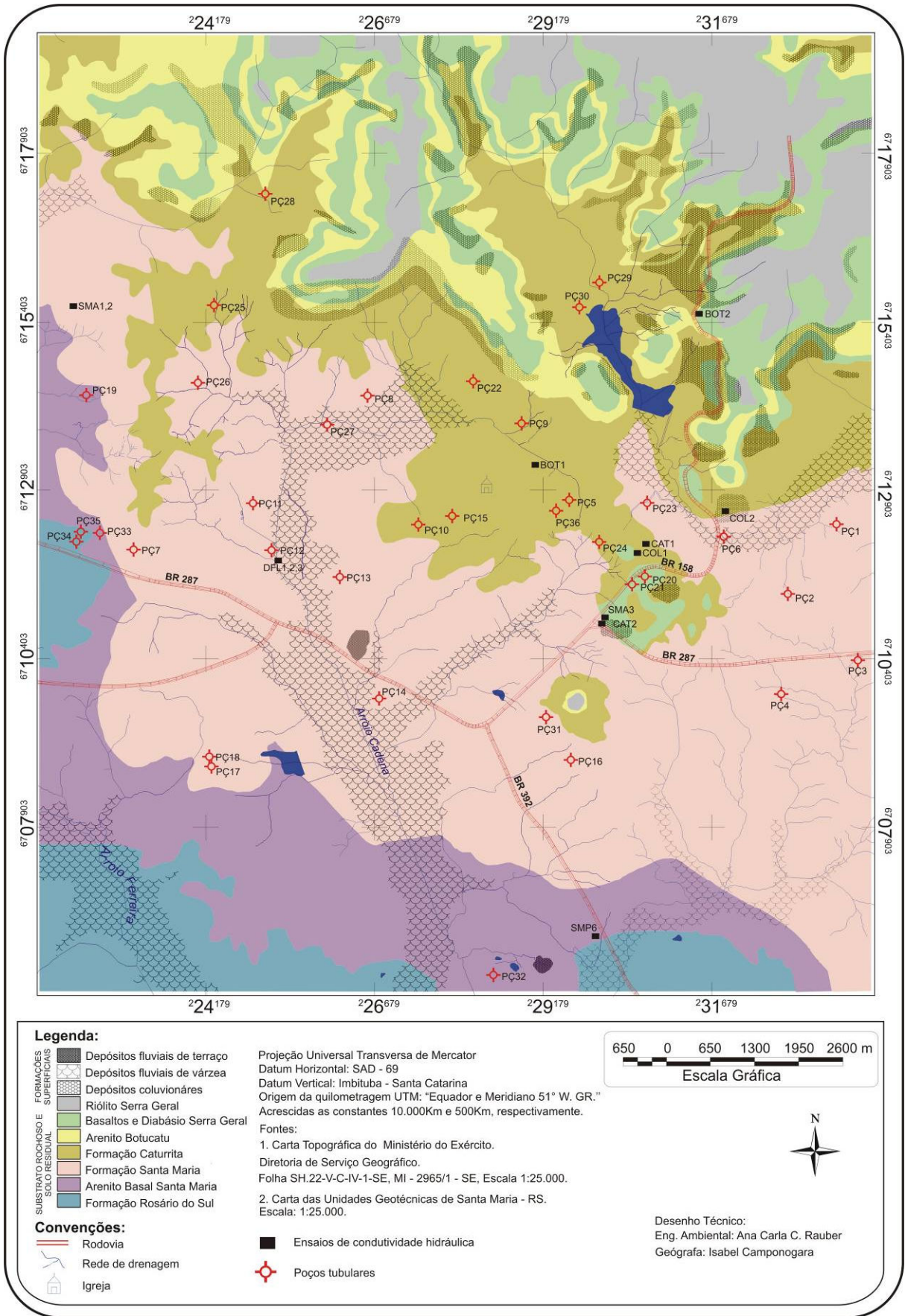


Figura 5.20 – Espacialização dos poços tubulares e dos ensaios de condutividade hidráulica.

Na área de estudo para o parâmetro grau de confinamento (**G**), foram encontrados três tipos de aquíferos (confinados, semi-confinados e livres). Para aquíferos semi-confinados é atribuído um valor de  $G = 0,4$ ; para aquíferos confinados este valor é  $G = 0,2$  e o valor  $G = 1$  para aquíferos não confinados ou livres. Estes valores foram atribuídos com base na formação geológica penetrada por cada poço, e também com base em alguns perfis de poços disponíveis no SIAGAS. Nota-se na Tabela 5.4 que a maioria dos poços estudados encontra-se em aquíferos semi-confinados. Estes aquíferos apresentam camadas interdigitadas com composição argilosa-siltosa de baixa permeabilidade e espessuras variáveis em função dos paleoambientes deposicionais.

Os valores atribuídos para a ocorrência do substrato litológico (**O**) apresentados na Tabela 5.4 foram atribuídos conforme a metodologia apresentada (item 3.3). Para classificar cada poço estudado foi analisado o seu substrato suprajacente (ocorrência litológicas e grau de consolidação da zona não saturada ou camadas confinantes) com base na formação a qual estão inseridos, e também em perfis de poços disponíveis no SIAGAS. Observa-se que mais de 50% dos poços foi atribuído para O o valor igual a 0,65, pois os mesmos apresentam frações tanto de silte quanto de areia.

Para verificar a distância da superfície do terreno ao nível da água subterrânea (**D**), baseou-se na informação da altura do nível estático dos poços cadastrados no SIAGAS. O Anexo A apresenta o nível estático de cada poço. A Tabela 5.4 apresenta os valores atribuídos para cada altura de nível estático dos poços estudados. Verifica-se uma variação significativa da altura do nível estático dos poços (inferiores a 5m e superiores a 50m), que ocasionou valores deste parâmetro variando entre  $D = 0,6$  e  $D = 0,9$ . Salienta-se que quanto mais raso for o nível da água maior é o risco de contaminação a partir de uma carga imposta na superfície do terreno, portanto nota mais elevada.

A Figura 5.21 ilustra o perfil de um poço tubular (poço 10) Tabela 5.4, obtido no SIAGAS, ilustrando-se as formações geológicas penetradas e os parâmetros resultantes da aplicação da metodologia GOD, com as respectivas notas atribuídas



Tabela 5.4 – Índice de Vulnerabilidade natural do aquífero.

Código	UTM E	UTM N	Localização	G	O	D	Índ. Vuln.	Classificação
PÇ1	233500	6712400	Camobi	0,2	0,65	0,6	0,07	Insignificante
PÇ2	232800	6711400	Vila Farroupilha	0,2	0,65	0,6	0,07	Insignificante
PÇ3	233800	6710400	Camobi	0,2	0,65	0,7	0,09	Insignificante
PÇ4	232700	6709800	São José	0,2	0,65	0,7	0,09	Insignificante
PÇ5	229600	6712700	Esc.Form.Sargentos	1	0,7	0,8	0,56	Alta
PÇ 6	231700	6712200	Vila Bilibiu	0,2	0,56	0,6	0,06	Insignificante
PÇ 7	223000	6712000	Cohab Santa Maria	0,2	0,65	0,7	0,09	Insignificante
PÇ 8	226500	6714300	Vila Kennedy	0,2	0,65	0,7	0,09	Insignificante
PÇ 9	228800	6713900	Bairro Itararé	1	0,7	0,8	0,56	Alta
PÇ 10	227300	6712400	PCA dos Bombeiros	0,4	0,56	0,7	0,15	Baixa
PÇ 11	224800	6712700	PQ. Man. Exército	0,2	0,65	0,8	0,1	Insignificante
PÇ 12	225100	6712000	Vila Rigão	0,2	0,65	0,9	0,11	Baixa
PÇ 13	226100	6711600	Est. Trat. Esgoto	0,2	0,65	0,8	0,1	Insignificante
PÇ 14	226700	6709800	Vila Urlândia	0,2	0,65	0,8	0,1	Insignificante
PÇ 15	227800	6712500	Praça Satur. Brito	1	0,7	0,7	0,49	Média
PÇ 16	229550	6708900	Vila Tomazzetti	0,2	0,65	0,6	0,07	Insignificante
PÇ 17	224200	6708800	Campo Instrução	0,2	0,65	0,6	0,07	Insignificante
PÇ 18	224200	6708900	Campo Instrução	0,2	0,65	0,7	0,09	Insignificante
PÇ 19	222300	6714300	Faz. Santa Marta	1	0,8	0,7	0,56	Alta
PÇ 20	230600	6711600	Sem.Vicente Palloti	0,2	0,65	0,7	0,09	Insignificante
PÇ 21	230400	6711500	Colégio Marista	0,2	0,65	0,7	0,09	Insignificante
PÇ 22	228100	6714500	B. Perpétuo Socorro	0,2	0,65	0,7	0,09	Insignificante
PÇ 23	230700	6712700	Patio da RFFSA	0,2	0,65	0,7	0,09	Média
PÇ24	230000	6712100	Casa Retiro Sant.	1	0,7	0,8	0,56	Alta
PÇ25	224200	6715600	Caturrita	1	0,7	0,8	0,56	Alta
PÇ26	224000	6714500	Caturrita	0,2	0,65	0,8	0,14	Baixa
PÇ27	225900	6713900	Santa Maria	0,2	0,65	0,8	0,1	Insignificante
PÇ28	225000	6717300	Caturrita	1	0,7	0,9	0,63	Alta
PÇ29	230000	6715900	Campestre M. Deus	1	0,7	0,9	0,63	Alta
PÇ30	229700	6715600	Cam.M.Deus CEEE	1	0,7	0,7	0,49	Média
PÇ31	229200	6709500	Seminario São José	0,2	0,65	0,7	0,09	Insignificante
PÇ32	228400	6705700	Estância Minuano	1	0,8	0,7	0,56	Alta
PÇ33	222556	6712203	CVI Ltda	0,4	0,63	0,7	0,17	Baixa
PÇ34	222275	6712111	CVI Ltda	0,4	0,63	0,7	0,17	Baixa
PÇ35	222308	6712227	CVI Ltda	0,4	0,63	0,7	0,17	Baixa
PÇ36	229403	6712570	Clube Dores, Centro	0,4	0,7	0,6	0,16	Baixa

.A determinação do índice de vulnerabilidade foi obtida pela multiplicação destes 3 parâmetros. Os valores encontrados variaram desde 0,07 a 0,63 (faixa de vulnerabilidade insignificante a alta). Na área de estudo das 5 classes possíveis quanto ao grau de vulnerabilidade natural dos aquíferos apresentou 4 (Insignificante, Baixa, Média e Alta). Não apresentando nenhum poço com vulnerabilidade extrema.

