

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA MARIA
CENTRO DE CIÊNCIAS RURAIS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM GEOMÁTICA**

**VULNERABILIDADE NATURAL DO SISTEMA
AQÜÍFERO GUARANI, EM SANTANA DO
LIVRAMENTO, RS, COM USO DE
GEOTECNOLOGIAS**

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

Isabel Camponogara

Santa Maria, RS, Brasil

2006

**VULNERABILIDADE NATURAL DO SISTEMA AQÜÍFERO GUARANI,
EM SANTANA DO LIVRAMENTO, RS, COM USO DE
GEOTECNOLOGIAS**

por

Isabel Camponogara

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

Orientador: Prof. Dr. José Américo de Mello Filho

Santa Maria, RS, Brasil

2006

**Universidade Federal de Santa Maria
Centro de Ciências Rurais
Programa de Pós-Graduação em Geomática**

A Comissão Examinadora, abaixo assinada,
aprova a Dissertação de Mestrado

**VULNERABILIDADE NATURAL DO SISTEMA AQÜÍFERO GUARANI,
EM SANTANA DO LIVRAMENTO, RS, COM USO DE
GEOTECNOLOGIAS**

elaborada por
Isabel Camponogara

como requisito parcial para obtenção do grau de
MESTRE EM GEOMÁTICA

COMISSÃO EXAMINADORA:

José Américo de Mello Filho, Dr. (Presidente/Orientador-UFSM)

José Luiz Silvério da Silva, Dr. (UFSM)

Carlos Alberto da Fonseca Pires, Dr. (UFSM)

Santa Maria, 03 de fevereiro de 2006.

“Embora o Brasil ostente a maior descarga de água doce do mundo nos seus rios, quando estes secarem ou só transportarem esgotos não tratados das nossas cidades, já não será possível produzir alimentos, plantar árvores e o dinheiro do bolso de pouco valerá”.

Aldo da Cunha Rebouças

DEDICATÓRIA

*À memória de meus pais, por todo o amor dedicado,
a educação recebida, o carinho e principalmente
pela minha existência;*

*Dedico também a todas as pessoas
envolvidas nesta conquista
em especial meus irmãos e irmãs,*

Nilza de Oliveira Doico,

Prof. José Luiz Silvério da Silva

Prof. José Américo de Mello Filho

AGRADECIMENTOS

À Universidade Federal de Santa Maria pela oportunidade de aperfeiçoamento científico;

Aos professores: orientador Dr. José Américo de Mello Filho e co-orientador Dr. José Luiz Silvério da Silva, pela orientação desta Dissertação, desde a elaboração do projeto até seu resultado final; pelas sugestões bibliográficas durante a pesquisa, por compartilhar seus conhecimentos, pela receptividade, amizade e carinho essenciais para a execução desta pesquisa e para meu crescimento intelectual.

À Comissão examinadora desta Dissertação: Prof. Dr. José Luiz Silvério da Silva e Prof. Dr. Carlos Alberto da Fonseca Pires pela leitura crítica, sugestões e ensinamentos.

Aos professores que ministraram aulas no Curso de Mestrado em Geomática, pelo conhecimento compartilhado;

A OEA e o Banco Mundial pelo financiamento parcial deste projeto;

Aos colegas e amigos do Curso de Mestrado em Geomática, especialmente Jurandi Zanoti Goldani, Márcia Trentin, Maria Elaine Leon, Janete Reis, Edison Alberti, pelos momentos compartilhados, trocas de idéias, colaboração, incentivo e pela amizade;

Aos colegas do laboratório de Hidrogeologia, em especial ao Engenheiro Civil Luis Carlos Frantz, pelo auxílio na elaboração dos produtos cartográficos desta dissertação e pela amizade;

Ao amigo Carlos Gilberto Konrad, pelo auxílio na execução da formatação desta dissertação;

Ao secretário do Programa de Pós-Graduação em Geomática, Nelson Leal de Souza, pela disponibilidade em prestar informações, dedicação, apoio e amizade.

A todas as pessoas que me incentivaram, em especial minha família.

RESUMO

Dissertação de Mestrado
Programa de Pós-Graduação em Geomática
Universidade Federal de Santa Maria, RS, Brasil

VULNERABILIDADE NATURAL DO SISTEMA AQÜÍFERO GUARANI, EM SANTANA DO LIVRAMENTO, RS, COM USO DE GEOTECNOLOGIAS

Autora: Isabel Camponogara
Orientador: Prof. Dr. José Américo de Mello Filho
Data e local da defesa: Santa Maria, 03 de fevereiro de 2006.

O risco de contaminação dos sistemas aquíferos tem sido motivo de preocupação no meio científico. Várias pesquisas desenvolvidas no mundo todo têm mostrado que os recursos hídricos subterrâneos estão sendo atingidos por fontes potencialmente contaminantes, oriundas principalmente de produtos utilizados na indústria, na agricultura e na disposição dos resíduos urbanos e/ou produzidos na área rural. Neste sentido, esta pesquisa teve como objetivo mapear a vulnerabilidade natural do Sistema Aquífero Guarani em Santana do Livramento no Estado do Rio Grande do Sul, e identificar fontes potenciais de contaminação, devido às águas explotadas deste aquífero, serem utilizadas principalmente, para consumo humano. Para tanto, utilizou-se para a execução da pesquisa dados pré-existentes, pesquisa de campo e de geotecnologias. A metodologia utilizada para o mapeamento da vulnerabilidade natural foi o Modelo DRASTIC. As fontes de contaminação cadastradas foram os postos de combustíveis, cemitérios e o antigo lixão. Foram mapeados três cemitérios, um lixão, bem como vinte e dois postos de combustíveis, todos localizados em áreas de recarga do Sistema Aquífero Guarani, representando risco de contaminação. Como resultado mais relevante constatado pode-se destacar que as classes de vulnerabilidade da área variaram de vulnerável, muito vulnerável a extremamente vulnerável. Desta forma, fica evidenciada a importância da gestão dos recursos hídricos subterrâneos na área estudada, espera-se que as informações obtidas e as metodologias aplicadas neste trabalho possam subsidiar ações direcionadas à gestão integrada dos recursos hídricos, bem como nos planos de ocupação e uso dos solos, de acordo com o previsto no Estatuto das Cidades e nos Planos Diretores.

Palavras-chave: vulnerabilidade natural, Sistema Aquífero Guarani, contaminação, geotecnologias.

ABSTRACT

Dissertation of Master's Degree
Program of Master's Degree in Geomatica
Universidade Federal de Santa Maria

NATURAL VULNERABILITY OF THE GUARANI AQUIFER SYSTEM, IN SANTANA DO LIVRAMENTO CITY IN RIO GRANDE DO SUL STATE, WITH USE OF GEOTECNOLOGYCS

Author: Isabel Camponogara

Advisor: Prof. Dr. José Américo de Mello Filho

Date and place of the defense: Santa Maria, February 03th, 2006.

The risk of contamination of the aquifers systems has been reason of concern in the scientific way. Several researches developed in the whole world have been showing that the underground hydrics resources are being reached by potentially pollutants sources, proceeding mainly of products used in the industry, in the agriculture and in the disposition of the urban residues and/or produced in the rural area. In this sense, this research had as objective maps the natural vulnerability of the Guarani Aquifer System in at Santana do Livramento city in Rio Grande do Sul state and to identify potential sources of contamination, due the exploited waters of this aquifer be used mainly, for human consumption. For so much, it was used pre-existent data for the execution of the field research and of geotecnologics. The methodology used for the mapping of the natural vulnerability was the DRASTIC Model. The registered sources of contamination were the gas stations, cemeteries and the old garbage deposit. It were mapped three cemeteries, one old garbage deposit, as well as twenty-two gas stations, all located in areas of recharge of the Guarani Aquifer System, represented risk of contamination. As verified more relevant result can stand out that the vulnerability classes of the area varied of vulnerable, very vulnerable and extremely vulnerable. This way, the importance of the administration of the underground hydrics resources is evidenced in the studied area, it is waited that the information obtained and the applied methodologies in this work can subsidize actions addressed to the integrated administration of the hydrics resources, as well as in the occupation plans and use of the soils, in agreement with foreseen in the Statute of the Cities and in the Master Plans.

Keywords: Natural vulnerability, Guarani Aquifer System, contamination, geotecnologics.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Localização da área de estudo no estado do RS.....	19
Figura 2 - Mapa esquemático do Sistema Aquífero Guarani.....	41
Figura 3 - Fluxograma das etapas de desenvolvimento da pesquisa.....	51
Figura 4 – Esquema de avaliação da vulnerabilidade natural de aquíferos (Modelo DRASTIC).	59
Figura 5 - Espacialização dos poços tubulares na área de estudo	67
Figura 6 – Usos da água subterrânea da área de estudo	68
Figura 7 - Mapa da variação das profundidades dos poços da área de estudo	69
Figura 8 - Mapa da espacialização das vazões dos poços	71
Figura 9 – Espacialização da superfície potenciométrica.....	73
Figura 10 - Mapa da variação do Nível Estático dos poços	76
Figura 11 - Aspectos da Fm. Botucatu (A), Fm. Rosário do Sul (B) e Fm Serra Geral (C)	79
Figura 12 - Mapa das formações geológicas.....	81
Figura 13 - Mapa das unidades de solos	84
Figura 14 - Mapa clinográfico da área de estudo	87
Figura 15 - Mapa da vulnerabilidade natural dos aquíferos	91
Figura 16 - Fotos de pontos potenciais de contaminação (Posto de combustível – A e Cemitério - B)	93
Figura 17 - Mapa da vulnerabilidade com fontes de contaminação	96

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Distribuição vertical da água no subsolo	27
Quadro 2 - Principais métodos para a determinação da vulnerabilidade à poluição de aquíferos.	32
Quadro 3 - Níveis de avaliação do risco de contaminação das águas subterrâneas.	34
Quadro 4 - Principais métodos de interpolação e sua descrição.....	46
Quadro 5 - Formações litológicas e suas respectivas características	57
Quadro 6 - Tipos de solos e suas características.....	58
Quadro 7 - Fatores DRASTIC e seus respectivos pesos (Peso= p).....	60
Quadro 8 - Faixas de profundidade da água subterrânea e respectivas cargas (Dc). (Peso: Dp=5).....	60
Quadro 9 - Recarga total durante o ano (Peso: Rp= 4).....	61
Quadro 10 - Tipos de meio aquíferos e suas respectivas cargas (Ac). (Peso: Ap=3).	61
Quadro 11 - Solos e suas respectivas cargas (Sc), (Peso: Sp=2).	62
Quadro 12 - Classes de declividade e suas respectivas cargas (Tc). (Peso: Tp=1).	62
Quadro 13 - Impacto da Zona Vadosa e suas respectivas cargas (Ic). (Peso: Ip=5).....	63
Quadro 14 - Condutividade hidráulica, cargas (Cc). (Peso: Cp=3).	64
Quadro 15 - Classes de vulnerabilidade e seus respectivos intervalos, segundo Aller <i>et al.</i> (1987)	65
Quadro 16 - Classificação do Nível estático dos poços nos intervalos e suas respectivas cargas	75
Quadro 17 - Recarga total durante o ano (Peso: Rp= 4).....	77
Quadro 18 - Tipos de meio aquíferos e suas respectivas cargas (Ac) e distribuição dos poços em cada unidade. (Peso: Ap=3).....	78
Quadro 19 - Solos e suas respectivas cargas (Sc), distribuição dos poços (Peso: Sp=2).....	83
Quadro 20 - Classes de declividade da área de estudo com a distribuição dos poços e cargas sugeridas no modelo DRASTIC (Tc)	85
Quadro 21 - Impacto da Zona Vadosa e suas respectivas cargas (Ic). (Peso: Ip=5).....	88
Quadro 22 - Condutividade hidráulica, cargas (Cc). (Peso: Cp=3).	89
Quadro 23 - Fontes de contaminação e informações SG = Serra Geral (basaltos) .	92

LISTA DE ANEXOS

ANEXO 01 – Banco de dados sobre os poços presentes na área de estudo.	106
ANEXO 02 – Banco de dados do modelo DRASTIC	109

SUMÁRIO

RESUMO.....	6
ABSTRACT	7
LISTA DE FIGURAS	8
LISTA DE QUADROS	9
LISTA DE ANEXOS	10
1. INTRODUÇÃO	13
1.1. OBJETIVOS.....	17
1.1.1. Objetivo Geral	17
1.1.2. Objetivos Específicos	17
2. CARACTERIZAÇÃO GERAL DA ÁREA DE ESTUDO.....	18
3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	22
3.1. Água Subterrânea: Aspectos Gerais.....	22
3.2. Vulnerabilidade natural de sistemas aquíferos e risco de contaminação.....	29
3.3. Fontes potenciais de contaminação das águas subterrâneas	35
3.4. Gerenciamento dos Recursos Hídricos Subterrâneos	38
3.5. Sistema Aquífero Guarani.....	40
3.6. Caracterização das Geotecnologias (Sistemas de Informação Geográfica), Geoestatística (Análise espacial) e Cartografia da informação hidrogeológica	44
3.6.1. Sistemas de Informação Geográfica (SIG).....	44
3.6.2. Geoestatística (Análise Espacial de Dados)	45
3.6.3. Cartografia da informação hidrogeológica.....	48
4. METODOLOGIA.....	51
4.1. Procedimentos Metodológicos.....	51
4.2. Procedimentos Técnicos.....	53
4.2.1. Cadastro dos poços	53
4.2.2. Delimitação da área de estudo.....	54
4.2.3. Mapa da Distribuição Espacial dos Poços	54
4.2.4. Mapa da variação da profundidade dos poços.....	55
4.2.5. Mapa da variação da vazão dos poços	55
4.2.6. Mapa da superfície potenciométrica dos poços	55
4.2.7. Mapa da variação do nível estático dos poços.....	56
4.2.8. Mapa geológico	56
4.2.9. Mapa clinográfico	57
4.2.10. Mapa das unidades texturais de solos	58

4.2.11. Mapa de vulnerabilidade natural	59
4.2.12. Fontes potenciais de contaminação	65
5. RESULTADOS E DISCUSSÕES	66
5.1. Cadastro dos poços e parâmetros hidrodinâmicos	66
5.2. Mapeamento da vulnerabilidade natural dos aquíferos	74
5.3. Identificação de fontes potenciais de contaminação.....	92
5.4. Integração de informações: vulnerabilidade natural de aquíferos e fontes potenciais de contaminação.	94
6. CONSIDERAÇÕES FINAIS	97
7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFIAS.....	100

1. INTRODUÇÃO

O homem desde a sua origem convive com as condições naturais do meio ambiente, tanto no que se refere ao uso como na sua sobrevivência. Entretanto, a forma como utilizou dos recursos naturais nem sempre considerou suas características e as capacidades de recuperação ambiental. Mais recentemente o homem passou a se preocupar com os problemas ambientais decorrentes do modo de exploração, principalmente relacionados aos recursos hídricos, devido sua importância para a vida.

O surgimento de problemas ambientais graves, com reflexos sobre o próprio homem, levou-o a compreender melhor os fenômenos naturais e a entender que deve agir como parte integrante do sistema natural (Mota, 1997).

A pesquisa científica surge como uma aliada na compreensão da dinâmica natural e na solução de problemas ambientais. Nesse sentido, (Asmus, 1990) salienta que a pesquisa configura-se em uma forma valiosa de se buscar o conhecimento do meio natural face às ações antrópicas.

Diante disso, esta pesquisa, que tem como problemática de estudo a vulnerabilidade natural do Sistema Aquífero Guarani e o risco de contaminação dos recursos hídricos subterrâneos, vêm se somar com as demais pesquisas, haja vista que é fundamental o reconhecimento dos potenciais do meio natural e das deficiências para evitar determinadas ações inadequadas e estabelecer prioridades nas posteriores investigações e tomadas de decisão.

A natureza tem grande capacidade de recuperação e os seus recursos existem para proporcionar ao homem satisfação para qualidade de vida (Mota, 1997). Porém,

essa capacidade não é ilimitada e, muitas vezes, um recurso natural deteriorado não tem condições de retornar às suas características originais, causando a destruição de seus componentes e sérios danos ao ser humano.

Os problemas ambientais agravaram-se, nos últimos tempos, como conseqüência do crescimento populacional, especialmente com a intensificação das atividades humanas, tais como a industrialização, a agricultura intensiva, a pecuária extensiva, a extração de minério, e outras ações deterioradoras.

O crescimento populacional impulsiona o surgimento de grandes áreas urbanas, bem como o aumento da produção de alimentos. Desse modo, algumas conseqüências decorrentes destes fatos são observadas, especialmente quanto ao aumento de consumo dos recursos hídricos. Dentre as conseqüências, podem-se destacar os conflitos pelo uso de recursos hídricos, eles tendem a ficar cada vez mais escassos, seja pelo crescimento da demanda, seja pela deterioração de sua qualidade em função de atividades econômicas, principalmente agrícolas e industriais.

Como exemplo dos principais fatores de deterioração ambiental, pode-se citar, a agropecuária, a indústria e a localização das cidades. A agropecuária caracterizada pela utilização de fertilizantes, agrotóxicos, desmatamentos, usos inadequados das terras e dejetos de animais. A indústria contribui com os rejeitos e efluentes tóxicos lançados aos solos ou nos rios. E por fim, as cidades mal planejadas com seus lixões e esgotos inadequadamente localizados.

Com o aumento da poluição dos recursos hídricos superficiais, o problema da escassez de água torna-se mais intenso, seja em relação à qualidade ou sua quantidade e, por conseqüência, extrapolam até mesmo as fronteiras das regiões que historicamente sofriam com secas periódicas, como é o caso da parte do Nordeste brasileiro, conhecida como “Polígono das Secas” e, com isso, ocorre uma procura ainda maior para os recursos hídricos subterrâneos. A procura ocorre também pelas vantagens sobre as águas superficiais, principalmente relacionadas com a qualidade e o custo para exploração. Entretanto, a situação atual de exploração é marcada por uma visão imediatista de uso do recurso, prevalecendo o descontrole em relação à fiscalização e ao cumprimento das leis.

Contudo, nos últimos anos percebe-se uma crescente preocupação da sociedade com a deterioração dos recursos hídricos subterrâneos, haja vista que é cada vez mais evidente a consciência dos responsáveis pela gestão das águas

subterrâneas, principalmente com as limitações técnicas, econômicas e de disponibilidade de especialistas para atenuar a deterioração existente, sobretudo em países que estão em fase de desenvolvimento.

Como resultado dessa situação, tem-se observado a disseminação do uso e desenvolvimento de várias técnicas de mapeamento para avaliação da vulnerabilidade natural à poluição de aquíferos, como uma ferramenta para a prevenção e proteção das águas subterrâneas.

A água subterrânea constitui um recurso natural que, freqüentemente, não é valorizado, o que se reflete no insuficiente reconhecimento da sua importância quanto ao nível ambiental, social e econômico (Lanna, 2001). Contudo, constitui uma origem de água acessível que tem maior qualidade que as resultantes de captações superficiais, pelo fato de os custos de tratamento que lhe estão associados serem menores.

Em vista disso, a água subterrânea tem sido submetida a um consumo desmedido e uma pressão crescente que, em certos casos, tem levado a situações de super-exploração de aquíferos e à deterioração da qualidade resultante de contaminação por fontes poluidoras não controladas.

Neste sentido, justifica-se a realização desta pesquisa, em razão de que as águas subterrâneas também estão sendo deterioradas pelas atividades antrópicas, e já é fato concreto, em algumas situações, a contaminação das águas subterrâneas, a exemplo do que ocorre com as águas superficiais. A infiltração de substâncias poluidoras por lixiviação através do solo pelos corpos d'água é um fato corriqueiro, sendo que muitas delas são tóxicas, não degradáveis e de efeito cumulativo nos organismos de animais consumidores, inclusive o homem. Apesar disso, ainda persistem atitudes generalizadas de subestimar os riscos de poluição das águas subterrâneas, traduzida pelo descaso nas políticas de proteção e de ações voltadas à sua conservação ou mesmo pela pouca conscientização da população de modo geral.

Por isso, estudos dessa natureza são fundamentais e contribuem para a tomada de decisão no que se refere à proteção dos recursos hídricos subterrâneos em seus aspectos de alteração da qualidade e quantidade.

Embora os recursos hídricos sejam abundantes em toda a superfície terrestre, estes não são uniformemente distribuídos. Em algumas áreas, a disponibilidade superficial não supre a demanda, sendo os usos reduzidos somente ao atendimento

das necessidades humanas. Tal situação tem causado sérias limitações para o desenvolvimento de muitas regiões em todo o mundo; assim, a procura pela exploração das águas subterrâneas tem aumentado intensamente.

Neste contexto, um bom conhecimento das necessidades de seus diversos usuários e da capacidade de oferta e renovação das fontes hídricas é fundamental para a definição dos marcos regulatórios principais e capacidade de suporte de cada local.

Em vista do exposto, optou-se por pesquisar em áreas de abrangência do Sistema Aquífero Guarani, compreendendo uma faixa de fronteira entre o Brasil e Uruguai, na cidade de Santana do Livramento e áreas adjacentes. A seleção deve-se a esta área se abastecer, para consumo humano, de água subterrânea e por estar localizada em uma zona de recarga e descarga de aquífero, com expressivo grau de vulnerabilidade natural à contaminação, fato esse relacionado, sobretudo às características intrínsecas ao local, onde a zona não-saturada é delgada e o lençol freático pouco profundo, ocasionando o afloramento deste aquífero em muitos locais. Assim, expressivos riscos de poluição podem ocorrer, bastando à aplicação de eventos de poluição persistentes. Por isso, como medida preventiva, objetivou-se a realização desta pesquisa, apoiando-se para a execução em dados pré-existentes, em geotecnologias, sistema de informação geográfica (SIG), da cartografia analógica e digital, de pesquisa de campo e análise laboratorial.

Desta forma, esta pesquisa foi estruturada em seis capítulos. No primeiro capítulo consta a introdução, juntamente à motivação para a realização da pesquisa, uma breve discussão do tema, quando se destaca a sua relevância, o momento oportuno, os locais de execução e a metodologia adotada.

No capítulo dois apresenta-se a localização da área de estudo e uma breve descrição dos aspectos físicos, sociais e econômicos, onde se caracterizam de modo geral todos os aspectos pertinentes à área em estudo.

O capítulo três apresenta a revisão bibliográfica realizada durante a pesquisa e que serviu, posteriormente, de suporte teórico para analisar as informações. Neste capítulo constam os conceitos básicos desta pesquisa e assuntos relacionados para a compreensão do tema.

No capítulo quatro constam os procedimentos metodológicos das etapas de efetivação da pesquisa, os quais estão divididos em procedimentos metodológicos e procedimentos técnicos.

Para o capítulo cinco apresentam-se os resultados e discussões da pesquisa desenvolvida, ou seja, o que realmente foi investigado nesta pesquisa.

E, por fim, está o capítulo seis, no qual apresentam-se as considerações finais; neste espaço, encontra-se sintetizado o que de mais relevante foi obtido na pesquisa.

1.1. OBJETIVOS

1.1.1. Objetivo Geral

Teve-se por principal objetivo espacializar cartograficamente a vulnerabilidade natural à contaminação do Sistema Aquífero Guarani em Santana do Livramento, RS, a partir do Modelo DRASTIC e dados pré-existentes, utilizando-se de geotecnologias, subsidiando assim ações que completem o uso racional e sustentável dos recursos hídricos subterrâneos.

1.1.2. Objetivos Específicos

Objetivou-se também:

- Realizar o cadastro de poços (tubulares e escavados) e fontes existentes na área de estudo;
- Mapear a vulnerabilidade natural dos aquíferos a partir do Modelo DRASTIC;
- Definir as áreas de risco potencial à contaminação das águas subterrâneas;
- Identificar fontes potenciais de poluição dos recursos hídricos subterrâneos;
- Realizar integração de informações: vulnerabilidade natural e fontes potenciais de poluição;

2. CARACTERIZAÇÃO GERAL DA ÁREA DE ESTUDO

A área de estudo abrange a cidade de Santana do Livramento (BR) e áreas adjacentes, localizada geograficamente em uma área de fronteira entre o Brasil e Uruguai, no centro sul da América do Sul, enquadrada entre as coordenadas geográficas de 30°49'37" a 30°55'39" de Latitude sul e 55°28'7,2" a 55°34'41" de Longitude oeste (Figura 1). A cidade de Santana do Livramento, situada a sudoeste do Estado do Rio Grande do Sul, no extremo sul do Brasil, juntamente com a cidade de Rivera, no extremo norte da República Oriental do Uruguai formam a Fronteira da Paz, devido ao convívio harmonioso entre os habitantes daquelas duas cidades.

Historicamente o processo de ocupação de Santana do Livramento tem sua origem ligada à guerra Cisplatina. A área onde está situado o município foi habitada por índios Minuanos e Charruas. Semi-sedentários, esses grupos viviam na costa povoando a Lagoa Mirim e vertentes do Rio Negro, até o interior do Uruguai. O povoamento intensivo aconteceu a partir de 1814. A cidade faz divisa com Rivera, no Uruguai, através de uma rua, sendo esta uma de suas marcantes características. É um dos municípios mais antigos, históricos e de maior em extensão territorial do RS. Atravessou períodos de grande prosperidade, quando despontavam grandes lanifícios, frigoríficos, organizações sociais e clubes de futebol.

A economia paulatinamente foi fenecendo, por múltiplas razões, dentre as quais podem ser citadas: isolamento (distância de outros centros econômicos expressivos), visão centralista (na política, na indústria, no comércio, na organização territorial), excessivo apego às tradições e à história (gerando dificuldades para aceitação de mudanças conceituais e práticas), opção econômica voltada

centralmente para a agropecuária e o comércio, sem ênfase ao desenvolvimento da indústria (Secretaria de Turismo do Rio Grande do Sul, 2005).

A cidade de Santana do Livramento, segundo dados do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE, 2001) conta com uma população de 90.849 habitantes, sendo que, destes, 84.455 vivem na zona urbana e os demais 6.394 na zona rural.

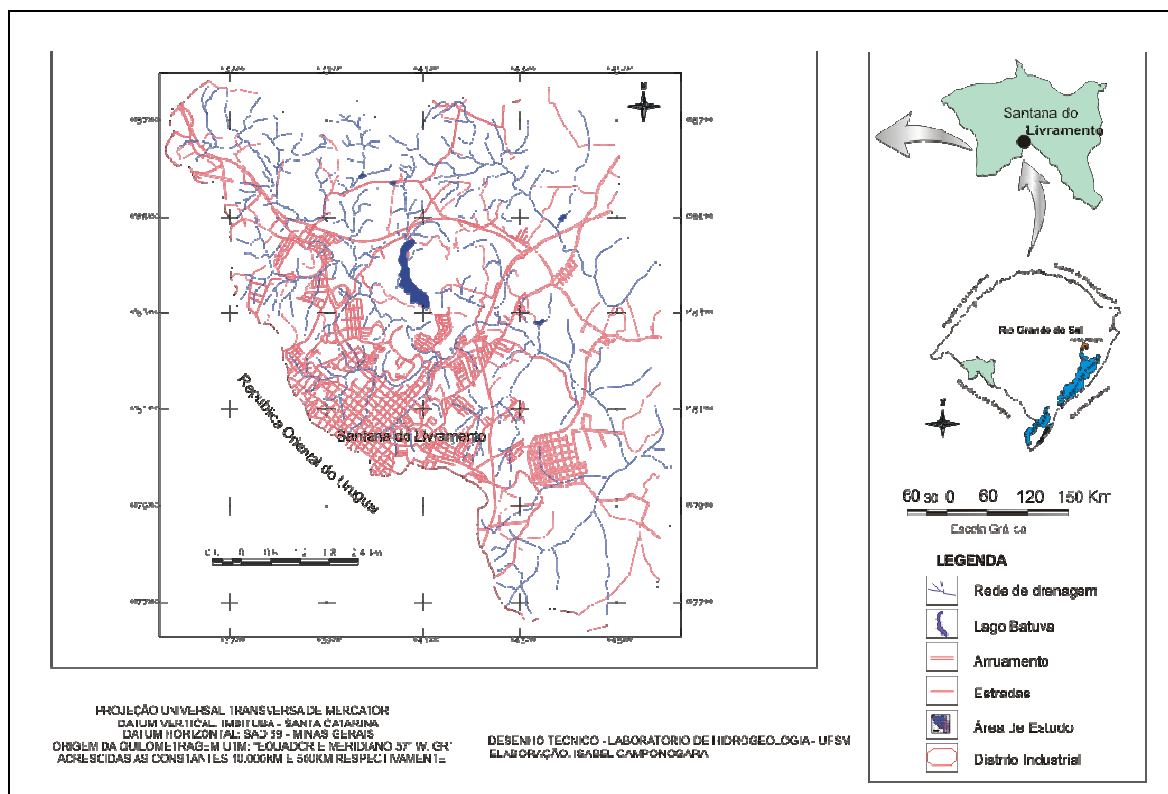


Figura 1 - Localização da área de estudo no estado do RS

A economia está alicerçada principalmente no setor primário, na agricultura, destaca-se a orizicultura e na pecuária a exploração concentra-se na bovinocultura e ovinocultura. Na agricultura destacam-se nesta ordem de magnitude a produção de arroz, milho, sorgo e soja. Na pecuária merecem destaque as criações de bovinos, ovinos, eqüinos e suínos. A criação de ovinos está voltada principalmente para a produção de lã e de carne em segundo plano. Destaque também para a fruticultura, principalmente de uvas, favorecidas pelo tipo de solo e clima subtropical.