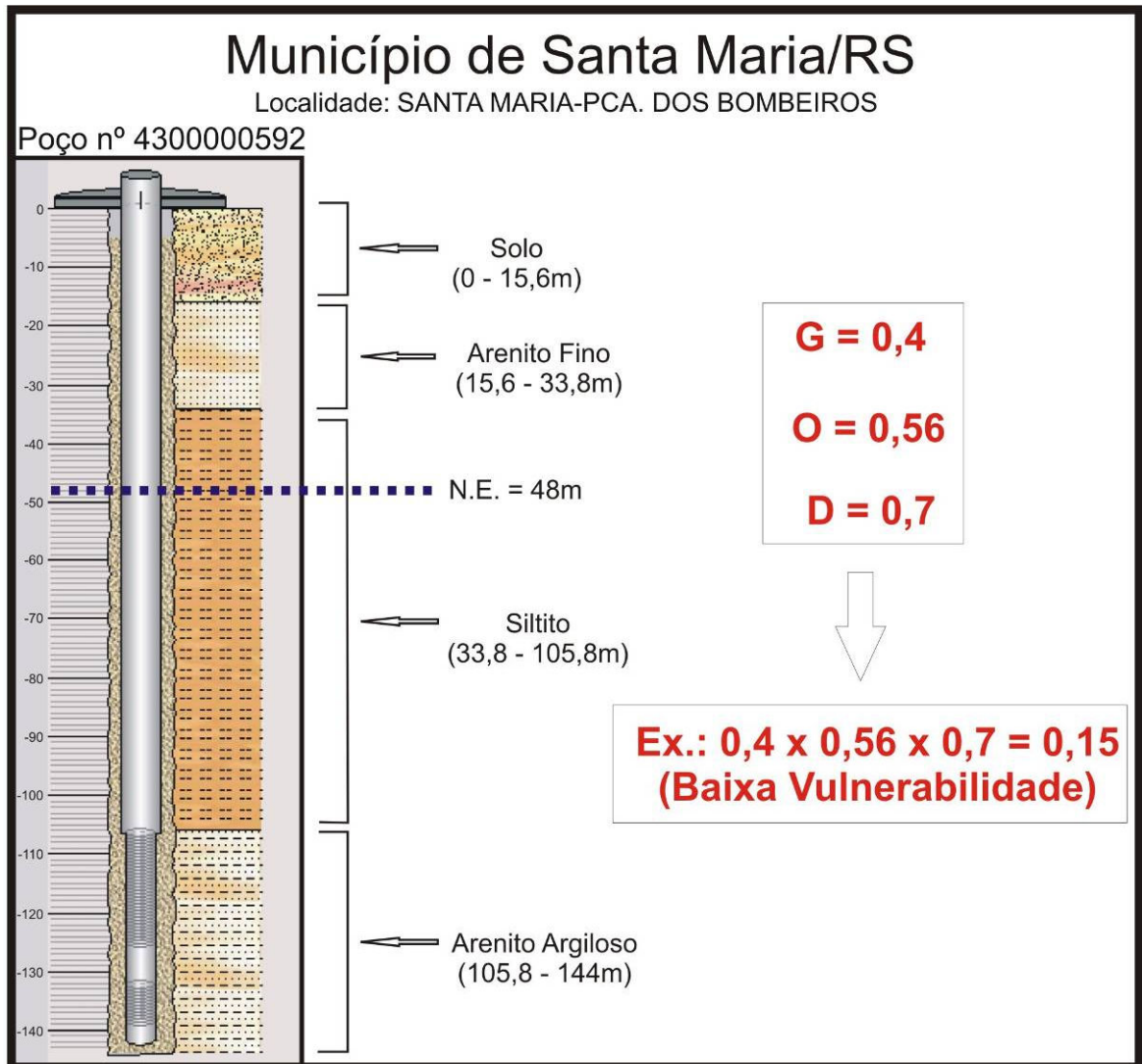


Figura 5.21 – Perfil de um poço tubular inserido na área de estudo (Poço 10), SIAGAS (2008).  
Org.: RAUBER, Ana. C.C.(2008)

A Figura 5.22 apresenta a espacialização das classes de vulnerabilidade utilizando o programa SURFER 8.0.

Analisando-se a Figura 5.22, nota-se que 15 poços estão inseridos na classe de vulnerabilidade insignificante, 10 poços na classe alta e 11 poços na classe de vulnerabilidade baixa. Ao comparar as classes de vulnerabilidade natural dos aquíferos com a localização dos poços na carta das Unidades Geotécnicas de Maciel Filho (1990), confirmam-se as descrições geológicas e hidrogeológicas da área de estudo.

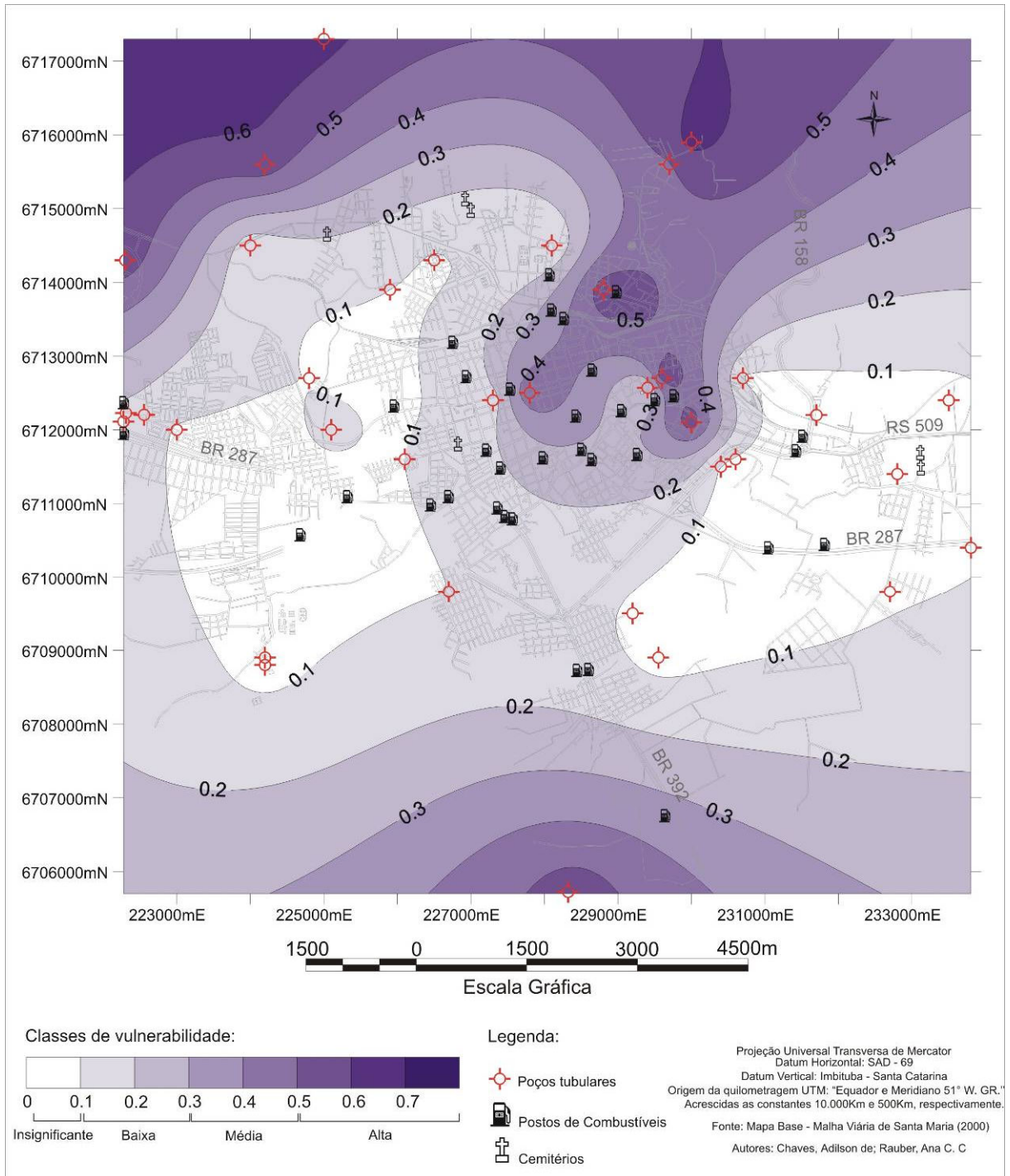


Figura 5.22 – Cartograma do índice de vulnerabilidade natural dos aquíferos.