No setor terciário, no que se refere a prestação de serviços, a cidade conta com cinco agências bancárias. No setor de ensino o mesmo órgão identificou no mesmo ano 56 escolas de ensino fundamental, sendo que destas 26 são públicas da rede municipal e 27 da rede estadual além de 3 particulares (IBGE, 2003). Segundo

o mesmo órgão, o ensino médio conta com 11 escolas sendo que 8 destas são da rede estadual de ensino e 3 da rede privada. No âmbito de ensino pré-escolar há um conjunto de 58 escolas, das quais 26 pertencem à rede pública municipal, 19 a rede pública estadual e 13 a rede privada de ensino.

No ensino superior a cidade conta com duas instituições uma delas, inicialmente privada, está sendo federalizada e fazendo parte da Universidade Federal do Pampa, e a Universidade do Estado do Rio Grande do Sul (UERGS), que no momento devido à fase inicial de sua criação oferece apenas dois cursos¹.

O comércio está direcionado para atender o fluxo da região sudoeste, bem como de outras regiões e também originário do Uruguai.

O abastecimento de água tanto na área urbana quanto na rural é proveniente de poços (tubulares e cacimba). O Departamento de Águas e Esgotos (DAE), uma autarquia municipal responsável pelo abastecimento público de água e pela deposição dos esgotos, conta com cerca de 40 poços tubulares, estando 33 ativos (SIAGAS/CPRM, 2005).

Em relação aos aspectos físicos, geomorfologicamente, a área de estudo insere-se em uma faixa de transição situada entre a Cuesta de Haedo e a Depressão Periférica. Essa posição, aliada às condições climáticas, conferem à área, determinadas características geológicas, geomorfológicas, hidrográficas e de vegetação variada, ocasionando conseqüentemente uma paisagem diversificada.

O clima da área de estudo de acordo Köppen (1948) pode ser classificado como do tipo Cfa (C: temperado quente ou mesotermal, temperatura média do mês mais frio entre 18° e 3°C; f: indica ano sem estação seca, com precipitação média do mês mais frio, uma a três vezes superior a do mês mais quente; a: equivale a verões quentes, sendo a média do mês mais quente superior a 22°C).

No que se refere aos deslocamentos de massas de ar, que atuam com maior intensidade sobre a área de estudo pode-se destacar a Massa Polar Velha e a Massa Polar Atlântica no inverno, estando esta última vinculada à intensidade do Anticiclone Migratório Polar e, eventualmente, às Massas Tropical Continental e Tropical Atlântica, na estação do verão. As massas de ar polares que se deslocam e que atingem a área de estudo provocam frentes frias, sendo responsáveis pelas chuvas de origem frontal, bem distribuídas durante o ano (Hausman, 1995).

¹ Os cursos ministrados pela instituição são: (1) Engenharia de Bioprocessos e Biotecnologia e (2) Tecnologia em Agropecuária: Agroindústria.

De acordo com Hausman (1995), o volume de precipitação média anual da área de estudo está abaixo dos 1400mm, com médias mensais de 100 a 150mm ocorrendo um pequeno déficit hídrico nos meses de dezembro a fevereiro. O mesmo autor cita que a região apresenta uma evapotranspiração real variando entre 800 a 900 mm anuais, resultando numa disponibilidade hídrica anual de 500 a 600mm. A infiltração média anual varia de 50 a 100mm o que representa uma variação de 3,5 a 7% do total anual precipitado.

Os ventos são predominantemente provenientes do quadrante leste, no entanto, também ocorre, de forma menos intensa, ventos do quadrante sul no inverno e do quadrante norte no verão.

Como consequência das características climáticas e da associação destas a outros aspectos físicos presentes na paisagem, a área apresenta uma rede de drenagem de pouca densidade, constituída por dois arroios perenes, predominando canais de 1ª, 2ª e 3ª ordem de grandeza. Desse modo, pode-se destacar o Arroio Carolina, pertencente à bacia hidrográfica do rio Santa Maria. Este conjunto hidrográfico é em parte responsável pela recarga do Sistema Aquífero Guarani.

Em relação às condições litológicas estas se apresentam de forma variada devido sua localização. Conforme Hausman (1995) a área de estudo está situada nas seguintes províncias litológicas: Província Basáltica e Província Sedimentar Gondwânica. A Província Basáltica deu origem a três feições morfológicas distintas: o Planalto, a Borda do planalto e a Cuesta. Província Sedimentar Gondwânica deu origem à Depressão Periférica.

Com relação aos solos, de acordo com o Ministério da Agricultura (1973), a área apresenta solos resultantes de derrames basálticos, apresentando, por isso, maior fertilidade.

A integração de todas as características inferidas acima condicionou o tipo e a distribuição espacial da cobertura vegetal da área, que originalmente era constituída pela Floresta Subcaducifólia Subtropical (Marchiori, 2001). A vegetação, na área de estudo, predominantemente caracteriza-se por campos, condicionados ao relevo, que geralmente é suave. A cobertura vegetal da Região da Campanha é a pastagem natural, que se apresenta sobre uma variedade de gramíneas, cuja altura varia de 10 a 50 cm. Pode se apresentar em forma quase contínua ou em tufos, e quando esta forma acontece deixa alguns trechos do solo exposto.

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1. Água Subterrânea: Aspectos Gerais

Água é uma substância química natural estável, composta por uma molécula de Oxigênio e duas de Hidrogênio, ligadas por covalência, numa disposição tetraédrica e polarizada; possui propriedades, físicas e químicas, muito especiais que determinam a existência de Vida e influenciam no aspecto externo da Terra (Wrege, 2003). A água assume grande importância na vida dos seres vivos, uma vez que é elemento primordial e insubstituível para a existência como também um dos elementos físicos mais importantes na composição da paisagem terrestre.

A água existente na Terra tem origem no ciclo hidrológico, isto é, no sistema pelo qual a natureza faz a água circular do oceano para a atmosfera e desta para os continentes, de onde retorna à atmosfera e, superficial e subterraneamente, ao oceano. Este ciclo é conduzido, no solo e subsolo, pela ação da gravidade, bem como pelo tipo e densidade de cobertura vegetal e, na atmosfera e superfícies líquidas (rios, lagos, mares e oceanos), pelos elementos e fatores climáticos, como, por exemplo, temperatura do ar, ventos, umidade relativa do ar, insolação, que são os responsáveis pelos processos de circulação da água, dos oceanos para a atmosfera em uma determinada latitude.

A água subterrânea origina-se da chuva que precipita e infiltra no solo. Sendo assim, a quantidade de água a se infiltrar depende da quantidade de chuva e tipo de litologia. Para Rebouças (2002), as águas subterrâneas têm, regra geral, três origens principais: meteórica, conata e juvenil. A água meteórica, segundo Rebouças

(2002, p. 40) “corresponde às águas subterrâneas que são naturalmente recarregadas pela infiltração da parcela das que caem da atmosfera – chuva, neblina e neve, principalmente nos continentes, em geral, e numa bacia hidrográfica, em particular”. Esta perfaz um total de 10 milhões de Km³ e ocorre, regra geral, até a profundidade de 1000 metros, movimentando-se lentamente através do solo/subsolo, podendo desaguar em corpos d’água em períodos de estiagem ou sem chuva. Assim, o autor afirma que a determinação do escoamento básico dos rios constitui, regra geral, uma metodologia consistente de avaliação das recargas naturais da água subterrânea, ou seja, em regiões de rios perenes a contribuição dos fluxos subterrâneos é suficiente para alimentar as suas descargas durante o período sem chuvas. Esta situação ocorre em mais de 90% dos rios brasileiros. Ao contrário, quando os rios têm regime de fluxo temporário, significa que a contribuição dos fluxos subterrâneos não é suficiente para alimentar as suas descargas de base durante o período de estiagem ou sem chuva.

As águas conatas, para Rebouças (2002), são aquelas retidas nos sedimentos, desde a formação dos referidos depósitos, ou foram recarregadas em períodos climáticos favoráveis, a exemplo do que ocorre no *High Plains e Great Plains* (USA) cuja última fase de recarga mais abundante parece ter ocorrido durante o último período glacial.

Para o mesmo autor (op. cit) águas de origem juvenil, por sua vez, são aquelas “geradas pelos processos de formação das rochas graníticas magmáticas, principalmente”. O mesmo autor citando Berner e Berner (1987) comenta que esta é estimada em 0,3Km³/área. Salienta que desta forma, a mesma é quase insignificante se comparada aos volumes de água meteórica.

Do total da água disponível no planeta, a água doce é a que assume maior importância, no que se refere aos usos preponderantes, sem depender de meios técnicos e econômicos para tornar as águas salgadas e salobras potáveis para o ser humano. Tundisi (2000, p. 10) comenta sobre a porcentagem de água doce no planeta que, do total de água doce existente no planeta (2,5%), 69,9% estão sob forma sólida, 29,9% são águas subterrâneas, 0,3% localiza-se em rios e lagos e 0,9% localiza-se em outros reservatórios. É por este motivo que a água presente em subsuperfície (29,9%) apresenta grande importância no abastecimento da população mundial.

A demanda tem crescido tanto que chega faltar para a manutenção de populações em certas áreas com carência de abastecimento de água superficial; em áreas densamente povoadas, e em regiões onde a atividade agrícola (agricultura irrigada localizada em desertos e em outras regiões secas) e industrial requer muita água, estimulou-se o desenvolvimento do abastecimento de águas subterrâneas armazenadas em aquíferos², o que a torna uma fonte importante de abastecimento de água em todo o mundo.

A água subterrânea é a maior reserva de água doce facilmente acessível. Entretanto, muitos reservatórios de água subterrâneos são essencialmente água “fóssil”, que foi armazenada durante períodos geológicos anteriores e mais úmidos, que agora não está sendo recarregada. Sobre esta questão, Odum (1988, p. 162) afirma que “Infelizmente, grande parte desta água subterrânea foi armazenada em épocas passadas, e os reservatórios em regiões áridas ou não estão sendo abastecidos ou estão sendo reabastecidos a uma velocidade mais baixa do que a de utilização pelo homem. A água subterrânea de regiões áridas, como o petróleo, não é renovável”.

A designação de água subterrânea é, conforme Todd (1959, p. 1), “As águas subterrâneas, mencionadas sem nenhuma outra especificação, são geralmente compreendidas como significando a água que ocupa todos os vazios de um estrato geológico”.

Para Guerra & Guerra (1997, p. 14), “água subterrânea é aquela que se infiltra nos solos e nas rochas, caminhando até o nível hidrostático”. Sua utilização cresce ano após ano, apresentando vantagens em relação à água superficial, como: não ocupa espaço em superfície; sofre menor influência nas variações climáticas; é passível de extração perto do local de uso; tem maior quantidade de reservas; tem melhor qualidade (física, química, biológica), tem proteção contra agentes poluidores; os poços são construídos à medida que é necessário mais água; e outras.

² É aquela litologia porosa e permeável, capaz de ceder água economicamente a obras de captação; exemplo: areia arenito; ou seja, o aquífero é um material geológico capaz de servir de depósito e de transmissor da água aí armazenada; assim, uma litologia só será aquífera se, além de conter água, ou seja, seus poros estando saturados (cheios) de água, permita a fácil transmissão da água armazenada; uma argila pode conter água (e muita), mas certamente não a libera por gravidade (WREGE, M. **Termos hidrogeológicos básicos.** Disponível em: <http://www.abas.org.br/estudos/hidrogeologia/termos_hidrogeo.htm> Acesso em: 24 maio 2003).

As desvantagens podem ser: o poço não dá placa de inauguração; o poço não se vê (ou seja, não tem a importância de uma barragem); a água subterrânea não se vê (o que implica uma série de mistificações); as alturas de recalque da água são maiores (o que implica maior gasto de energia); necessita de pessoal especializado (hidrogeólogo, p/ex.) para sua boa captação; pode ter conteúdo excessivo de sais dissolvidos (Wrege, 2003).

Segundo as palavras de Linsley & Franzini (1978), estudos sobre as águas subterrâneas como das águas superficiais não devem ser tratados como estes fossem independentes entre si.

Ao contrário, muitas correntes superficiais são alimentadas, sobretudo por águas subterrâneas. Em outros casos as águas das correntes superficiais constituem a principal fonte de recarga das águas subterrâneas. As duas fontes de abastecimento são realmente interdependentes e a utilização de uma delas pode afetar a disponibilidade de água na outra. Tanto os problemas das águas superficiais como os das águas subterrâneas devem ser considerados em conjunto nos planos de aproveitamento dos recursos hídricos (Linsley & Franzini, 1978, p. 99).

A ocorrência de água subterrânea se dá em formações geológicas permeáveis conhecidas como aquíferos, que, segundo Batalha (1986, p. 13), designa “Formação porosa (camada ou estrato) de rocha permeável, areia ou cascalho, capaz de armazenar e fornecer quantidades significativas de água”. A água presente nestas formações poderá ocupar os poros não preenchidos por matéria mineral sólida. Estes poros, também conhecidos como vazios, interstícios, poros ou espaços porosos (Todd, 1959), variam de tamanho compreendendo estruturas submicroscópicas em argilas e folhelhos a grandes cavernas e túneis em calcários e lavas, limitados por rocha ou argila impermeável que encerra a água (Linsley & Franzini, 1978; Odum, 1988). Dentre as formações rochosas armazenadoras de água subterrâneas as de maior importâncias são os depósitos granulares sedimentares (Todd, 1959).

Para se manter os estoques de água subterrâneas em volumes consideráveis para sua exploração há a necessidade da reposição da água que é extraída, ou seja, o recarregamento dos aquíferos subterrâneos pela água das precipitações. Entretanto, a taxa anual de recarregamento vem se reduzindo. Odum (1988) comenta que “... as atividades humanas tendem a aumentar a taxa do escoamento (pavimentando a terra, retificando e canalizando rios, tornando mais compactos os

solos agrícolas, desmatando etc.), o que reduz o recarregamento do muito importante compartimento de águas subterrâneas”.

Com a finalidade de aumentar o abastecimento natural das águas subterrâneas o homem desenvolveu técnicas para reabastecer artificialmente as bacias das águas subterrâneas. O reabastecimento artificial pode ser definido como o aumento da infiltração natural da água de precipitação ou superficial nas formações subterrâneas por algum método de construção, espalhamento de água ou pela variação artificial das condições naturais (Todd, 1959).

Segundo Todd (1959, p. 241), espalhamento de água refere-se à colocação da água sobre a superfície do terreno a fim de aumentar a quantidade da água que se infiltra no terreno e percola até o nível d'água.