Os poços localizados na classe de vulnerabilidade insignificante apresentam características conforme descritas na Formação Santa Maria Membro Alemoa, sendo a mesma descrita como uma camada impermeável na parte superior, composta por siltitos argilosos maciços e arenitos argilosos. Devido aos arenitos argilosos a formação também é classificada como semipermeável em sua parte

inferior. Os resultados dos ensaios de condutividade hidráulica nesta unidade geotécnica (SMA) também confirmam as características de material praticamente impermeável. Segundo Maciel Filho (1990) esta unidade é considerada um Aquicludo, isto é, reserva água, mas não transmite (baixo coeficiente de permeabilidade).

Ao confrontar a classe de vulnerabilidade alta demonstrada na Figura 5.22, com a carta das unidades geotécnicas (Figura 5.20), percebe-se que os poços inseridos que apresentaram alta vulnerabilidade estão em maior concentração na Formação Caturrita, e em menor proporção na Formação Santa Maria Passo das Tropas. A Formação Caturrita apresenta-se como um aquífero com camadas semipermeáveis e impermeáveis, e na Formação Santa Maria Passo das Tropas o aquífero pode ser livre e permeável, variando de acordo com o material encontrado no depósito sedimentar. Os poços localizados diretamente sobre a Formação Passo das Tropas apresentam lençol livre, e com uma ocorrência litológica que não protege o aquífero, tendo uma vulnerabilidade elevada (poços 19 e 32).

Os poços enquadrados na classe de vulnerabilidade baixa foram encontrados em várias Formações, dentre elas: Caturrita, Santa Maria (Alemoa e Passo das Tropas) e Rosário do Sul. Esta classe de vulnerabilidade não apresenta muito risco por ser de baixa vulnerabilidade, mas deve ser monitorada.

Analisando ainda o cartograma do índice de vulnerabilidade natural dos aquíferos (Figura 5.22), nota-se que 19 postos de combustível estão localizados na classe de vulnerabilidade baixa, 8 postos na classe de vulnerabilidade média, 7 postos na classe de vulnerabilidade insignificante e somente 1 na classe de vulnerabilidade alta, próximo do (poço 9) Tabela 5.4 o qual apresentou-se associado a um aquífero livre, portanto recebendo nota máxima no parâmetro G, logo com um risco muito maior de contaminação em caso de haver vazamento no posto de combustível.

## **5.5 Superfície Potenciométrica**

O conhecimento da direção da inclinação da superfície potenciométrica é importante por que indica a tendência da direção do movimento do fluxo da água subterrânea. A Figura 5.23 apresenta o fluxo da água subterrânea na área de

estudo. O sentido do fluxo é indicado pelas setas pretas. O Anexo A também apresenta a determinação da superfície potenciométrica para cada poço.

Os valores de superfície potenciométrica variaram entre 180 a 40m. O sentido do fluxo da água subterrânea sempre ocorre do maior potencial ao menor potencial hidráulico.

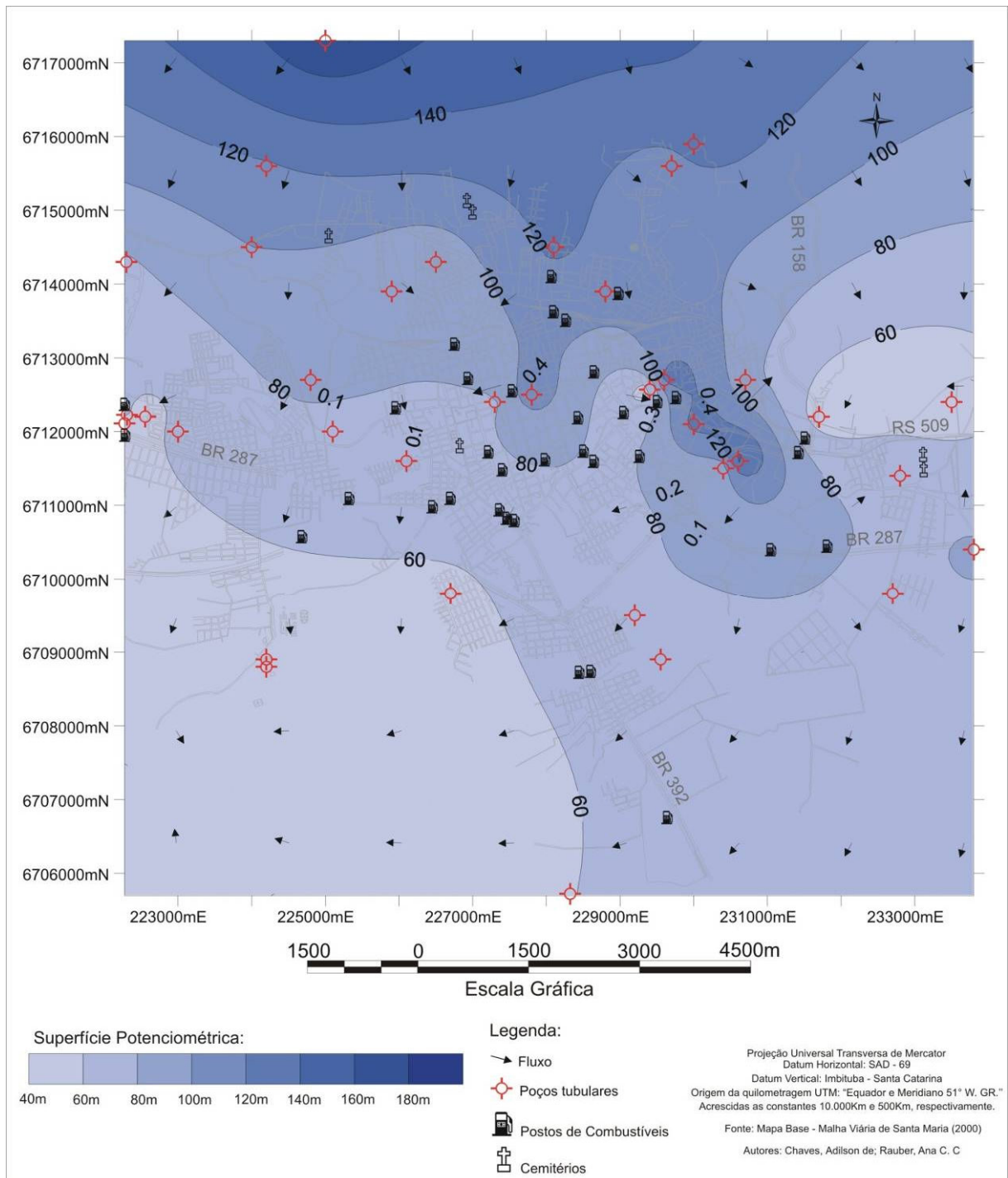


Figura 5.23 – Cartograma da superfície potenciométrica.

Observa-se no cartograma que o fluxo da água subterrânea parte do Norte para Sudoeste e Sudeste. Ao comparar o cartograma com a coluna estratigráfica da região (Figura 4.2) nota-se que nas regiões de cotas mais elevadas tem-se as formações geológicas que conferem comportamento hidrogeológico de camadas impermeáveis e semipermeáveis, e nas regiões de cotas inferiores ocorre algumas formações mais permeáveis. Tudo indica que caso ocorra um problema de poluição da água subterrânea em regiões de cotas mais elevadas a tendência deste contaminante atingir regiões de cotas mais baixas e abranger maior área é alta.

Nota-se também na Figura 5.23 um alto potenciométrico (poço 28, Figura 5.20) no extremo NW (Noroeste) do cartograma pertencente à Formação Caturrita. Existem dois baixos potenciométricos no setor NE (Nordeste) e SW (Sudoeste), onde as direções de fluxo mostram-se diferentes. Observando-se a localização do baixo potenciométrico existente no setor SW percebe-se que o fluxo subterrâneo neste setor apresenta direção de Leste para Oeste, indicando uma contribuição do aquífero para a perenização dos cursos de água Arroio Cadena e Arroio Ferreira (Figura 5.20).

## **5.6 Espacialização de fontes potenciais de poluição urbana**

Para avaliar o risco de poluição dos recursos naturais nos aspectos físicos em áreas urbanas, deve-se conhecer as condições ambientais locais, tais como: substrato litológico, características geotécnicas, vulnerabilidade natural dos aquíferos, dentre outras. Dentre as fontes potenciais de poluição urbana apresentadas nesta pesquisa estão: postos de combustíveis, cemitérios e áreas de depósitos de resíduos sólidos (lixo).

Os postos de combustíveis estão entre os principais responsáveis pela contaminação das águas subterrâneas e do solo em diversas regiões urbanas do Brasil, normalmente as águas subterrâneas de áreas onde estão localizados postos de combustível são contaminadas sistematicamente por vazamentos de combustíveis, os quais ocorrem em sua maior parte em função de perfurações ou rachaduras nos tanques de armazenamento.

Conforme levantamento realizado por Garcia (2004) tem-se inseridos na área de estudo 35 postos de combustíveis, sendo que 24 postos localizam-se na área central do município. A Tabela 5.5 apresenta os 35 postos, sua localização e a unidade geotécnica na qual estão inseridos.

Tabela 5.5 – Tabela de localização dos 35 postos de combustíveis na área de estudo.

Postos	Localização Rua/Avenida	Unidade Geotécnica	Coordenadas	
			Leste	Norte
PT1	Maranhão	Rosário do Sul	221905	6711878
PT2	Pedro Cezar Saccol	Rosário do Sul	221967	6712223
PT3	BR 158	Santa Maria Alemoa	224607	6710566
PT4	Nelson Jobim	Depósitos fluviais de Várzea	225498	6711056
PT5	Presidente Vargas	Santa Maria Alemoa	227385	6711468
PT6	Presidente Vargas	Santa Maria Alemoa	226436	6710959
PT7	Presidente Vargas	Santa Maria Alemoa	226681	6711070
PT8	Ernesto Becker	Caturrita	228241	6713480
PT9	Manoel ribas	Caturrita	228095	6713589
PT10	Sete de Setembro	Caturrita	228054	6714073
PT11	Assis Brasil	Caturrita	228968	6713845
PT12	André marques	Caturrita	228629	6712805
PT13	Pinheiro Machado	Caturrita	228435	6712152
PT14	Fernando Ferrari	Santa Maria Alemoa	229254	6711655
PT15	Venâncio Aires	Santa Maria Alemoa	225941	6712312
PT16	Barão do Triunfo	Caturrita	227527	6712532
PT17	Borges de Medeiros	Caturrita	226937	6712699
PT18	Borges de Medeiros	Santa Maria Alemoa	226734	6713187
PT19	Borges de Medeiros	Santa Maria Alemoa	227192	6711725
PT20	Ângelo Bolson	Santa Maria Alemoa	227398	6710867
PT21	Ângelo Bolson	Santa Maria Alemoa	227469	6710831
PT22	Medianeira	Santa Maria Alemoa	227552	6710840
PT23	Medianeira	Santa Maria Alemoa	227979	6711608
PT24	Medianeira	Caturrita	228500	6711721
PT25	Medianeira	Caturrita	228567	6711707
PT26	Medianeira	Caturrita	229033	6712248
PT27	Dores	Caturrita	229456	6712398
PT28	Dores	Caturrita	229735	6712427
PT29	João Luiz Pozzobon	Santa Maria Alemoa	231421	6711836
PT30	João Luiz Pozzobon	Santa Maria Alemoa	231396	6711782
PT31	BR 392	Santa Maria Alemoa	228441	6708716
PT32	BR 392	Santa Maria Alemoa	228559	6708724
PT33	BR 392	Santa Maria Passo Tropas	229624	6706751
PT34	BR 287	Santa Maria Alemoa	231036	6710368
PT35	BR 287	Santa Maria Alemoa	231798	6710427

Fonte: Garcia (2004).  
Org.: Rauber, Ana C. C. (2008).

A Figura 5.24 apresenta a espacialização dos postos na Carta das Unidades Geotécnicas de Maciel Filho (1990).

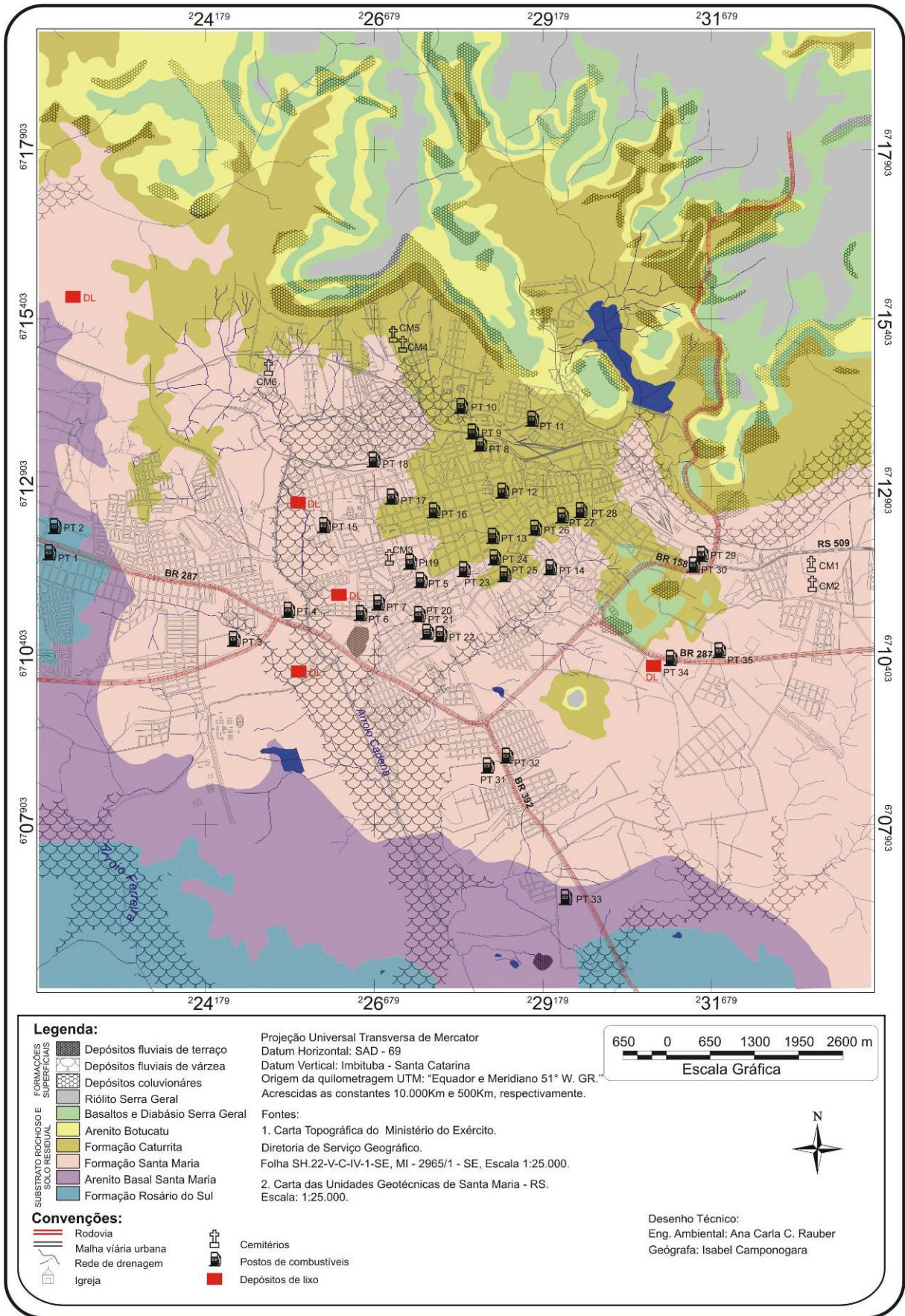


Figura 5.24 – Especialização dos postos de combustíveis, cemitérios e áreas de depósitos de lixo.



Verifica-se na Figura 5.24 que 18 postos encontram-se na Formação Santa Maria Membro Alemoa. Esta formação apresenta características de impermeável a semipermeável. Em caso de vazamentos em postos de combustíveis, é provável que os contaminantes não atinjam o lençol freático devido a sua baixa permeabilidade natural, mas ocorrerá a contaminação dos solos no local. Esta formação apresenta características que a tornam mais apropriada para a instalação de empreendimentos potencialmente poluidores dos recursos naturais, mas deve-se sempre respeitar o que a legislação ambiental prevê.

Na Formação Caturrita encontram-se 13 postos de combustíveis. Esta formação apresenta certa complexidade com aquíferos com camadas semipermeáveis e impermeáveis, pode ser constituída por arenitos com silte e argila ou por arenitos grosseiros. A urbanização se desenvolve sobre esta unidade, segundo Maciel Filho (1990) ela já se encontra em grande parte poluída, sendo normalmente desprezado pelos perfuradores de poços profundos.

Nos Depósitos Fluviais de várzea está localizado somente um posto de combustível. Este depósito é do Arroio Cadena, desenvolveu-se sobre a Formação Santa Maria Alemoa. Segundo descrições de Maciel Filho (1990) e com os resultados apresentados na Tabela 5.3 (DFL) este depósito é permeável e com o lençol freático a pouca profundidade, estando em alguns locais e épocas do ano na superfície. Estes depósitos são bastante vulneráveis a contaminação, deve-se, portanto evitar a instalação de empreendimentos poluidores nestas áreas, mesmo estando situada acima da formação Santa Maria Membro Alemoa.

Nota-se que 2 postos estão espacializados na Formação Rosário do Sul. Nesta Formação não foram realizados ensaios de condutividade hidráulica, mas sabe-se pelas descrições da área de estudo que a mesma apresenta permeabilidade moderada a baixa, mas deve-se observar as fontes de poluição, pois o nível freático esta muito próximo da superfície.