A posição privilegiada, que a Terra encontra em relação ao Sol, proporciona condições favoráveis no recebimento de quantidade suficiente de radiação solar e conseqüentemente temperatura ideal para manter a maior parte da água em nosso planeta em estado líquido. Esta mesma radiação é responsável por um fenômeno importante, o ciclo hidrológico, para a movimentação desta água pelo planeta – formando um ciclo fechado – principalmente para as áreas continentais, que são totalmente dependentes das precipitações para a manutenção da vida na superfície das terras emersas.

Para Odum (1988), energeticamente o ciclo hidrológico é representado por dois circuitos, o circuito “ladeira acima” movido pela energia solar (evaporação) e o circuito “ladeira abaixo” (precipitação) com conseqüente liberação de energia utilizável pelos ecossistemas e realizando trabalho útil para o homem, como, por exemplo, a produção de energia hidrelétrica.

Para Todd (1959), dentro do ciclo hidrológico quase todas as águas subterrâneas constituem uma porção do sistema circulatório de águas da terra, fazendo parte deste ciclo. Para Silveira (1993), o ciclo hidrológico “é o fenômeno global de circulação fechada da água entre a superfície terrestre e a atmosfera, impulsionado fundamentalmente pela energia solar associada à gravidade e à rotação terrestre”. Batalha (1986) considera ciclo hidrológico como a “Sucessão de transformações de estado físico e de movimento da água, através da terra e da atmosfera”.

A precipitação é a principal fonte das águas subterrâneas, podendo a água percolar diretamente do solo até juntar-se às águas subterrâneas ou pode cair

diretamente sobre as águas superficiais, cursos d'água, lagos e reservatórios e em seguida, percolar dos alvéolos fluviais para o subsolo (Linsley & Franzini, 1978).

Segundo Manoel Filho (1997), abaixo da superfície do terreno, a água contida no solo e nas formações geológicas é dividida ao longo da vertical basicamente em duas zonas horizontais: zona não saturada (subdividida em três partes) e zona saturada, de acordo com a proporção relativa do espaço poroso que é ocupado pela água (Quadro 1).

Zonas Horizontais	Descrição
1. Zona não saturada, zona de aeração ou zona vadosa.	Situa-se entre a superfície freática e a superfície do terreno e nela os poros estão parcialmente preenchidos por gases e por água.
1.1. Zona de água do solo ou zona de evaporação	Situa-se entre os extremos radiculares da vegetação e a superfície do terreno.
1.2. Zona intermediária	Compreende entre o limite de ascensão capilar da água e o limite de alcance das raízes das plantas.
1.3. Zona capilar	Estende-se da superfície freática até o limite de ascensão capilar da água. Adota-se o conceito de franja capilar como um limite abaixo do qual o solo é considerado praticamente saturado (cerca de 75%).
2. Zona saturada ou zona de saturação	Situa-se abaixo da superfície freática e nela todos os vazios existentes estão preenchidos por água.

Quadro 1 - Distribuição vertical da água no subsolo
Fonte: Manoel Filho (1997)

Na definição de aquífero, tem uma importância grande o tipo de material rochoso das formações geológicas nos reservatórios de água. Segundo Thomas (1952), *apud* TODD (1959, p. 23), “Provavelmente 90 por cento de todos os aquíferos aproveitados consistem de rochas não consolidadas, principalmente cascalhos e areia. Estes aquíferos podem se divididos em quatro categorias, com base na forma de ocorrência: cursos de água, vales abandonados e soterrados, planícies e vales entre montanhas”.

Os aquíferos ocupam, a maioria deles, grandes extensões em área, tornando-se reservatórios subterrâneos de armazenamento. A recarga do aquífero poderá ser por meio natural ou artificial. Para Hirata & Ferreira (2001, p. 45), a recarga dos sistemas aquíferos é feita por dois mecanismos distintos: a natural, com água da precipitação que infiltra no solo e atinge o aquífero, e a induzida, representada por

águas provenientes de fugas das redes de água e esgoto. Os aquíferos podem ser classificados como não confinados ou confinados.

O aquífero não confinado é aquele em que o nível d'água serve como superfície superior da zona de saturação. É também conhecido como livre, freático, ou não artesiano. Por outro lado, o aquífero confinado, também conhecido como artesiano ou aquífero sob pressão, ocorre quando o nível d'água está confinado sob pressão maior do que a atmosférica por estratos subjacentes relativamente impermeáveis (Todd, 1959).

As águas subterrâneas encontram-se em constante movimento abaixo do nível do solo e este movimento varia no tempo e no espaço dependendo diretamente do tipo de formação rochosa atravessada. Este movimento da água está ligado diretamente à permeabilidade das rochas e dos solos.

Para Guerra & Guerra (1997, p. 479), permeabilidade é "(...) a capacidade que possuem certas rochas e solos de transmitir a água pelos poros ou interstícios, sendo expressa pela quantidade de água que passa por uma secção em uma unidade de tempo, segundo um gradiente hidráulico". Existem terrenos que são mais permeáveis que outros. Ela é inerente a certos tipos de rochas como, por exemplo, areias e seixos.

Outro conceito importante no estudo de águas subterrâneas refere-se a percolação. Para Batalha (1986, p. 87), percolação é o movimento de água feito através dos poros ou fissuras de um solo ou rocha, sob pressão hidrodinâmica, exceto quando o movimento ocorre através de aberturas amplas, tais como covas. Este movimento é geralmente lento e dá origem ao lençol freático (Guerra & Guerra, 1997).

Para que a água subterrânea possa ser utilizada para fins mais nobres como o abastecimento público, à qualidade da água é tão importante quanto a disponibilidade em quantidade suficiente para ser minerada (extraída). Entretanto, a qualidade desejada depende de sua finalidade, por exemplo, água potável; água utilizada na indústria ou água para irrigação, há variação na qualidade. Quanto maior a utilização das águas subterrâneas tanto maior é o cuidado visando a sua proteção.

Para o estabelecimento de critérios de qualidade haverá a necessidade da especificação dos padrões químicos, físicos e bacteriológicos, assim como a metodologia com vistas à apresentação dos resultados das análises da água. Desse

modo, será possível identificar se o aquífero está sendo contaminado, qual a substância contaminante e o possível local que originou a contaminação.

Pesquisadores estão permanentemente preocupados com a possibilidade de que as reservas de águas subterrâneas possam ser contaminadas, sejam elas, pelo desenvolvimento tecnológico que a sociedade moderna imprime, ou pelo uso excessivo; a qualidade tende a sofrer as conseqüências. Pensando nesta possibilidade, cientistas, pesquisaram e caracterizaram a vulnerabilidade dos aquíferos subterrâneos.

A proteção dos recursos hídricos subterrâneos é cada vez mais necessária uma vez que a maior parte da água doce, de fácil disposição ao homem, está em lençóis freáticos, portanto, sua preservação é imprescindível a todas as sociedades, como diz Odum (1988), a água é fator limitante maior do que a energia, significando que, sem a água em quantidade e de qualidade, a sociedade não se desenvolve.

A água de aquíferos confinados ou livres poderá ser extraída com a perfuração de poços tubulares (popularmente chamado poços artesianos), que são alternativas baratas ao abastecimento humano, agropecuário ou industrial, mas, para tanto, deverão ser bem projetados e construídos para evitar a contaminação por dejetos domésticos, industriais, fertilizantes, entre outros.

3.2. Vulnerabilidade natural de sistemas aquíferos e risco de contaminação

O conceito de vulnerabilidade de aquíferos, segundo Ribeira (2004), foi inicialmente utilizado por Le Grand (1964), nos EUA, e Albinet & Margat (1970), na França, e mais amplamente nos anos 1980 por vários outros autores (Aller *et al*, 1985; Bachmat & Collin, 1987, Foster, 1987, Foster & Hirata, 1988). Desde então, esse conceito tem sido usado para expressar:

- a) características intrínsecas que determinam a sensibilidade de um aquífero ser adversamente afetado por uma carga contaminante antrópica imposta;
- b) classificação dos aquíferos baseada na importância do recurso hídrico que é ou será utilizado no presente e no futuro incluindo a possibilidade de ser substituído por outro recurso; e
- c) classificação baseada na importância do aquífero em manter áreas ecológicas importantes.

O termo vulnerabilidade tem produzido, em alguns casos, uma certa vulgarização. Desde um ponto de vista geral (que também pode ser atribuído a outros elementos ambientais como o ar, o mar, por exemplo) poder-se-ia definir-se a vulnerabilidade como a sensibilidade ou susceptibilidade que tem um determinado meio, incluindo um determinado território, frente aos impactos de origem natural ou antrópica. Assim, por exemplo, é usual falar de vulnerabilidade dos aquíferos de uma zona determinada frente à contaminação de hidrocarbonetos, ou a vulnerabilidade dos ecossistemas frente a atividades antrópicas (Ribeira, 2004).

A vulnerabilidade natural ou intrínseca nos aquíferos pode ser definida, conforme Ribeira (2004), como uma serie de atributos ou características do mesmo que são o solo, a zona não saturada, os parâmetros hidráulicos do aquífero e a recarga, que controlam a aptidão do aquífero para fazer frente a um impacto indeterminado e sua capacidade de auto-restauração.

No entendimento de Foster (1987) *apud* FOSTER & HIRATA, (1993, p. 67), o termo vulnerabilidade à contaminação do aquífero é usado para representar as características intrínsecas que determinam a susceptibilidade de um aquífero de ser afetado por uma carga contaminante. Sendo que a vulnerabilidade do aquífero é em função da:

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

Estes dois componentes interagem com os seguintes componentes da carga contaminante no subsolo:

- O modo de disposição do contaminante no subsolo e em particular a magnitude de qualquer carga hidráulica associada;
- A classe do contaminante, em termos de sua mobilidade e persistência.

Esta interação culminará no tempo de residência na zona não-saturada e a demora na chegada do contaminante ao aquífero. Estabelecerá também o grau de atenuação, retenção ou eliminação, antes da chegada à zona saturada (Foster & Hirata, 1993, p. 67).

Dependendo do tipo de contaminante, se o mesmo for persistente e não degradável, e gerado por uma atividade contaminante amplamente distribuída, a tendência, ao longo dos tempos, é de todos os aquíferos se tornarem vulneráveis, deste modo, a diluição do contaminante no aquífero pode não diminuir o efeito deste

contaminante (Foster & Hirata, 1993). Para os aquíferos considerados com a menor vulnerabilidade à contaminação, estes tendem a ser os mais difíceis de serem reabilitados, quando contaminados, podendo ser considerados de alta vulnerabilidade à contaminação.

O maior problema para quem depende da água subterrânea, seja para o abastecimento público, para a irrigação ou para a utilização na indústria, está no seu esgotamento e na contaminação dos aquíferos, sobre este assunto Odum (1988) considera que:

O esgotamento não é a única ameaça que paira sobre a água subterrânea. A contaminação por substâncias tóxicas pode ser uma ameaça até maior. Pelo menos, o problema de lixo tóxico apresenta soluções tecnológicas reais, se as sociedades tiverem vontade e capacidade de pagar o preço de proteger um recurso aquático que, a longo prazo, é mais valioso do que o petróleo ou o ouro. Na verdade, seria possível argumentar-se em prol da preposição de que a água doce utilizável é potencialmente um fator limitante maior para a população do que a energia (Odum, 1988, p. 162-164).

Foster & Hirata (1993) salientam que a carga contaminante é proveniente das atividades antrópicas realizadas em superfície. A interação entre as características naturais do aquífero e as atividades antrópicas resultam na caracterização preliminar de áreas de maior ou menor risco de deterioração. Dois instrumentos para a proteção das águas subterrâneas são utilizados em vários países: perímetros de proteção de poços e fontes e mapas de vulnerabilidade à poluição de aquíferos.

Para Hirata (2001) reconhecem-se três situações distintas, segundo o histórico de ocupação do terreno:

- áreas onde as atividades já estão instaladas (fontes potenciais existentes);
- áreas onde já se conhece a contaminação do aquífero (fontes herdadas);
- áreas onde as atividades serão instaladas (fontes futuras).

Em cada um dos casos, a vulnerabilidade de aquíferos pode ser utilizada para priorizar a ação do órgão gestor, buscando aquelas atividades que oferecem maiores perigos de contaminação (interação entre vulnerabilidade e carga contaminante potencial ou restringir ou permitir a instalação de uma atividade segundo a sua vulnerabilidade). Em qualquer um dos casos, a vulnerabilidade de aquíferos pode ser usada no zoneamento do terreno, identificando aquelas atividades que não são compatíveis com os índices atribuídos ao terreno.

Para avaliar ou mapear a vulnerabilidade natural de aquíferos quanto ao risco de contaminação são utilizados vários métodos. A seguir no Quadro 2 apresentam-se alguns dos métodos mais empregados, com seus respectivos fatores de análise.

MÉTODO	AVALIAÇÃO	FATORES	REFERÊNCIA
<i>Surface Impoundment Assessment</i>	Sistema de decomposição de águas servidas	- zona não saturada - Importância do recurso - Qualidade das águas subterrâneas - Periculosidade do material	Lê Grand (1964)
<i>Landfill Siste Ranking</i> (Método <i>Le Grand-Brawn</i>)	Aterros sanitários e novos e em operação	- Distância aterro e poço produtor - Profundidade do nível da água - Gradiente do aquífero - Permeabilidade e capacidade de atenuação	Lê Grand (1983)
<i>Siste Ranking System</i>	Disposição de produtos químicos, novos e em operação.	- Solos, caract. Hidráulica sorção e tamponamento químico - Hidrodinâmicas do aquífero - Ar - População próxima	Hegerty <i>et al</i> (1973)
Poluição dos lençóis aquíferos	Vulnerabilidade geral	- Geologia (litologia e estrutura)	Taltasse (1972)
<i>Waste-soil interaction matrix</i>	Disposição de resíduos sólidos e líquidos e novas indústrias	- Efeitos na saúde - Caract. do produto químico - Comportamento do produto - Capacidade do solo/atenuação - Hidrogeologia - Caract. do local	Philips <i>et al</i> (1977)
<i>Siste Ranking Methodology</i>	Disposição de resíduos sólidos e líquidos e novas indústrias	- Receptor população/uso da água/uso local/degradação ambiental - Caminho, nível e tipo de contaminação, profundidade do nível da água, pluviometria, permeabilidade do solo - Caract. do resíduo-toxicidade, persistência - Prática de manejo-aspectos operacionais e construtivos	Kulfs <i>et al</i> (1980)
DRASTIC	Vulnerabilidade Geral	- D profundidade da água subterrânea - R recarga total - A meio aquífero - S solo - T topografia - I impacto na zona vadosa - C condutividade hidráulica	Aller <i>et al</i> (1985)
GOD	Vulnerabilidade Geral	- G Tipo de aquífero - O litologia zona vadosa - D profundidade da água	Foster & Hirata (1988)
<i>Grandwater Vulnerability Map for Nitrate</i>	Potencial de lixiviação de nitrato	- Tipo de solo - Caract. Hidráulica e litológica do aquífero	Carter <i>et al</i> (1987)
<i>Sintacs</i>	Vulnerabilidade Geral	- Igual ao DRASTIC, porém com pesos diferentes.	Civita <i>et al</i> (1990)
Perigo associado a sistema de saneamento <i>in situ</i>	Avaliar áreas de maior risco por sistema de saneamento <i>in situ</i>	- Vulnerabilidade (GOD) - Densidade população - Análises indicadores físico-químicos (Condutividade elétrica)	Ferreira & Hirata (1993)

Quadro 2 - Principais métodos para a determinação da vulnerabilidade à poluição de aquíferos.

Organização: Camponogara, I.

Fonte: Hirata (1999).

Dentre os métodos mais utilizados dois, se destacam: o Modelo de “GOD”, que trata da vulnerabilidade geral (Foster & Hirata, 1988), e o modelo DRASTIC (Aller *et al.*, 1985), que se constitui num sistema padronizado de avaliação da vulnerabilidade natural de aquíferos a partir de dados decodificados em planos de informações e é um dos índices de vulnerabilidade mais difundido atualmente.

A metodologia de DRASTIC foi desenvolvida pela *National Ground Water Association*, e é empregada pela Agência de Proteção Ambiental Norte Americana (US-EPA), constituindo-se num modelo qualitativo para avaliar a poluição potencial das águas subterrâneas usando variáveis hidrogeológicas da região em estudo (Aller *et al.*, 1987). Este modelo foi desenvolvido para avaliar áreas maiores que 0,4Km² (200x200m). As variáveis, denominadas fatores DRASTIC, são relacionadas entre si através de uma equação simples, aplicada a cada unidade geográfica de trabalho. Essa metodologia pode sofrer alterações, ou seja, podem ser feitas adaptações conforme as características específicas da área em estudo.

A outra metodologia muito utilizada para as pesquisas de vulnerabilidade natural à contaminação dos recursos hídricos subterrâneos é a de “GOD”, por Foster & Hirata (1985), que consiste no mapeamento da vulnerabilidade de aquíferos e na definição de áreas de maior risco. Isto se dá a partir do reconhecimento e classificação de atividades humanas que oferecem perigo de contaminação às águas subterrâneas.

A metodologia de “GOD” conforme Foster *et al.* (2003, *apud* FRANTZ, 2005) baseia-se em três parâmetros para avaliação do índice de vulnerabilidade. Informa-se que esta metodologia é assim chamada devido suas iniciais provirem do inglês, significando respectivamente *Groundwater hydraulic confinement* (grau de confinamento hidráulico), *Overlaying strata* (Ocorrência de substrato litológico), *Depth to groundwater table* (Distância da água, ou seja, profundidade do lençol freático ou teto do aquífero confinado).

Embora reduzidas, essas três características contêm, qualitativamente, os parâmetros essenciais para definir a vulnerabilidade de um aquífero quanto ao risco de contaminação.

Esse tipo de trabalho, de caráter expedito, procura tirar partido de dados existentes e levantamentos hidrogeológicos disponíveis, sem que necessariamente sejam utilizados recursos e atividades adicionais. Portanto, são métodos que devem ser claramente diferenciados daqueles que se baseiam em investigações de campo,

incluindo amostragens, medições de nível da água e de efluentes e, em muitos casos, perfuração de poços de monitoramento, os quais pertencem a um estágio mais avançado de estudo.

Estas metodologias são muito importantes, pois a demanda de água subterrânea tem-se intensificado nos últimos tempos o que reforça ainda mais o desenvolvimento destes métodos.

Entretanto, é importante ressaltar que antes de se definir qual o método a utilizar é necessário investigar as condições quanto ao risco de contaminação. Neste sentido, Foster & Hirata (1988) propõem um roteiro básico de avaliação, em separado da vulnerabilidade natural do aquífero e da carga poluidora, de cuja interação deve resultar uma caracterização preliminar das áreas de risco (Quadro 3).

NÍVEL DE AVALIAÇÃO	ASPECTOS-CHAVE			ESCALAS DE TRABALHO	
I. Reconhecimento preliminar (existência do risco)	Baseado em dados existentes	Sem amostragem	Ênfase aspectos qualitativos	Perfuração não justificável	Normalmente estado/província 1:250.000 a 1:500.000 (dados 10Km)
II. Avaliação Sistemica (grau de risco)					Normalmente urbano/município 1:50.000 a 1:500.000 (dados 1-2Km)
III. Reconhecimento de campo	Requer coleta de dados de campo	Requer amostragem e análise.	Ênfase aspectos quantitativos	Requer perfuração	Local 1:10.000 a 1:25.000 ou menor (dados 50-100m)
IV. Reconhecimento por rede de monitoramento					Local 1:25.000 a 1:50.000 a 1:50.000 (dados 200-500m)
V. Investigação completa de campo					Local 1:10.000 a 1:25.000 ou menor (dados 50-100m)

Quadro 3 - Níveis de avaliação do risco de contaminação das águas subterrâneas.

Fonte: Foster & Hirata, 1988.

Para as condições brasileiras, considera-se recomendável a realização de trabalhos de reconhecimento básico, em âmbito estadual ou regional (escala 1:250.000 ou 1:500.000), da situação de vulnerabilidade e risco de contaminação dos aquíferos, de modo a identificar e a delimitar áreas potencialmente críticas.

A avaliação da vulnerabilidade natural de uma área e o comportamento de um determinado produto com risco potencial de contaminação constituem procedimentos de alta relevância nos estudos de avaliação de riscos ambientais.

3.3. Fontes potenciais de contaminação das águas subterrâneas

O ambiente natural é modificado pela interferência do homem. As ações humanas sobre esse sistema mudam o caráter natural do mesmo; as construções e atividades econômicas sobre estas áreas colocam em risco a qualidade desses recursos.

Considerando que na natureza existe a interação da água superficial com a água subterrânea, os resíduos produzidos pelas atividades antrópicas, uma vez lançadas em superfície, contaminam as águas da superfície que, por sua vez, carregam esses poluentes para o subsolo colocando em risco os reservatórios de água subterrânea.

As atividades humanas em superfície segundo Foster (1993 *apud* HIRATA, 1997) pode alterar e induzir novos mecanismos de recarga ao aquífero, modificando a taxa, a frequência e a qualidade da recarga de águas subterrâneas. Em climas semi-áridos, tais mecanismos são extremamente significativos, mas podem ocorrer, com igual importância, em climas úmidos.

A água subterrânea é uma solução diluída de inúmeros elementos e compostos sólidos, líquidos ou gasosos em proporções diversas, provenientes do ar (durante o processo de condensação e precipitação), dos solos e das rochas (nas quais circunda ou é armazenada) e do contato com as atividades humanas (Feitosa *et al.* 1997). Sua poluição pode ser definida como uma alteração artificial da qualidade físico-química da água, suficiente para superar os limites ou padrões pré-estabelecidos para determinado fim.

Por outro lado, a água é considerada contaminada quando esta apresenta organismos patogênicos, substâncias tóxicas e/ou radioativas, em teores prejudiciais à saúde do homem e de outras espécies animais. Desta forma, toda a água contaminada é poluída, porém, nem toda a água poluída (desde que não afete a saúde do homem) é contaminada.

A poluição das águas subterrâneas ocorre quando os poluentes atingem o solo, que pode absorvê-los com se fosse uma esponja; porém, muitas vezes, estes

poluentes chegam até a água subterrânea. Então, a poluição pode se dar por duas vias distintas: uma pelo transporte de poluentes pelas águas da chuva, que rapidamente se infiltram até alcançar os níveis da água subterrânea; ou quando os poluentes já atingiram o aquífero, e se locomovem lateralmente. Os poluentes são produtos da ação do homem principalmente nas atividades domésticas, industriais, agrícolas e de extração mineral (Silva, 2003 *apud* OSÓRIO, 2004).

As contaminações das águas subterrâneas podem ter origens diversas, sendo atualmente mais comuns àquelas relacionadas diretamente com atividades industriais, domésticas e agrícolas.

As indústrias ainda podem causar a contaminação das águas subterrâneas por meio das águas utilizadas em suas atividades, contendo compostos químicos, metais; elementos radioativos que retornam ao meio ambiente e através de acidentes com produtos químicos.

As atividades domésticas podem produzir contaminação subterrânea através do chorume de aterros sanitários; acidentes com rompimento de fossas sépticas ou de redes de esgotos. As atividades agrícolas podem contaminar a água subterrânea através dos solutos dissolvidos por chuva ou irrigação; fertilizantes minerais naturais; sais, agrotóxicos etc.

A distribuição espacial da poluição e a contaminação que esta pode originar, conforme Manoel Filho (1997), pode ser:

- Pontual, quando a fonte está concentrada numa pequena superfície, como, por exemplo, um poço tubular ou escavado;
- Difusa, quando a fonte de contaminação se estende, mesmo com baixa concentração, sobre uma grande superfície, como é o caso de áreas de irrigação ou áreas urbanas, ou do transporte por via atmosférica;
- Linear, quando a fonte de contaminação é um rio ou um canal de drenagem,

Como exemplos de fontes localizadas, citam-se as tubulações emissárias de esgotos domésticos ou industriais e as galerias de águas pluviais. Como fontes não localizadas, podem ser incluídas as águas do escoamento superficial ou de infiltração.

Para Mota (1997), as principais fontes de poluição das águas subterrâneas são:

- Infiltração de esgotos a partir de sumidouros ou valas de infiltração (fossas sépticas);

- Infiltração de esgotos depositados em lagoas de estabilização ou em outros sistemas de tratamento usando disposição no solo;
- Infiltração de esgotos aplicados no solo em sistemas de irrigação;
- Percolação do chorume resultante de depósitos de lixo no solo;
- Infiltração de água contendo pesticidas, fertilizantes, detergentes e poluentes atmosféricos depositados no solo;
- Infiltração de outras impurezas presentes no solo;
- Infiltração de águas superficiais poluídas;
- Vazamento de tubulações ou depósitos de subsolo;
- Intrusão de água salgada;
- Resíduos de outras fontes: cemitérios, minas, depósitos de material radioativo;
- Ainda, segundo Silvério da Silva *et al* (2005), pode-se citar resíduos de postos de combustíveis e/ou lava-a-jatos, óleos-graxas, detergentes (lavagem) .

Em se tratando da proteção deste recurso natural, em função da dificuldade de se estabelecer uma delimitação de área para o estudo, das águas subterrâneas, torna-se difícil determinar um arranjo institucional eficaz para aplicação das políticas de gerenciamento e proteção desse recurso natural (Hirata, 1997).

O autor ainda coloca outros fatores que dificultam a implantação de políticas de proteção das águas subterrâneas, tais como:

- dúvidas sobre as características do recurso hídrico subterrâneo, devido à falta de exatidão nas estimativas tanto de recarga como de armazenamento do aquífero;
- incertezas sobre a escala de risco de contaminação das águas subterrâneas e problemas ocasionados pelo transporte de contaminantes;
- elevado número de sistemas de abastecimento urbano e rural que, normalmente, são muito vulneráveis e;
- problemas legais relacionados com a exploração das águas subterrâneas ou com as fontes de poluição existentes, anteriores à introdução de leis e Política de Proteção dos Aquíferos;
- Além disso, pode-se citar a não existência de selo sanitário em concreto conforme NBR 12244/1993.

Apesar das dificuldades encontradas para se por em prática as leis de proteção dos recursos hídricos subterrâneos, muitos programas já foram implantados e outros estão em estudos, inclusive pesquisas internacionais, objetivando a proteção e sustentabilidade dos sistemas aquíferos transfronteiriços.

3.4. Gerenciamento dos Recursos Hídricos Subterrâneos

Os recursos hídricos são bens de relevante valor para a promoção de qualidade de vida de uma sociedade. A água é um bem de consumo final ou intermediário na quase totalidade das atividades humanas. Com o aumento da intensidade e variedade desses usos ocorrem conflitos entre usuários. Uma forma eficiente de evitar e administrar estes conflitos é a gestão integrada do uso, controle e conservação dos recursos hídricos (Lanna, 2001, p. 727)

A gestão das águas subterrâneas, especialmente nas áreas densamente urbanizadas, onde o crescimento populacional é cada vez mais intenso e a demanda da água para abastecimento em decorrência disto também é elevada, torna-se evidente, mostrando ser essencial para que se possam dar condições de realização de um gerenciamento integrado entre águas superficiais e subterrâneas.

Para gerenciar de forma sustentável um aquífero é necessário levar em consideração, além dos processos hidrogeológicos, os critérios econômicos, ambientais e institucionais (Lanna, 2001).

A necessidade de planejamento e da criação de legislação que regulamente o uso dos recursos hídricos subterrâneos de forma a assegurar a sua sustentabilidade fez com que alguns estados brasileiros criassem legislações específicas quanto a política e gestão das águas subterrâneas.

A estruturação para operacionalização destas leis é cada vez mais necessária e urgente. Este recurso já se tornou à única solução para o abastecimento, em algumas cidades, e em muitas outras, o suporte essencial. Estas legislações, quando estiverem em pleno funcionamento, poderão diminuir sensivelmente os danos econômicos e morais causados pelos racionamentos (Lanna, 2001, p. 727).

O mesmo autor destaca que o desenvolvimento da gestão integrada das águas subterrâneas e superficiais exige a participação de toda a sociedade. Além disso, a sociedade como um todo deve estar preparada para defender as águas e a qualidade de vida dentro de uma compreensão sistêmica e integrada.

Para Lanna (2001), a interação que existe entre as águas superficiais e subterrâneas é dinâmica e tem dupla via, ou seja, se as ligações entre os sistemas forem rompidas, pelo uso inadequado do solo e do ambiente, corre-se o risco de não ter os rios perenizados nas secas ou as catástrofes aumentadas em períodos de cheias. É importante informar a sociedade sobre o alcance econômico da água

subterrânea para o consumo humano, principalmente, e suas implicações sobre a saúde do ambiente e da população.

Em função do intenso uso dos recursos naturais e da poluição dos recursos hídricos superficiais surge a necessidade de se desenvolver programas visando a proteção desses recursos. A água, tanto superficial como a subterrânea, é um recurso vulnerável, que já é considerado escasso no que se refere à qualidade. É, portanto de fundamental importância que se criem leis de proteção e de conservação dos mananciais que ainda se encontram preservados. Sabe-se que aquíferos muito contaminados são muito difíceis de serem recuperados, sobretudo quando envolvendo substâncias extremamente tóxicas, como compostos orgâno-sintéticos. As razões não são somente econômicas, mas técnicas.