Na Formação Santa Maria Passo das Tropas encontra-se apenas um posto de combustível. Esta formação apresenta alta permeabilidade, pois é formada principalmente por arenitos. O aquífero pode ser livre e confinado. Insere-se também sobre esta formação um frigorífico de grande porte (fora da área de estudo), outra fonte potencial de poluição. Próxima deste empreendimento também existe um aterro de resíduos industriais perigosos (ARIP). Como esta formação é bastante explorada, por possuir um aquífero com grande quantidade de água, as fontes

potenciais de poluição situadas sobre eles devem adequar-se de modo a preservar as condições ambientais locais.

Vários trabalhos relacionados à contaminação por postos de combustíveis já foram realizados em Santa Maria. Garcia (2004) e Freitas da Silva (2006) apresentaram alguns postos que enfrentaram problemas de vazamentos nos tanques de armazenamento de combustíveis, todos localizados na área central do município.

Outra fonte potencialmente poluidora são os cemitérios. Os restos mortais tornam-se perigosos poluentes em função do seu processo de decomposição, que origina o necrochorume. Por exemplo, a localização e a operação inadequadas de sepultamentos em meios urbanos podem provocar a contaminação do solo e mananciais hídricos. Percebe-se que estudos sobre cemitérios são recentes no Brasil, a legislação que obriga a adequação dos cemitérios é de 2003.

Com base no levantamento de Garcia (2004) na área de estudo localizam-se 6 cemitérios. Dentre eles, 4 estão inseridos na unidade Santa Maria membro Alemoa e 2 na unidade Caturrita. A Figura 5.24 apresenta a espacialização dos cemitérios na área de estudo. A Tabela 5.6 apresenta a identificação e a localização dos cemitérios.

Tabela 5.6 - Localização dos 6 cemitérios inseridos na área de estudo.

Cemitério	Nome	Localização	Coordenadas		Unidade Geotécnica
			Leste	Norte	
CM1	Santa Rita de Cássia	RS 509	233091	6711665	Alemoa
CM2	São José	RS 509	233094	6711468	Alemoa
CM3	Ecumênico Municipal	Av. Borges de Medeiros	226812	6711797	Alemoa
CM4	São José	Chácara das Flores	226988	6714964	Caturrita
CM5	Israelita	Chácara das Flores	226912	6715117	Caturrita
CM6	Jardim da Saudade	Caturrita	225049	6714638	Alemoa

Fonte: Garcia (2004).  
Org.: Rauber (2008)

Considerando que as Formações Santa Maria Membro Alemoa e Caturrita apresentam características de impermeáveis a semipermeáveis, e analisando o cartograma de vulnerabilidade (Figura 5.22), no qual os cemitérios estão inseridos nas classes insignificante e baixa, considera-se estas Formações próprias para a

instalação de cemitérios, desde que proceda-se os estudos de monitoramento do nível freático da água, conforme a Resolução N° 335/2003 do CONAMA, e suas alterações.

A disposição inadequada de resíduos sólidos também é uma fonte importante de carga poluidora no subsolo, principalmente em locais onde o nível freático está próximo da superfície. Foi apresentada por Maciel Filho (1990) na carta dos condicionantes a ocupação de Santa Maria algumas áreas utilizadas como depósito ou aterro com lixo. Salienta-se que esta informação é de 1990, atualmente existem mais áreas como estas citadas, no município. As áreas de depósitos de lixo estão espacializadas na Figura 5.24.

Ao analisar a localização das áreas de depósitos de lixo (DL) na figura 5.24, nota-se que 3 áreas inserem-se em Depósitos Fluviais de Várzea do Arroio Cadena. Conforme já visto, estes Depósitos são permeáveis e com o lençol freático a pouca profundidade, portanto admite-se que o aquífero desta região esteja poluído. A outra área de depósito de lixo localiza-se na unidade Santa Maria Membro Alemoa, próximo a BR 287.

Durante muitos anos o lixo de Santa Maria foi depositado no lixão da Caturrita que com algumas medidas paliativas se tornou um aterro controlado. Porém, sempre apresentou muitos problemas operacionais e sociais. Atualmente este local está desativado e está em operação um aterro sanitário licenciado em uma área em frente ao antigo lixão. Neste local foram realizados ensaios de condutividade hidráulica identificando a litologia predominante como sendo da Formação Santa Maria Membro Alemoa (SMA). Devido aos resultados dos ensaios de condutividade hidráulica, esta Formação é considerada como impermeável, ou seja, favorável à instalação do empreendimento.

## 6 CONSIDERAÇÕES FINAIS E SUGESTÕES

O conhecimento das características geotécnicas e hidrogeológicas de uma determinada região são de fundamental importância para a execução de diagnósticos do meio físico, principalmente em áreas urbanas, onde situam-se as principais fontes potenciais de poluição, que degradam os recursos naturais devido às atividades antrópicas.

Nesta pesquisa, pode-se demonstrar, através dos mapas temáticos apresentados, que o uso de ferramentas de geoprocessamento, como os sistemas de informações geográficas (SIGs) tornaram-se uma ferramenta básica de planejamento, facilitando a análise espacial de dados e auxiliando na tomada de decisões. No diagnóstico urbano ambiental do município de Santa Maria os SIGs apresentaram-se como subsídios para a espacialização dos temas estudados e das fontes de poluição urbana, podendo ser utilizados em pesquisas futuras realizadas na região.

Foram caracterizadas as principais formações/unidades geotécnicas em Santa Maria. Os Depósitos Fluviais (DFL) são constituídos por sedimentos arenosos e argilosos inconsolidados dos principais arroios e rios da cidade. Os perfis arenosos, classificados como areia siltosa (SC-SM) apresentam uma condutividade hidráulica em torno de  $10^{-5}$  m/s. Com o aumento da fração argila este valor se eleva para  $10^{-6}$  m/s. Com estes resultados estes depósitos são considerados materiais permeáveis.

Ambos os Depósitos Coluvionares (COL) ensaiados apresentaram em sua matriz silte (ML), com clastos de arenitos e basaltos de vários tamanhos e grãos arredondados. Os ensaios de condutividade hidráulica apresentaram um valor médio de  $4,5 \times 10^{-5}$  m/s. Estes depósitos foram os materiais mais permeáveis na região de Santa Maria.

Os perfis da Formação Botucatu são classificados geotecnicamente como siltes (ML) a areias mal graduadas (SP-SM). Ambos perfis possuem a fração areia fina bastante significativa e a condutividade hidráulica foi fortemente afetada pela litificação. A condutividade hidráulica nesta unidade apresentou um valor médio de  $2,9 \times 10^{-6}$  m/s. Esta formação apresenta grãos bem arredondados, bem selecionados por tamanho, quartzosos e fração argila inferior a 10%.

Na Formação Caturrita os perfis são classificados de siltes (ML) a areias bem graduadas com silte (SW-SM), com fração argila inferior a 10%. Esta unidade apresentou condutividade hidráulica média de  $1,5 \times 10^{-6}$  m/s.

O Membro Alemoa da Formação Santa Maria apresentam predominância das frações finas (siltes e argilas), sendo classificado como argila pouco plástica (CL) a argila muito plástica (CH). Nesta formação foram obtidos os valores mais baixos de condutividade hidráulica em toda região de Santa Maria. Apresenta valores médios de condutividade hidráulica de  $2,2 \times 10^{-8}$  m/s. Este valor representa que esta unidade é praticamente impermeável.

O membro Passo das Tropas da Formação Santa Maria os perfis estudados apresentam a predominância das frações areia (média a grossa), e são classificados geotecnicaamente como areia mal graduada com ou sem silte (SP-SM) e areia siltosa (SM). Esta unidade apresenta uma condutividade média de  $2,9 \times 10^{-6}$  m/s, o que define a unidade como permeável.

Assim as diferentes unidades avaliadas indicaram diferentes faixas de permeabilidade mesmo na mesma unidade geotécnica o que indica que tanto a água de infiltração para os aquíferos apresentaram diferentes condições de recarga. Assim apresenta-se uma contribuição para a gestão das águas subterrâneas como um subsídio na avaliação das reservas anuais renováveis.

Com relação à vulnerabilidade natural do aquífero, a área de estudo apresentou as seguintes classes de vulnerabilidade: insignificante, baixa, média e alta, para os 36 poços avaliados. O conhecimento das classes de vulnerabilidade de uma determinada região é importante para indicar os locais mais adequados para instalação de futuros empreendimentos, potencialmente poluidores do meio ambiente. É uma ferramenta que deve ser utilizada no desenvolvimento de projetos e políticas urbanas para o uso e ocupação do solo e proteção dos recursos naturais, e conseqüentemente manter a qualidade de vida nos centros urbanos.

O método "GOD", aplicado nesta pesquisa para a verificação do índice de vulnerabilidade natural dos aquíferos, foi bastante eficiente, possibilitando a verificação da vulnerabilidade em toda a área da Folha de Santa Maria. A faixa de vulnerabilidade variou de insignificante (0,07) a alta (0,63). Observou-se no cartograma de vulnerabilidade que a classe de vulnerabilidade alta (poços 19 e 32) compreende a área da Formação Santa Maria Membro Passo das Tropas, a qual é caracterizada como permeável.

As fontes potenciais de contaminação urbanas abordadas nesta pesquisa foram: 35 postos de combustíveis, 6 cemitérios e 4 depósitos de lixo. Salienta-se que existem muitas outras fontes no município de Santa Maria, mas optou-se pelo levantamento somente destas três, pois são significativas na área de estudo, e apresentam-se em maior volume. Não se considerou os esgotos, os lava-à-jato, oficinas mecânicas e o distrito industrial.