“... prevenir a contaminação é melhor que remediá-la. Para os recursos hídricos, a preservação consiste em estabelecer um programa claro e eficiente de proteção dos aquíferos e controle das atividades humanas, planejando e ordenando a ocupação e o uso do solo. É condição essencial para o desenvolvimento de estratégias, visando a preservação dos recursos hídricos, o estabelecimento de áreas ou atividades com maior risco de degradação dos aquíferos, a fim de priorizar a aplicação de recursos técnicos e financeiros em locais de maior interesse sócio-econômico e ambiental” (Foster & Hirata, 1993, p. 7).

Segundo Solanes (1997), a América Latina está passando por um processo de mudança acelerado em matéria de legislação de águas, derivado de novas posturas filosóficas, da necessidade de participação do setor privado, sobretudo com injeção de capital e em muitos casos devido a inoperância do sistema estatal em matéria de serviços públicos. As leis das águas em sua reformulação devem contemplar os acertos da legislação anterior e reunir os princípios fundamentais, nos avanços tecnológicos, os critérios e experiências mais modernas nesta temática, especialmente na planificação hídrica, na bacia como unidade de planejamento e gestão de recurso, (comissão multisetorial) e na concentração de dados hidrológicos.

Com relação à proteção dos recursos hídricos, a legislação brasileira é bastante avançada em comparação a outros países da América Latina. As ações políticas de proteção aos recursos hídricos no Brasil têm por finalidade gerenciar e controlar o uso desse recurso natural.

Nesse sentido, as bacias hidrográficas foram adotadas como unidades de implantação dessas políticas de gerenciamento por serem consideradas um sistema, ou seja, são compostas por um conjunto de elementos relacionados entre si; onde

estão incluídos elementos naturais (aqüíferos, rios, vegetação), elementos introduzidos pelo homem (canais, poços, barragens) e práticas econômicas (agricultura e indústria).

Bacia Hidrográfica definida como conjunto de terras drenadas por um rio principal e seus afluentes. Nas depressões longitudinais e verifica a concentração das águas das chuvas, isto é, lençol de escoamento superficial, dando o lençol concentrado – os *rios*. A noção de bacia hidrográfica obriga naturalmente a existência de cabeceiras ou nascentes, divisores d'água, cursos d'água principais, afluentes, subafluentes etc (Guerra & Guerra, 1997, p. 76-77).

Existem muitos conceitos para a caracterização de estudo das águas superficiais. Entretanto, para estudo das águas subterrâneas, não existe uma delimitação de área específica, mesmo porque as águas subterrâneas, ou os aqüíferos são entendidos como estruturas que retêm água infiltrada e podem ter prolongamentos além dos limites de uma bacia hidrográfica, de fronteiras municipais, estaduais, nacionais e até mesmo transnacionais (Osório, 2002).

Para fins de estudo e de implantação de leis de proteção dos recursos hídricos, só existem, atualmente, projetos destinados às águas superficiais. No que diz respeito às águas subterrâneas, não existe uma estratégia bem definida, isso deve-se ao fato de os aqüíferos transcenderem os limites políticos dos municípios, estados e até países, como é o caso do Sistema Aqüífero Guarani (SAG) que abrange vários estados do Brasil além de partes do Uruguai, Paraguai e Argentina.

Neste sentido, entende-se que é necessária a implementação de estratégias e ações que contemplem essas deficiências, de modo a garantir o uso racional e sustentável dos recursos hídricos subterrâneos.

3.5. Sistema Aqüífero Guarani

O Sistema Aqüífero Guarani é talvez o maior manancial de água doce subterrânea transfronteiriço do mundo, estendendo-se desde a Bacia Sedimentar do Paraná – Brasil, Paraguai e Uruguai – até a Bacia do Chaco – Paraná na Argentina, principalmente. Está localizado no centro-leste da América do Sul, entre as coordenadas 12° e 35° de latitude sul e 47° e 65° de longitude oeste, ocupando aproximadamente 75% da bacia do Paraná. Tem extensão total aproximada de 1,2 milhões de Km², sendo 840 mil Km² no Brasil, 225,5 mil Km² na Argentina 71,7 mil

Km² no Paraguai e 58,0 mil Km² no Uruguai (Rocha, 1997). Na Figura 2 apresenta-se a representação cartográfica do Sistema Aquífero Guarani, sendo que neste pode-se ver as áreas de confinamento aquífero.

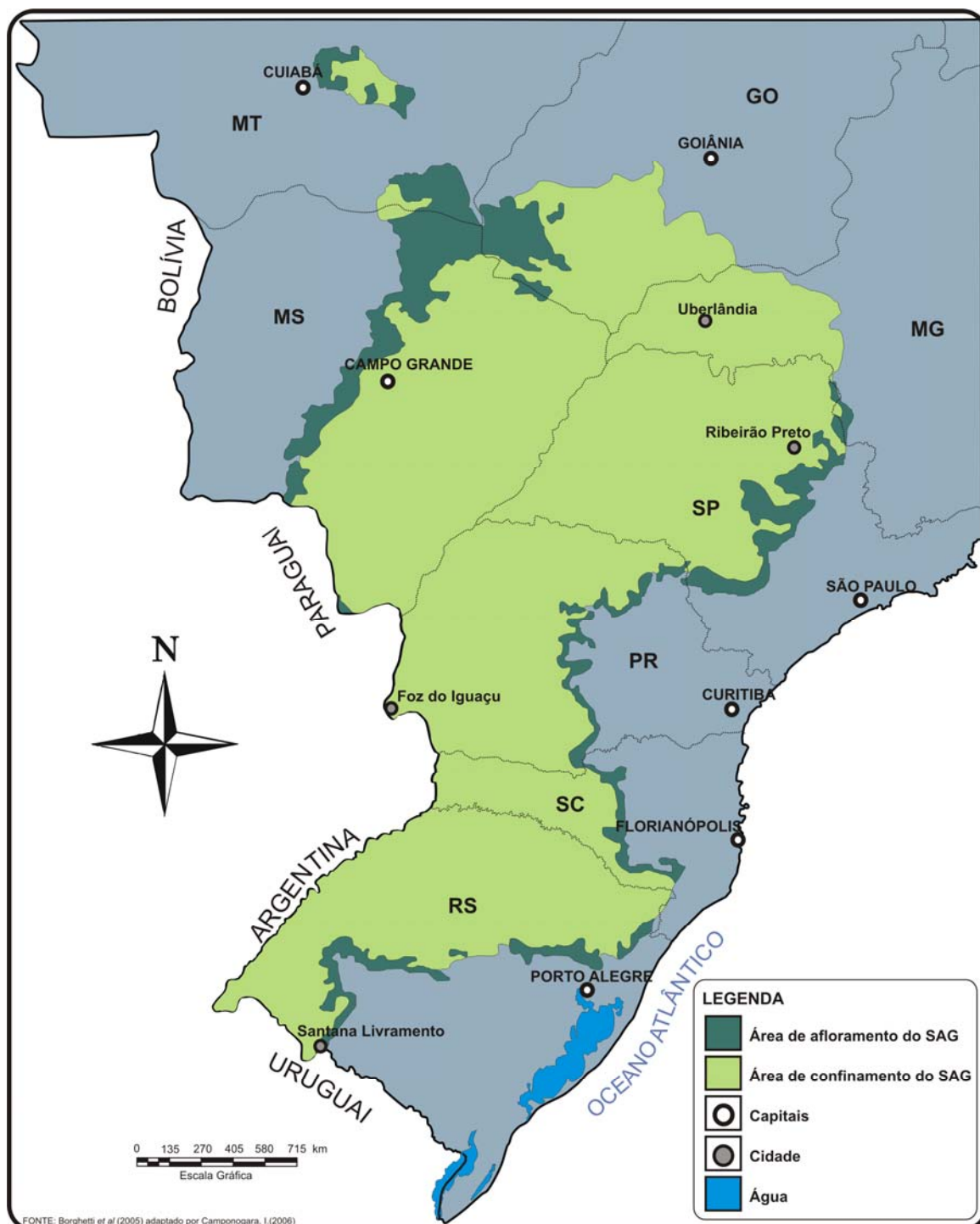


Figura 2 - Mapa esquemático do Sistema Aquífero Guarani.
Fonte: adaptado de Borghetti *et al.* (2005) por Camponogara, I. (2006)

O termo Aqüífero Guarani é a denominação formal dada ao reservatório transfronteiriço de água subterrânea doce, formado pelos sedimentos flúvio-lacustres do período Triássico (245-208 milhões de anos) – formação Pirambóia e Rosário de Sul no Brasil, Buena Vista no Uruguai; e sedimentos eólicos desérticos do período Jurássico (208-144 milhões de anos) – formações Botucatu no Brasil, Misiones no Paraguai e Tacuarembó no Uruguai e Argentina, (Rocha, 1997). Esta denominação foi dada em homenagem à nação Guarani que habitava essa região nos primórdios do período colonial. Vale salientar que este sistema aquífero foi primeiramente denominado de Aqüífero Gigante do Mercosul, por ocorrer nos quatro primeiros países participantes do referido acordo comercial (Araújo *et al.* 1995).

Para Machado (2005) pensar que o SAG é um sistema transfronteiriço é um mito, pois em seu ponto de vista o mesmo é um sistema estanque e suas águas no Rio Grande do Sul não ultrapassam as fronteiras. Além disso, não existe um único aquífero, homogêneo, ele é compartimentado e a quantidade e qualidade das águas variam de região para região.

Este aquífero é constituído de várias rochas sedimentares pertencentes à Bacia Sedimentar do Paraná. Das rochas que compõem o aquífero, a mais importante é o arenito Botucatu, de idade triássico superior a jurássico inferior (190 milhões de anos atrás). Este arenito foi depositado em ambiente desértico, o que explica as características que faz dele um ótimo reservatório de água: Os grãos sedimentares que o constituem são de grande homogeneidade, havendo pouco material fino (matriz) entre os mesmos. Isto confere a este arenito alta porosidade e alta permeabilidade. A arquitetura do pacote sedimentar que constitui o Aqüífero Guarani é resultante da presença dos derrames de lavas basálticas sobre eles depositados; da atividade de falhamentos e arqueamentos regionais; e do soerguimento das bordas da bacia sedimentar do Paraná.

A espessura total do aquífero varia de valores superiores a 800 metros até a ausência completa de espessura em áreas internas da bacia. As variações na espessura são atribuídas ao controle estrutural durante a deposição e ao controle erosional do ambiente desértico. As reservas permanentes, água acumulada ao longo do tempo, são da ordem de 45.000Km³, considerando uma espessura aquífera média de 250m e porosidade efetiva de 15%, e corresponde à somatória do volume de água de saturação do aquífero mais o volume de água sob pressão.

A combinação da qualidade da água ser, regra geral, adequada para consumo humano, em função do aquífero apresentar boa proteção contra os agentes de poluição que afetam rapidamente as águas dos rios e outros mananciais de água de superfície, aliado ao fato de haver a possibilidade de captação nos locais onde ocorrem as demandas e serem grandes as suas reservas de água, faz com que o Aquífero Guarani seja o mais econômico, social e flexível para abastecimento do consumo humano na área. O teor médio de sólidos totais dissolvidos está ao redor de 200mg/L, sendo uma ótima água para consumo humano. Porém, alguns poços perfurados no Paraná forneceram água com teor elevado de flúor (12mg/L), sendo impróprio para consumo humano. Ao que parece esta não é a química predominante das águas do aquífero.

Em pesquisa desenvolvida no estado do Rio Grande do Sul, no município de Santa Maria, Silvério da Silva *et al.* (2000 apud SILVÉRIO DA SILVA, 2002) estudou as concentrações de flúor em 28 poços tubulares constatou apenas três valores acima do VMP (valor máximo permissível) estipulado pela Portaria Nº 518/2004, fixado em 1,5mg/L. Em 2002 citaram-se valores de até 11 mg/L em águas subterrâneas do SAG nos municípios de Venâncio Aires e Santa Cruz do Sul, sugerindo que nem todas as águas do SAG são doces, nem potáveis.

Porém, Machado (2005), em pesquisas sobre a qualidade das águas do SAG constatou que em muitos lugares, a qualidade das águas, não é boa nem para o consumo humano e nem para irrigação, por ser salobra.

Em regiões onde o aquífero está a mais de 1000m de profundidade a água pode atingir temperaturas de até 50°C, sendo muito útil em alguns processos industriais, hospitais, no combate à geada e para fins de recreação e lazer.

O aquífero pode ser dividido em três zonas principais no que se refere à proteção de sua imensa reserva de águas. Primeiramente as zonas de exposição livre do aquífero, onde o risco de contaminação é grande e onde a exploração é maior, mais barata, porém de menor intensidade pontual. Posteriormente têm-se as zonas produtoras de confinamento, onde o grau de proteção do aquífero é bem maior, pois os outros aquíferos sobrepostos a ele "filtram" a recarga. Por fim a terceira é a zona de descarga do aquífero, próxima ao centro da bacia, e que usa o Rio Paraná como descarga (Viana, 2003).

Desta forma, para cada uma das diferentes zonas que compõem o aquífero, deve-se ter medidas protetoras e de controle diferenciadas em relação à exploração

desse recurso, bem como das atividades econômicas desenvolvidas em cada uma destas áreas.

3.6. Caracterização das Geotecnologias (Sistemas de Informação Geográfica), Geoestatística (Análise espacial) e Cartografia da informação hidrogeológica

3.6.1. Sistemas de Informação Geográfica (SIG)

Dangermond (1992) conceitua esses sistemas como um conjunto de *hardware*, *software* e dados geográficos projetados eficientemente para adquirir, armazenar, atualizar, manipular, analisar e visualizar todas as formas de informações geograficamente referenciadas.

O SIG faz parte de um grupo maior de tecnologias chamado de geoprocessamento. Para Burrough e McDonnell (1998), o SIG é mais que um simples automatizador de tarefas existentes, ele propicia ambos, um arquivo de dados espaciais na forma original e uma ferramenta para a exploração de interações entre processos e modelos em fenômenos espaciais e temporais.

De acordo com Doyle e Gray (1995), o aspecto mais importante no estabelecimento de um SIG, bastante funcional e acessível, é a organização do banco de dados. O estágio de montagem do mesmo requer sérias considerações a respeito dos objetivos a serem alcançados.

O SIG utilizado no presente estudo 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) com 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 sua funcionalidade em ambientes que variem desde microcomputadores a estações de trabalho de alto desempenho.

Um SIG pode ser utilizado em estudos relativos ao meio ambiente e recursos naturais, na pesquisa da 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 (Richards, 1986). 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, implementação e uso do sistema sejam pessoas adequadamente capacitadas e com visão do contexto global.

3.6.2. Geoestatística (Análise Espacial de Dados)

Atualmente, a geoestatística é um nome associado a um conjunto de técnicas utilizadas para analisar e inferir valores de uma variável distribuída no espaço ou tempo (Câmara *et al.*, 2000). A geoestatística é, pois, uma das ferramentas da análise espacial de dados. Na realidade, as propriedades naturais de uma determinada superfície são espacialmente contínuas. As amostras pontuais formam um subconjunto limitado em relação à quantidade de posições e valores possíveis dentro de uma área de interesse. Sendo assim, para se obter valores em posições não amostradas utilizam-se algoritmos inferenciais que se baseiam no conjunto amostral disponível.

Os SIGs atuais incorporam vários algoritmos de inferência para espacializar propriedades segundo uma estrutura de grade regularmente distribuída no espaço. Entretanto, raramente essa espacialização é acompanhada de informações sobre a qualidade dos dados gerados e estas são importantes para apoiar decisões baseadas nos mesmos (Felgueiras *et al.*, 1999).

Para Silva (2003), produzir superfícies contínuas a partir de dados pontuais, determinados tratamentos matemáticos são necessários para a exportação de suas características não espaciais, além de suas áreas de abrangência. Para implementar tais procedimentos, é importante selecionar métodos adequados de interpolação. A escolha de um determinado método de interpolação é uma decorrência da disposição geográfica dos pontos e da utilização de critérios estatísticos. Entre os

principais métodos de interpolação têm-se conforme demonstra o Quadro 4, inverso do quadrado da distância, *krigagem*, curvatura mínima, métodos multiquadráticos e triangulação de *Delaunay*.

MÉTODOS DE INTERPOLAÇÃO	DESCRIÇÃO
Inverso do quadrado da distância	Quando a influência de um determinado dado pontual, em relação a outro, diminui com a distância.
<i>Krigagem</i>	Estima o valor de uma posição pontual conhecida, baseando-se nos dados pontuais vizinhos disponíveis.
Curvatura mínima	Este processo gera uma superfície cuja curvatura é o mais suave possível, nem sempre seus dados são tomados como verdadeira grandeza.
Métodos Multiquadráticos	Produzem superfícies bastante suavizadas. São interpoladores exatos.
Triangulação de <i>Delaunay</i>	É um método muito eficiente e exato para expressar superfícies com relevos acentuados, baseia-se em um algoritmo que cria triângulos ligando pontos.

Quadro 4 - Principais métodos de interpolação e sua descrição
Fonte: Silva (2003).

As implicações na escolha de método de interpolação mais conveniente têm repercussões significativas quando os dados são exportados para um ambiente de SIG, pois eles serão cruzados com inúmeros outros, a partir de regras apropriadas, e a posição geográfica das áreas é fator decisivo. Percebe-se que cada método de interpolação define limiar específico. Isto têm reflexos importantes nos dados espaciais, pois essas diferenças interferem significativamente no posicionamento geográfico dos intervalos que estão sendo considerados (Berry, 1997). Dentre os métodos citados, nesta pesquisa utilizou-se da *Krigagem*, assim, a seguir apresentam-se mais detalhes a respeito deste método.

As técnicas de geoestatísticas de inferência, conhecidas por *krigagem*, consideram os atributos ambientais como variáveis aleatórias, o que possibilita a modelagem das incertezas associadas às inferências. Essas técnicas têm sido utilizadas, com frequência, para espacialização de atributos ambientais amostrados pontualmente (Oliver, 1990 *apud* CAMARGO, 1997).

A *krigagem* para Deutsch (1998) é um estimador de média ponderada local que utiliza o critério de minimização da variância de estimação para definir os pesos associados a cada amostra considerada. Além disso, esse critério permite a criação

de um mapa de incertezas de estimação associado ao mapa de atributos espacializados. Estas são as principais vantagens do interpolador de *krigagem* em relação a outros interpoladores de média ponderada, cujos ponderadores são, em geral, definidos por paradigmas subjetivos.

Para Camargo *et al.* (2004) a *krigagem* compreende um conjunto de técnicas de estimação e predição de superfícies baseada na modelagem da estrutura de correlação espacial. A hipótese implícita no procedimento geoestatístico é que o processo estudado é estacionário. O que diferencia a *krigagem* dos outros métodos de interpolação é a estimação de uma matriz de covariância espacial que determina os pesos atribuídos às diferentes amostras, o tratamento da redundância dos dados, a vizinhança a ser considerada no procedimento inferencial e o erro associado ao valor estimado. Além disso, a *krigagem* também fornece estimadores com propriedades de não tendenciosidade e eficiência.

A *krigagem* é um método geoestatístico que tem provado ser usual e popular em muitos campos de atividades. Este método produz recursos visuais de mapas com informações espaçadas irregularmente. A *krigagem* busca expressar tendências sugeridas em seus dados, tais como, por exemplo, pontos elevados podem ser conectados ao longo de uma crista ou de um pico, de preferência a um tipo de contornos isolados como na *mosca* de um alvo. A *krigagem* é um método de malhas muito flexível. Pode-se aceitar que o padrão da *krigagem* pode ser um ajuste para um arranjo de dados, especificando-se um modelo de variograma.

Para esta pesquisa utilizou-se do método geoestatístico *krigagem*, para a espacialização de informações, com o programa *Surfer 8*. Neste programa (*Golden software*, 2002) a *krigagem* é definida como um interpolador exato ou suavizador, dependendo do uso específico dos parâmetros. Ele incorpora a anisotropia e as tendências básicas de um modo eficiente e natural.

Segundo Zingano (2004), o *Surfer* é um *software* de interpolação para gerar curvas de isovalores e superfícies, baseados em um *grid*. O *grid* é formado por uma malha regular de valores que são gerados pela interpolação dos dados amostrados em campo. Esses dados, geralmente, estão espaçados irregularmente. O *Surfer* atribui a extensão [GRID] para o arquivo "*grid*". O *Surfer* possui vários métodos de interpolação que devem ser selecionados conforme o tipo de dado que está sendo interpolado e que represente melhor a realidade do local. A seguir estão os métodos de interpolação que o *Surfer* oferece: Inverso de distância; *Krigagem*; Curvatura

mínima; Ponto mais próximo; Regressão polinomial; Função *radial basis*; Método de *Shepard*; Triangulação com interpolação linear.

A interpolação por *krigagem* utilizada no *Surfer* é a *krigagem* ordinária pontual. Antes de aplicar a interpolação por *krigagem*, o usuário deve realizar um estudo de continuidade espacial sobre os dados. Esse estudo é imprescindível para correta utilização do método, por ser à base da geoestatística e o diferencial sobre os outros métodos de interpolação. Nesta pesquisa adotou-se como interpolador a *krigagem* pelo fato desta representar melhor a variabilidade dos dados espacializados, anisotropia, variações em diferentes direções.

Contudo, atualmente tem-se observado uma ampla utilização de técnicas de geoestatísticas em várias pesquisas, através de programas computacionais, com o intuito de obter melhores resultados em análises espaciais de fenômenos, principalmente relacionados ao meio ambiente.

3.6.3. Cartografia da informação hidrogeológica

Desde o surgimento da humanidade, a busca pelos recursos hídricos tem sido uma constante. A localização e a sedentarização de atividades antrópicas estão historicamente atreladas à disponibilidade dos recursos hídricos. O valor monetário atribuído a este recurso é diretamente proporcional à escassez com que ele se apresenta em cada local. A busca pela redução de custos tem estimulado a sociedade a melhor gerenciar a disponibilidade e uso dos recursos hídricos no tempo e no espaço.

Desse modo, para que se consiga uma gestão eficiente dos recursos hídricos, que proporcione uma oferta em termos de demanda, custo e qualidade adequada à sociedade, diversas técnicas e ferramentas têm sido utilizadas e desenvolvidas. O mapeamento e localização das águas subterrâneas, com destaque para a identificação em meio cartográfico da quantidade e qualidade da água, dos locais de vulnerabilidade da interação recurso hídrico e atividade antrópica, são ações fundamentais na gerência eficiente dos recursos hídricos subterrâneos.

A integração do desenvolvimento tecnológico da informática e do monitoramento remoto à cartografia convencional gerou o aparecimento das técnicas de geoprocessamento, que constituem um conjunto de ferramentas especialmente adequadas à finalidade de gestão de recursos naturais.

A importância da utilização de SIG para o processamento de dados de hidrogeologia se fundamenta em alguns aspectos, tais como para o armazenamento de grandes quantidades de dados e na geração de informações, estas obtidas pela utilização de técnicas cartográficas de representação espacial (mapas ou cartogramas) fundamentais para análises. Sem os SIG seria impossível processar tamanha quantidade de informações e muito menos difundi-la em nível mundial. Todavia, atualmente os SIG estão se tornando populares e acessíveis devido a seu baixo custo, pois existe uma variedade de programas computacionais livres e disponíveis a todos os interessados.

O mapeamento por temas de hidrogeologia, em geral, aprofunda cada vez mais a necessidade das ferramentas de geoprocessamento na tomada de decisão. O acesso da informação em qualidade, quantidade com rapidez e facilidade de compreensão são requisitos obrigatórios nos sistemas de gerenciamento. A integração da infinidade de bases cartográficas digitais é fundamental para se reduzir o tempo e o custo de estruturação da informação hidrogeológicas em SIG confiáveis e de fácil acesso.

Prevêem-se impactos positivos na adoção das técnicas de geoprocessamento, pois a geração de bancos de dados codificados espacialmente possibilita ajustes e sobreposições simultâneas de grande número de informações, obtendo-se novos mapas com rapidez e precisão. Os resultados obtidos nestes estudos podem servir de base para a orientação de uso mais racional das áreas de recarga e de maior vulnerabilidade de aquífero ou para outras situações.

Com o advento dos computadores pessoais e a popularização dos modelos numéricos de simulação nas águas subterrâneas, criou-se a errônea impressão de que os métodos de cartografia de vulnerabilidade seriam abandonados (Hirata, 2001). A realidade, entretanto, tem mostrado que a complexidade geológica e a falta de dados confiáveis para uma simulação matemática têm restringido o seu uso, sobretudo em programas de proteção dos recursos hídricos subterrâneos. Com isso, nos últimos anos, tem-se observado um novo impulso no desenvolvimento e na aplicação de técnicas de vulnerabilidade de aquíferos à poluição.

Existem várias técnicas para a cartografia de vulnerabilidade, muitas das quais baseadas em diferentes critérios e até diferentes enfoques do que se entende como vulnerabilidade. Desta forma, Hirata (2001) ressalta a necessidade de uma ampla revisão sobre o tema, incluindo:

- a) Desenvolver e melhorar o conceito de vulnerabilidade de aquíferos permitindo que seja melhor aceito pela comunidade usuária e de geocientíficos;
- b) Estabelecer critérios básicos e consistentes para o mapeamento de vulnerabilidade de aquíferos.
- c) Testar a validade de métodos de vulnerabilidade baseada em estudos de monitoramento cuidadoso da qualidade das águas subterrâneas, sobretudo quando associados a modelos numéricos de transporte de fluxo e massa na zona não saturada;
- d) Desenvolver métodos de vulnerabilidade em aquíferos complexos, como em aquíferos cristalinos, cársticos e vulcânicos recentes;
- e) Adaptar métodos que permitam uma melhor caracterização de aquíferos multicamadas, especialmente onde a porção superficial já está contaminada e se explore níveis mais profundos.

As técnicas digitais têm revolucionado a cartografia e isso tem permitindo (Vrba & Zaporozec, 1994):

- a) melhorar os métodos de vulnerabilidade, reduzindo o tempo de elaboração de mapas;
- b) normatizar os métodos para se obter atributos básicos;
- c) melhorar a qualidade e precisão na definição das classes de vulnerabilidade, baseada no conhecimento do fluxo e transporte de contaminantes;
- d) incrementar a produção em larga escala de mapas de vulnerabilidade;
- e) atualizar rapidamente os mapas existentes com dados novos, permitindo integrá-los a rotinas de planejamento local e regional.

O mapa é a melhor maneira de representar a vulnerabilidade de aquíferos e, quando elaborado especificamente para cada diferente classe de contaminante, estes podem ser integrados por meio de sistema de informação geográfica (SIG) e compilados em atlas da vulnerabilidade de aquíferos.

4. METODOLOGIA

4.1. Procedimentos Metodológicos

Para desenvolvimento desta pesquisa considerou-se como referencial teórico metodológico o Modelo DRASTIC, que consiste na avaliação da vulnerabilidade natural do meio aquífero em relação ao risco de contaminação das águas subterrâneas frente a um contaminante. É importante ressaltar que esta metodologia pode ser adaptada ao local de estudo, ou seja, sofrer modificações em função das características intrínsecas ao local. Os procedimentos metodológicos adotados para o desenvolvimento desta pesquisa encontram-se sintetizados no fluxograma da Figura 3 e descritos de forma mais detalhada a seguir:

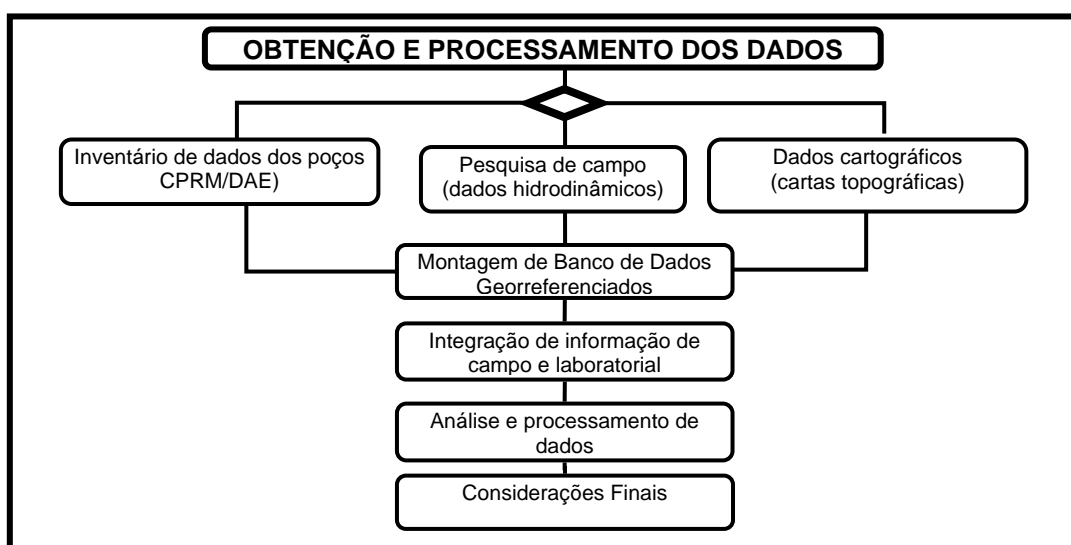


Figura 3 - Fluxograma das etapas de desenvolvimento da pesquisa.

Observando-se a Figura 3, pode-se constatar as distintas etapas pelo qual passou esta pesquisa, para tanto, a primeira etapa constituiu-se de um inventário de todos os dados e de informações existentes a respeito dos poços da área, bem como da seleção de materiais cartográficos e geológico.