Ao espacializar as fontes potenciais observou-se que 19 postos de combustíveis inserem-se na classe de vulnerabilidade baixa, 8 na classe média, 7 na classe insignificante e apenas um insere-se na classe de vulnerabilidade alta. A maioria dos postos localizam-se nas unidades Santa Maria Membro Alemoa e Caturrita, as quais apresentam camadas semipermeáveis e impermeáveis.

Com relação aos 6 cemitérios instalados na Folha de Santa Maria, 4 estão sobre a Formação Santa Maria membro Alemoa, portanto, impermeável. Inserem-se nas classes de vulnerabilidade insignificante e baixa, mas em função da carga contaminante imposta, os cemitérios podem representar risco de degradação do meio ambiente.

Outra fonte de poluição existente no município de Santa Maria são as áreas clandestinas de depósitos de lixo. O lixo doméstico é causador de impacto ambiental significativo, degrada a qualidade do solo e da água superficial ou subterrânea da área onde estiver localizado, além de ser proliferador de doenças de veiculação hídrica.

Atualmente a legislação é bem mais rígida com relação a destinação do lixo doméstico, prevê a destinação do lixo em aterros sanitários, onde exige-se por exemplo, que os solos do local possuam uma condutividade hidráulica na ordem de  $10^{-7}$  m/s, impedindo a infiltração do chorume em aquíferos ou formação de pluma de contaminação, caso ocorra vazamentos. Mas, mesmo o município de Santa Maria que já possui um aterro sanitário, ao passar pelas periferias da cidade percebe-se muitas áreas utilizadas para descarte de lixo. Não deve ser esquecido pela sociedade civil e prefeitura municipal o passivo ambiental do Lixão da Caturrita desativado recentemente.

Com relação às unidades geotécnicas da região de Santa Maria sugere-se para futuras pesquisas que sejam realizados mais ensaios de caracterização em cada unidade, com a finalidade de melhor identificá-las, e também que sejam caracterizadas as unidades Serra Geral e Rosário do Sul.

O município de Santa Maria possui outras fontes de poluição urbana, além daquelas apresentadas nesta pesquisa. Sugere-se, portanto que sejam realizadas pesquisas sobre as oficinas mecânicas, o distrito industrial, e principalmente saneamento básico (esgoto), pois segundo Garcia (2004) no município apenas 30% dos esgotos estavam ligados à rede coletora e eram tratados, tendo o restante um destino incerto. Os frigoríficos e os abatedouros, tanto de bovinos, suínos e aves também merecem destaque, pois, conforme dados do Plano Ambiental Municipal (2002) existem 17 estabelecimentos agroindustriais em Santa Maria, alguns com esterqueiras com diferentes graus de eficiência.

Assim conclui-se que os objetivos da pesquisa foram atingidos obtendo-se uma espacialização de vários parâmetros os quais servirão de subsídios aos órgãos gestores ambientais.

A pesquisa traz dados técnicos executados com rigor metodológico e método científico, disponibilizando informações a sociedade civil. Utilizou-se diferentes ferramentas de avaliação no laboratório, de campo, de geotecnologias integrando homem e seu meio físico.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALBUQUERQUE FILHO, J. L. **Oscilações Induzidas no freático e as repercussões ao uso do solo**. In: Curso de geologia aplicada ao meio ambiente. ABGE-IPT, São Paulo, 1995, p. 135 – 148.

ANA – Agência Nacional de Águas. **Panorama da Qualidade das Águas Subterrâneas no Brasil**. Brasília: ANA, 2005.

AQUÍFERO GUARANI. Disponível em: <<http://www.oaquiferoguarani.com.br>>. Acesso em: 20 Out. 2008.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR6508**: Solo: Determinação da massa específica. Rio de Janeiro, 1984. 8p.

\_\_\_\_\_. **NBR7180**: Solo: Determinação do limite de plasticidade. Rio de Janeiro, 1984. 3p.

\_\_\_\_\_. **NBR7181**: Solo: Análise granulométrica. Rio de Janeiro, 1984. 3p.

\_\_\_\_\_. **NBR6459**: Solo: Determinação do limite de liquidez. Rio de Janeiro, 1984. 6p.

\_\_\_\_\_. **NBR13784**: Detecção de vazamentos em postos de serviço. Rio de Janeiro, 1997. 8p.

\_\_\_\_\_. **NBR14623**: Posto de serviço – Poço de monitoramento para detecção de vazamento. Rio de Janeiro, 1997. 4p.

AZEVEDO, A. A.; FILHO, J. L. A. **Águas Subterrâneas** In: Geologia de Engenharia. OLIVEIRA, A. M. S., BRITO, S. N. A. São Paulo: ABGE, 1998. 110 – 130 p.

BARROS SARTORI, M. da G. **O clima de Santa Maria: do regional ao urbano**. 1979. 165f. Dissertação (Mestrado em Geografia Física) – Universidade de São Paulo, São Paulo, 1979.



BORTOLI, C. R. **Estudo numérico-experimental da condutividade hidráulica saturada/não saturada de um solo estruturado**. 1999. 121f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 1999.

BORTOLUZZI, C. A. **Contribuição à geologia da região de Santa Maria, Rio Grande do Sul, Brasil**. Pesquisas, Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 1974, 100 p.

BRAGA, B. **Introdução à Engenharia Ambiental**. São Paulo: Prentice Hall. 2002, 303 p.

BRASIL. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística - IBGE. Censo Demográfico 2007. Disponível em: <<http://www.ibge.gov.br/cidadesat/topwindow.htm?1>>. Acesso em: 25 Out. 2008.

\_\_\_\_\_. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística – IBGE. 2007. Disponível em: <<http://www.ibge.gov.br/cidadesat/default2.php>>. Acesso em: 30 Out. 2008.

\_\_\_\_\_. Agência Nacional de Petróleo – ANP. Disponível em: <<http://www.anp.gov.br/postos/consulta.asp>>. Acesso em: 15 Nov. 2008.

\_\_\_\_\_. Fundação Nacional de Saúde – FUNASA. Cemitérios como fonte potencial de contaminação das águas subterrâneas. Região de Cuiabá e Várzea Grande – MT. Brasília: FUNASA. 2007a, 119 p. Disponível em: <<http://www.funasa.gov.br/internet/arquivos/biblioteca/cemitFonte.pdf>>. Acesso em: 16 Nov. 2008.

\_\_\_\_\_. Ministério do Meio Ambiente – MMA. **Águas Subterrâneas, um recurso a ser conhecido e protegido**. Brasília, 2007b, 38 p.

\_\_\_\_\_. Lei nº 6.938 de 31 de Agosto de 1981. Dispõe sobre a Política Nacional do Meio Ambiente, seus fins e mecanismos de formulação e aplicação, e dá outras providências. **Diário Oficial [da] República Federativa do Brasil**, Brasília, DF, 8 dez. 1999. Disponível em: <<http://www.planalto.gov.br/ccivil/Leis/L6938org.htm>>. Acesso em: 24 Set. 2008.

CABRAL, J.; KOIDE, S.; SIMÕES, J. C.; MONTENEGRO, S. **Recursos Hídricos Subterrâneos**. In: PAIVA J. B. D. de PAIVA, M. C. D. de. Hidrologia Aplicada à gestão de Pequenas Bacias Hidrográficas. Porto Alegre: ABRH, 2001, p. 237 – 277.

CAMPONOGARA, I. **Vulnerabilidade Natural no Sistema Aquífero Guarani e Análise de Parâmetros Físico-Químicos das Águas Subterrâneas em Quarai, BR e Artigas, UY**. 2006. 108f. Dissertação (Mestrado em Geografia) – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2006.

CASSANEGO, M. L. **Nível do lençol freático em postos de combustível no município de Santa Maria – RS**. 2007. 21f. Trabalho final de graduação. Curso de Engenharia Ambiental – Centro Universitário Franciscano, Santa Maria, 2007.

CASSANEGO, M. L.; SILVÉRIO DA SILVA, J. L.; FERREIRA DA SILVA, R.; RAUBER, A. C. C.; DESCOVI FILHO, L. L. V. **Variação do Nível do Lençol Freático em Postos de Serviço no Município de Santa Maria – RS**. Submetido: Revista Brasileira de Recursos Hídricos. Santa Maria. 2008, 10 p.

CHAVES, A. de. **Análise dos Recursos Hídricos subterrâneos no município de São Luiz Gonzaga/RS**. 2007. 121f. Trabalho de Graduação. Curso de Geografia – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2007.

COMPANHIA DE PESQUISAS E RECURSOS MINERAIS. CPRM. 2008. Disponível em: < <http://www.cprm.gov.br> >. Acesso em: 10 Out. 2008.

\_\_\_\_\_. CPRM. Mapa hidrogeológico da Folha de Santa Maria. Escala 1:100.000, 1994.

\_\_\_\_\_. CPRM. Mapa hidrogeológico do Estado do Rio Grande do Sul. Escala 1:750.000, 2006.

CONSELHO NACIONAL DE RECURSOS HÍDRICOS. **Resolução CNRH Nº 15**, de 11 de janeiro de 2001. Diário Oficial da União, Brasília, DF, 22 Jan. 2001. Disponível em: < <http://www.cnrh-srh.gov.br/> >. Acesso em: 10 Nov. 2008.

CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE. **Resolução CONAMA Nº 273**, de 29 de Novembro de 2000 - "Dispõe sobre prevenção e controle da poluição em postos de combustíveis e serviços". Diário Oficial da União, nº 5, Brasília, DF, 08 Jan. 2001. Disponível em: <<http://www.mma.gov.br/port/conama/legiabre.cfm?codlegi=271>>. Acesso em: 14 Nov. 2008.

\_\_\_\_\_. **Resolução CONAMA Nº 001**, de 29 de Novembro de 2000 - "Dispõe sobre prevenção e controle da poluição em postos de combustíveis e serviços". Diário Oficial da União, nº 5, Brasília, DF, 08 Jan. 2001. Disponível em:

<<http://www.mma.gov.br/port/conama/legiabre.cfm?codlegi=271>>. Acesso em: 14 Nov. 2008.

\_\_\_\_\_. **Resolução CONAMA N° 319**, de 04 de Dezembro de 2002 – “Altera a Resolução 273/00 que dispõe sobre prevenção e controle da poluição em postos de combustíveis e serviços”. Diário Oficial da União, n° 245, Brasília, DF, 19 Dez. 2002. Disponível em: <<http://www.mma.gov.br/port/conama/legiabre.cfm?codlegi=341>>. Acesso em: 15 Nov. 2008.

\_\_\_\_\_. **Resolução CONAMA N° 335**, de 03 de Abril de 2003 - "Dispõe sobre o licenciamento ambiental de cemitérios". Diário Oficial da União, n° 101, Brasília, DF, 28 Mai. 2003. Disponível em: <<http://www.mma.gov.br/port/conama/legiabre.cfm?codlegi=359>>. Acesso em: 16 Nov. 2008.

\_\_\_\_\_. **Resolução CONAMA N° 368**, de 28 de Março de 2006 – “Altera a Resolução 335/03 que dispõe sobre o licenciamento ambiental dos cemitérios”. Diário Oficial da União, n° 61, Brasília, DF, 29 Mar. 2006. Disponível em: <<http://www.mma.gov.br/port/conama/legiabre.cfm?codlegi=488>>. Acesso em: 01 Dez. 2008.

\_\_\_\_\_. **Resolução CONAMA N° 402**, de 17 de Novembro de 2008 – “Altera a Resolução 335/03 que dispõe sobre o licenciamento ambiental dos cemitérios”. Diário Oficial da União, n° 224, Brasília, DF, 18 Nov. 2008. Disponível em: <<http://www.mma.gov.br/port/conama/legiabre.cfm?codlegi=590>>. Acesso em: 01 Dez. 2008.

CAPUTO, P. H. **Mecânica dos solos e suas aplicações**. Rio de Janeiro: 1983, 215 p.

EMMER, R. **Implantação do campo experimental de engenharia geotécnica da UFSM**. 2004. 176f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2004.

FERREIRA, D. C. **O lixo nosso de cada dia**. In: Ecologia e Meio Ambiente – RS. Porto Alegre, ano 1, n. 1, p. 40, 2004.

FOSTER, S. S. D.; HIRATA, R. C. A. **Contaminación de las águas subterráneas**. Organização Mundial de La Salud. Organização Panamericana de La Salud, Centro Panamericano de Ingeniería Sanitária y Ciências Del Ambiente. Lima, Peru, 1987.

\_\_\_\_\_. **Groundwater pollution risk evaluation: the methodology using available data**. Lima: CEPIS/PAHO/WHO, 1988.

\_\_\_\_\_. **A determinação do risco de contaminação das águas subterrâneas: um método baseado em dados existentes.** São Paulo: Instituto Geológico, 1993, 92 p.

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.** GW.MATE: 2006. 104 p. (trad.) Servmar, São Paulo.

FRANTZ, L. C. **Avaliação do Índice de Vulnerabilidade do Aquífero Guarani no Perímetro Urbano da Cidade de Sant' Ana do Livramento – RS.** 2005. 125f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2005.

FREITAS DA SILVA, C. **Contaminação do solo e águas subterrâneas em postos de combustíveis.** 2006. 70f. Trabalho de Graduação. Curso de Engenharia Ambiental – Centro Universitário Franciscano, Santa Maria, 2006.

GARCIA, G. P. **Avaliação de pontos potenciais de contaminação de águas subterrâneas em Santa Maria, RS.** 2004. 75f. Trabalho de Graduação. Curso de Geografia – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2004.

GIASSON, E.; NASCIMENTO, P.C.; INDA JUNIOR, A.V. **Solos urbanos: funções, impactos e planejamento de uso.** In: Solos & Ambiente: II FÓRUM, 2006, Santa Maria. Departamento de Solos, UFSM, Ed. Pallotti, 2006, p. 103 – 123.

GREGORASCHUK, J. de los S. **Estúdio Del uso actual y potencial Del acuífero Guarani:** enero 2001. Disponível em: <<http://www.sq.guarani.org.pdf>>. Acesso em 10 Nov. 2008.

GUIGUER, N. **Poluição das Águas Subterrâneas e do Solo causada por Vazamentos em Postos de Abastecimento.** Santo André: Waterloo Brasil Ltda. 2000, 356 p.

HAUSMAN, A. **Províncias Hidrogeológicas do Estado do Rio Grande do Sul - RS.** Acta Geológica Leopoldensia. São Leopoldo: UNISINOS, 1995, 125 p.

HEATH, R. C. **Hidrologia Básica de Água Subterrânea.** Porto Alegre: UFRGS. Tradução de Mário Wrege e Paul Potter. 1983, 83 p.

JUCÁ, J. F. T. Destinação final dos resíduos sólidos no Brasil: situação atual e perspectivas. In: RESID'2004, Seminário sobre resíduos sólidos, 2004, São Paulo. **Anais...** São Paulo: Associação Brasileira de Geologia de Engenharia e Ambiental, 2004. 20 p.

KARNAUKHOVA, E.; LOCH, C. **Mapeamento Geoecológico e Planejamento Territorial: problemática e princípios metodológicos de pesquisa.** In: CONGRESSO BRASILEIRO DE CADASTRO TÉCNICO MULTIFINALITÁRIO, Florianópolis, santa Catarina, 2002, 12 p.

LOCH, R. N. **Cartografia: representação, comunicação e visualização de dados espaciais.** Florianópolis: Ed. da UFSC, 2006, 313 p.

MACIEL FILHO, C. L. **Caracterização geológica das formações sedimentares de Santa Maria, RS.** 1977. 123f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Instituto de Geociências, Rio de Janeiro, 1977.

\_\_\_\_\_. **Carta geotécnica de Santa Maria.** Imprensa Universitária, FINEP/UFSM, Santa Maria, 1990. 21 p.

\_\_\_\_\_. **Carta de unidades geotécnicas de Santa Maria – RS.** Escala 1:25.000. Imprensa Universitária, FINEP/UFSM, Santa Maria: 1990.

MAZIERO, L. **Levantamento da vulnerabilidade dos recursos hídricos subterrâneos no município de Dona Francisca – RS.** 2005. 125f. Dissertação (Mestrado em Geografia) – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2005.

MINISTÉRIO DO EXÉRCITO. Folha de Santa Maria. SH.22-V-C-IV/1-SE, MI-2965/1-SE. Escala 1:25.000, Diretoria de Serviço Geográfico – DSG, 1980.

MOREIRA, M. A. **Fundamentos do Sensoriamento Remoto e metodologias de aplicação.** 2.ed. Viçosa: UFV, 2003. 307 p.

OLIVEIRA, E. L. A. **Áreas de risco geomorfológico na bacia hidrográfica do Arroio Cadena, Santa Maria/RS: Zoneamento e Hierarquização.** 2004. 141f. Dissertação (Mestrado em Geografia) – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2004.

OLIVEIRA, A. M. S.; BITAR, O. Y.; FILHO, N. F. **Geologia de engenharia e meio ambiente**. In: Curso de geologia aplicada ao meio ambiente. ABGE-IPT, São Paulo, 1995, p. 7 – 15.

PERAZZOLO, L. **Estudo geotécnico de dois taludes da Formação Serra Geral, RS**. 2003. 150f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio grande do Sul, Porto Alegre, 2003.

PINHEIRO, R. J. B.; SOARES, J. M. D. **Notas de aula: Mecânica dos Solos**. Santa Maria: 2002, 253 p.

PINHEIRO, R. J. B. **Estudo da Condutividade hidráulica de solos para a disposição de resíduos sólidos da região de Santa Maria – RS. RELATÓRIO TÉCNICO**. UFSM. Santa Maria: 2004. 45 p.

\_\_\_\_\_. **Estudo de alguns casos de instabilidade da encosta da Serra Geral no estado do Rio Grande do Sul**. 2000. Tese (Doutorado em Engenharia) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2000, 318p.

\_\_\_\_\_. **ARIP - Ensaio de condutividade hidráulica**, Laudo Técnico, Laboratório de Materiais de Construção Civil, CT/UFSM. Santa Maria, 2007, 10p.

PINHEIRO, R. J. B.; SOARES, J. M. D.; TAVARES, I. S.; RACHELLI, R. T.; LUZ, E. L. **A importância da geologia nos problemas geotécnicos na região de Santa Maria**. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA DE ENGENHARIA E AMBIENTAL, 10° CGBE, Ouro Preto, Minas Gerais, 2002, 13 p.

PINTO, J. S. **Estudo da Condutividade Hidráulica de Solos para a Disposição de Resíduos Sólidos na Região de Santa Maria**. 2005. 154f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2005.

POZZA, M. L.; SILVEIRA, H. Diagnóstico da qualidade ambiental da Bacia do Córrego Aldeia, CIANORTE-PR. In: 5° Seminário latino-Americano e Ibero-Americano de geografia física aplicada. Santa Maria, Rio Grande do Sul, 2008, 13p.

PRANDINI, L. F.; NAKAZAWA, V. A.; FREITAS, C. G. L.; DINIZ, N. C. **Cartografia geotécnica nos planos diretores regionais e municipais**. In: Curso de geologia aplicada ao meio ambiente. ABGE-IPT, São Paulo, 1995, p. 187 – 202.

PREFEITURA MUNICIPAL DE SANTA MARIA – RS. **Mapa da malha viária**. 2000. Disponível em CD-ROM.

ROBAINA, L. E. S.; OLIVEIRA, E. L. A.; PIRES, C. A. F. **Estudo para instalação de aterro sanitário no município de Santa Maria – RS**. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA DE ENGENHARIA E AMBIENTAL, 10º CGBE, Ouro Preto, Minas Gerais, 2002, 13 p.

RODRIGUES, J. A.; TRAJANO, A. S. A.; NAVAL, L. P.; SILVA, G. G.; QUEIROZ, S. C. B. **Avaliação preliminar do comportamento do aquífero freático no cemitério São Miguel do município de Palmas**. In: 22º CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL, Joinville, Santa Catarina, 2003, 10 p.

SILVÉRIO DA SILVA, J. L.; MAZIERO, L.; DOS SANTOS, E. F. **Impactos da atividade humana sobre o solo – aquíferos**. In: Solos & Ambientes: I FORUM, 2004, Santa Maria. Departamento de Solos, UFSM, Ed. Pallotti, 2004, p. 145 – 167.

SISTEMA DE INFORMAÇÃO DE ÁGUAS SUBTERRÂNEAS. SIAGAS – Sistema de Informação de Águas Subterrâneas. Disponível em: <<http://www.siagas.cprm.gov.br>>. Acesso em: 10 Out. 2008.

SOUZA PINTO, C. de. **Curso básico de mecânica dos solos**. 2 Ed. São Paulo: Oficina de textos, 2002. 355 p.

SURFER 8. **Contouring and 3D surface mapping for scientists and engineers**. User's Guide. Golden Software Inc. 2004. Versão 8. Colorado - U.S.A.

TAVENAS, F.; TREMBLAY, M.; LAROUCHE, G.; LEROUELL, S. **In situ measurement of soil permeability in soft clays**. Conference on Use of In Situ Tests In Geotechnical Engineering, ASCE, 1986, p. 1034 – 1048.

**ANEXO**



ANEXO A – Banco de dados dos poços e índice de vulnerabilidade

<b>Código</b>	<b>Cód.SIAGAS</b>	<b>UTM E</b>	<b>UTM N</b>	<b>Localização</b>	<b>Cota Ter.</b>	<b>N.E. (m)</b>	<b>Lit.</b>	<b>S. P.</b>	<b>G</b>	<b>O</b>	<b>D</b>	<b>Índ. Vuln.</b>	<b>Classificação</b>
PÇ1	4300000564	233500	6712400	Camobi	110	60	SMA	50	0,2	0,65	0,6	0,07	Insignificante
PÇ2	4300000565	232800	6711400	Vila Farroupilha	130	56,6	SMA	73,4	0,2	0,65	0,6	0,07	Insignificante
PÇ3	4300000572	233800	6710400	Camobi	125	42,8	SMA	82,2	0,2	0,65	0,7	0,09	Insignificante
PÇ4	4300000573	232700	6709800	São José	110	35,2	SMA	74,8	0,2	0,65	0,7	0,09	Insignificante
PÇ5	4300000578	229600	6712700	Esc.Form.Sargentos	140	12	CAT	128	1	0,7	0,8	0,56	Alta
PÇ 6	4300000583	231700	6712200	Vila Bilibiu	100	50,4	SMA	49,6	0,2	0,56	0,6	0,06	Insignificante
PÇ 7	4300000589	223000	6712000	Cohab Santa Marta	105	38,4	SMA	66,6	0,2	0,65	0,7	0,09	Insignificante
PÇ 8	4300000590	226500	6714300	Vila Kennedy	110	25,6	SMA	84,4	0,2	0,65	0,7	0,09	Insignificante
PÇ 9	4300000591	228800	6713900	Bairro Itararé	120	12,9	CAT	107,1	1	0,7	0,8	0,56	Alta
PÇ 10	4300000592	227300	6712400	Pr. dos Bombeiros	125	47,6	CAT	77,4	0,4	0,56	0,7	0,15	Baixa
PÇ 11	4300000593	224800	6712700	PQ. Man. Exército	100	15,2	SMA	84,8	0,2	0,65	0,8	0,1	Insignificante
PÇ 12	4300000594	225100	6712000	Vila Rigão	78	3,35	SMA	74,65	0,2	0,65	0,9	0,11	Baixa
PÇ 13	4300000595	226100	6711600	Est. Trat. Esgoto	82	6,1	SMA	75,9	0,2	0,65	0,8	0,1	Insignificante
PÇ 14	4300000596	226700	6709800	Vila Urlândia	75	20	SMA	55	0,2	0,65	0,8	0,1	Insignificante
PÇ 15	4300000599	227800	6712500	Praça Satur. Brito	135	23,7	CAT	111,3	1	0,7	0,7	0,49	Média
PÇ 16	4300000604	229550	6708900	Vila Tomazzetti	120	52	SMA	68	0,2	0,65	0,6	0,07	Insignificante
PÇ 17	4300000619	224200	6708800	Campo Instrução	95	54	SMA	41	0,2	0,65	0,6	0,07	Insignificante
PÇ 18	4300000620	224200	6708900	Campo Instrução	90	39	SMA	51	0,2	0,65	0,7	0,09	Insignificante

<b>Código</b>	<b>Cód.SIAGAS</b>	<b>UTM E</b>	<b>UTM N</b>	<b>Localização</b>	<b>Cota Ter.</b>	<b>N.E. (m)</b>	<b>Lit.</b>	<b>S. P.</b>	<b>G</b>	<b>O</b>	<b>D</b>	<b>Índ. Vuln.</b>	<b>Classificação</b>
PÇ 19	4300000623	222300	6714300	Faz. Santa Marta	105	27	SMP	78	1	0,8	0,7	0,56	Alta
PÇ 20	4300000626	230600	6711600	Sem.Vicente Palloti	170	22	DSG	148	0,2	0,65	0,7	0,09	Insignificante
PÇ 21	4300000627	230400	6711500	Colégio Marista	150	65	DSG	85	0,2	0,65	0,7	0,09	Insignificante
PÇ 22	4300000628	228100	6714500	B. Perpétuo Socorro	160	35,7	CAT	124,3	0,2	0,65	0,7	0,09	Insignificante
PÇ 23	4300000629	230700	6712700	Patio da RFFSA	115	29	SMA	86	0,2	0,65	0,7	0,09	Média
PÇ24	4300000630	230000	6712100	Casa Retiro Sant.	140	14	CAT	126	1	0,7	0,8	0,56	Alta
PÇ25	4300000639	224200	6715600	Caturrita	135	17	CAT	118	1	0,7	0,8	0,56	Alta
PÇ26	4300000640	224000	6714500	Caturrita	105	5	SMA	100	0,2	0,65	0,8	0,14	Baixa
PÇ27	4300000641	225900	6713900	Santa Maria	95	8	SMA	87	0,2	0,65	0,8	0,1	Insignificante
PÇ28	4300000643	225000	6717300	Caturrita	180	4	CAT	176	1	0,7	0,9	0,63	Alta
PÇ29	4300000653	230000	6715900	Camp. M. Deus	135	0,5	CAT	134,5	1	0,7	0,9	0,63	Alta
PÇ30	4300000654	229700	6715600	C.M.Deus CEEE	135	28	CAT	107	1	0,7	0,7	0,49	Média
PÇ31	4300000655	229200	6709500	Seminário São José	120	41,7	SMA	78,3	0,2	0,65	0,7	0,09	Insignificante
PÇ32	4300000668	228400	6705700	Estância Minuano	90	30	SMP	60	1	0,8	0,7	0,56	Alta
PÇ33	4300016943	222556	6712203	CVI Ltda	97	48,06	SMP	48,94	0,4	0,63	0,7	0,17	Baixa
PÇ34	4300016944	222275	6712111	CVI Ltda	95	39,7	FRS	55,3	0,4	0,63	0,7	0,17	Baixa
PÇ35	4300016945	222308	6712227	CVI Ltda	98	34,7	FRS	63,3	0,4	0,63	0,7	0,17	Baixa
PÇ36	4300017137	229403	6712570	Clube Dores, Centro	130	80,8	CAT	49,2	0,4	0,7	0,6	0,16	Baixa

Legenda: DSG – Diabásio Serra Geral; CAT – Formação Caturrita; SMA – Formação Santa Maria Membro Alemoa; SMP – Formação Santa Maria Membro Passo das Tropas; FRS – Formação Rosário do Sul.