Os dados obtidos de inventários são oriundos de empresas como a CPRM (Companhia de Pesquisa e Recursos Minerais) diretamente do *site* eletrônico *Internet* pelo cadastro de usuários de poços subterrâneos SIAGAS (Sistema de Informações de Águas Subterrâneas), DAE (Departamento de Águas e Esgotos de Santana do Livramento), do Projeto hidrogeológico da Fronteira Sudoeste do Rio Grande do Sul por Presotto *et al.* (1973), complementados por dados de pesquisa de campo.

Na segunda etapa realizou-se a montagem dos bancos de dados referentes aos dados cadastrais dos poços e dos dados temáticos (mapas). Os dados oriundos dos poços para o cadastro foram organizados e tabulados com o programa computacional *Microsoft Excel*. Esses dados foram tratados com aplicativo computacional *Surfer 8* e aplicado o modelo geoestatístico *Krigagem*, em forma de cartogramas, que posteriormente foram utilizados para integração das informações espacializadas no sistema *Spring*.

Os dados cartográficos para a elaboração dos mapas temáticos foram executados no programa computacional *Spring* (Sistema de Processamento de Informações Georreferenciadas) na versão 4.2, com o qual fez-se a digitalização dos planos de informação para elaboração dos mapas temáticos.

Para a terceira etapa, realizou-se a integração dos planos de informação, ou seja, a etapa de processamento e sobreposição das informações para a elaboração de mapas, os quais são informações importantes para a avaliação da vulnerabilidade natural da área e referente ao risco de contaminação dos recursos hídricos subterrâneos.

A quarta etapa consiste na integração das informações armazenadas nos banco de dados obtidas em pesquisa de campo e em laboratório, ou seja, etapa de análise de resultados e discussões destas informações. Para a edição final dos resultados como produtos cartográficos utilizou-se programas computacionais que fazem parte do *Spring* (*Scarta e Iplot*) e do *CoreIDRAW 12*, e a redação da pesquisa realizou-se no *Microsoft Word*.

A última etapa da pesquisa contém as considerações finais, ou seja, consiste na etapa reflexão crítica dos resultados obtidos e sua importância científica para este tema abordado. Para a compreensão da metodologia desta pesquisa, a seguir apresentam-se os procedimentos técnicos adotados para a obtenção e tratamento dos dados na geração das informações.

4.2. Procedimentos Técnicos

Para subsidiar esta pesquisa tecnicamente foi necessário utilizar várias ferramentas cartográficas e computacionais para obter as informações. Desta forma, a seguir apresentam-se os procedimentos técnicos utilizados em cada etapa da execução desta pesquisa e seus respectivos materiais.

4.2.1. Cadastro dos poços

Para realizar o cadastramento dos poços e obter as informações dos mesmos, utilizou-se das informações disponibilizadas na página eletrônica <http://www.cprm.gov.br/bases/siagas>; cadastro de usuários de poços subterrâneos SIAGAS (Sistema de Informações de Águas Subterrâneas), DAE (Departamento de Águas e Esgotos de Santana do Livramento, RS), do Projeto hidrogeológico da Fronteira Sudoeste do Rio Grande do Sul por Presotto *et al.* (1973) e também dados oriundos de pesquisa de campo.

Desse modo, elaborou-se um novo banco de dados, disposto no Anexo 01, com o uso do programa *Excel* 2000, constando as seguintes informações: número do poço, código do poço original, local e município, situação do poço, diâmetro do poço, proprietário, latitude e longitude (no Sistema de Coordenadas Geográficas e Sistema Universal Transversa de Mercator-UTM), altitude do local, profundidade, uso, abaixamento, nível estático, nível dinâmico, vazão, tipo de poço (T= tubular, E= escavado, N= nascente), ano de construção, empresa construtora, formação geológica, litologia e tipo de aquífero, superfície potenciométrica. As coordenadas dos poços foram obtidas com GPS *GARMIN* 12 XLX, utilizando-se as coordenadas planas do sistema de projeção Universal Transversa de Mercator (UTM), com opção do Datum SAD 69, acrescidas as constantes 10,000Km e 500Km respectivamente com Meridiano Central 57° W de Greenwich.

4.2.2. Delimitação da área de estudo

Para delimitar a área de estudo elaborou-se o mapa base, utilizando cartas topográficas da DSG (Diretoria do Serviço Geográfico do Exército), folhas SH.21-Z-A-VI-4-SE (MI-2991/4), SH.21-Z-A-VI-4-ME (MI-2991/4), ambas na escala 1:25000 de Santana do Livramento e a SH.21-Z-A-VI-4-ME (MI-2991/4), na escala 1:50,000 de Palomas. Como critério para delimitar a área considerou-se o divisor d'água das microbacias que abrangem a cidade de Santana do Livramento (RS) e áreas adjacentes, também considerou-se a distribuição espacial dos poços na área urbana e entornos, dos quais, de alguma forma influem no abastecimento da cidade ou que podem representar um meio para a propagação de contaminantes até o aquífero.

Assim, para obter o mapa base, as cartas topográficas foram transferidas do modo analógico para digital *raster* via *scanner*. Em meio digital fez-se o mosaico das cartas topográficas com o programa Computacional *Adobe Photoshop*. No programa computacional *Impima* do SIG *Spring* fez-se a mudança do arquivo TIFF para GRIB e no Programa Computacional *Spring* 4.2, realizou-se o registro (georreferenciamento) da imagem para posteriormente fazer a digitalização, via tela do computador, dos seguintes planos de informação: limite da área, estradas, rede de drenagem e vias urbanas. A edição final do mapa foi realizada por meio do aplicativo computacional *Scarta* na versão 4.2 desenvolvido pelo Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE) e *Corel DRAW*.

4.2.3. Mapa da Distribuição Espacial dos Poços

Para elaborar o mapa da distribuição espacial dos poços, utilizou-se do mapa base, executado no programa computacional *Spring* 4.2, e sobre ele inseriram-se os poços obedecendo as suas coordenadas UTM, ou seja, editaram-se os poços sobre a área de estudo, considerando sua localização espacial. Desta forma, pôde-se visualizar e relacionar a outros parâmetros desta pesquisa.

A edição final do mapa da distribuição espacial dos poços foi realizada no aplicativo *Scarta* 4.2 e *Corel Draw* 12 permitindo a interação do usuário.

4.2.4. Mapa da variação da profundidade dos poços

O mapa da variação da profundidade foi gerado utilizando-se as informações provenientes do cadastramento dos poços. As informações foram espacializadas com o programa *Surfer 8*, com o interpolador *krigagem*, em forma de cartogramas, da seguinte forma:

- utiliza-se da planilha (arquivo txf) gerada com as coordenadas UTM dos poços e os valores das profundidades dos mesmos;
- abre um novo “plot”, ir ao menu *Grid* escolher a opção *Data*, selecionar o arquivo (.dat) com os dados, indicar o método de interpolação e aplicar “ok”. Assim, o programa automaticamente muda o arquivo dat para um arquivo com extensão .grid.
- no menu *Map* escolhe-se a opção *Contour*, selecionar o arquivo (.grid) gerado, escolher o intervalo de classes proposto, cores, legenda e aplicar “ok” automaticamente o programa cria um plano contendo as isolinhas de profundidade dos poços.

O cartograma gerado, com a variação da profundidade dos poços, foi exportado e no programa *Corel Draw* realizou-se a sobreposição com o mapa base, executado no *Spring*.

4.2.5. Mapa da variação da vazão dos poços

Para elaborar o mapa da variação da vazão dos poços procedeu-se da mesma forma que para o mapa da variação da profundidade, porém neste simularam-se as vazões dos poços, após foi exportado para o programa *Corel Draw* onde realizou-se a sobreposição com o mapa base executado no *Spring*.

4.2.6. Mapa da superfície potenciométrica dos poços

A superfície potenciométrica de acordo com Heath (1983) é o lugar geométrico dos pontos que registram a altura dos níveis estáticos das águas de um determinado aquífero. O conhecimento da superfície potenciométrica é elemento indispensável em qualquer estudo de movimentos de águas subterrâneas. Para os aquíferos livres, a superfície potenciométrica corresponde à superfície freática. A superfície potenciométrica dos poços foi obtida pela relação entre a altitude da “boca do poço”

até o nível estático. Indica o peso da coluna da água sobre o datum. Através desta pode-se verificar e indicar a direção do fluxo subterrâneo.

Para elaborar o mapa da superfície potenciométrica dos poços procedeu-se da mesma forma que para o mapa da variação da profundidade, porém neste simulou-se a superfície potenciométrica dos poços; após, foi exportado para o programa *Corel Draw*, onde realizou-se a sobreposição com o mapa base executado no *Spring*.

4.2.7. Mapa da variação do nível estático dos poços

Para gerar o mapa da variação do nível estático dos poços procedeu-se da mesma forma que para o mapa da variação da profundidade, porém neste espacializou-se o nível estático dos poços; após, foi exportado para o programa *Corel Draw*, onde realizou-se a sobreposição com o mapa base executado no *Spring*.

4.2.8. Mapa geológico

O mapa geológico foi elaborado com base na geologia da área, averiguada em pesquisa de campo e apoiado nas considerações de Eckert e Caye (1995) mapa geológico na escala 1:25.000. Através de observações no local de estudo pode-se identificar cada unidade geológica. Assim, demarcou-se a extensão das distintas unidades geológicas sobre as cartas topográficas, observando as coordenadas geográficas de cada área de ocorrência, as cotas altimétricas do terreno e também as características verificadas em vários pontos percorridos na área de estudo.

Posteriormente, em laboratório, transferiram-se as cartas topográficas analógicas para digital, juntando esta informação ao banco de dados já criado no programa *Spring 4.2*, e iniciou-se o processo de digitalização dos distintos planos de informação e pode-se comparar com os resultados obtidos da imagem de satélite, até obter o mapa geológico da área. Para comprovar a veracidade fizeram-se coletas de amostras em diferentes litologias e, no Laboratório de Sedimentologia do Departamento de Geociências da UFSM, realizou-se as análises granulométricas.

Para a área de estudo identificaram-se 3 classes litológicas, as quais estão apresentadas no Quadro 5 com suas respectivas características:

Formação	Litologia
Formação Serra Geral	Riolitos e riolacitos com disjunção tabular. Basaltos e andesitos toleíticos. Intertraps de arenitos. Lavas basálticas, diques e siltes de diabásio associados.
Formação Arenito Botucatu	Arenitos médios a finos, com estratificação cruzada e de grande porte
Formação Rosário do Sul	Arenitos médios a finos, com estratificação cruzada acanalada e planar, intercaladas com siltes argilosos maciços, lamitos, estrutura tabular.

Quadro 5 - Formações litológicas e suas respectivas características

Fonte: Pesquisa de campo e Lab. Hidrogeologia – Departamento de Geociências/UFSM (2005)

Organização: Camponogara, I & Silvério da Silva, J. L.

4.2.9. Mapa clinográfico

Para elaborar o mapa clinográfico foram consideradas as classes de declividade sugeridas por Aller *et al.* (1987) no método DRASTIC e já consagradas universalmente, sendo que a espacialização das mesmas foi realizada com o aplicativo computacional *Spring 4.2*. A declividade pode ser caracterizada como a inclinação da superfície do terreno em relação ao plano horizontal. Considerando um modelo numérico de terreno (MNT) de dados altimétricos extraídos da carta topográfica e traçando um plano tangente a esta superfície num determinado ponto (P), a declividade em P corresponderá à inclinação deste plano em relação ao plano horizontal.

Para a geração do mapa clinográfico, inicialmente faz-se a digitalização das curvas de nível em MNT (Modelo Numérico de Terreno), a partir das quais cria-se a grade triangular (TIN), com base na triangulação *Delaunay*. Esta serve de base para a geração do mapa clinográfico. Após, faz-se o fatiamento das classes de declividade. Esta é gerada usando-se a média ponderada por cota e por quadrante como critério de interpolação. O fatiamento consiste em gerar uma imagem temática a partir de uma grade retangular. Esta, por sua vez, trata-se de um modelo numérico que representa mais fielmente possível o relevo. Os temas da imagem temática resultante correspondem a intervalos de valores de cotas, denominados no *Spring* de fatias.

Desta forma, um plano de informação da categoria numérica originará um plano de informação de categoria temática representando um aspecto particular do modelo numérico de terreno. Conseqüentemente, a cada fatia deve-se associar uma

classe temática previamente definida no esquema conceitual do Banco de Dados ativo, estabelecendo-se assim as diferentes classes de declividade para a área de estudo. Por fim, para a edição do mapa final utilizaram-se o aplicativo Scarta e programa *Corel Draw 12*.

4.2.10. Mapa das unidades texturais de solos

Para a identificação das unidades texturais de solos foram realizadas coletas de amostras de solo em diferentes locais na área de estudo, ou seja, foi analisada uma amostra para cada uma das 3 unidades geológicas. Estas amostras foram analisadas no Laboratório de Sedimentologia do Departamento de Geociências da UFSM. As unidades texturais de solos foram identificados por meio da avaliação e caracterização, em laboratório, da granulometria das rochas sedimentares e/ou rochas e produtos de alteração, frações de areia, silte e argila, segundo triângulo textural (Vieira, 1975 p. 263). No Quadro 6, apresentam-se as classes das unidades texturais de solos obtidas a partir da análise granulométrica, sendo constatadas 3 classes:

Unidades texturais de solo	Características Granulométricas
Franco arenoso	30% de areia muito grossa, grossa e média, porém menos de 25% de areia muito grossa e menos de 30% de areia muito fina e fina.
Franca	Material do solo que contém de 7 a 27% de argila, de 28 a 50% de silte e menos de 52% de areia.
Franco siltoso	Material do solo que contém de 50% ou mais de silte e de 12% a 27% de argila (ou) 50 ou 80% de limo e menos de 12% de argila.

Quadro 6 - Tipos de solos e suas características

Fonte: Pesquisa de campo e Lab. Sedimentologia – Departamento de Geociências/UFSM (2005)
Organização: Camponogara, I & Silvério da Silva, J. L. (2005)

Para a espacialização cartográfica das unidades texturais de solos utilizou-se do programa *Spring*. Desse modo, inicialmente utilizou-se da base geológica da área; posteriormente, com base nas análises granulométricas realizadas em laboratório, associou-se para cada unidade geológica as respectivas unidades texturais de solo.

4.2.11. Mapa de vulnerabilidade natural

Para se obter o mapa de vulnerabilidade natural utilizou-se das informações provenientes do cadastro dos poços da área estudo, bem como dos mapeamentos descritos anteriormente. Assim, a metodologia utilizada para obter o mapeamento da vulnerabilidade natural baseia-se no modelo DRASTIC, que de acordo com Leite e Möbus (1998) trata-se de um sistema padronizado de avaliar a vulnerabilidade natural dos aquíferos a partir dos dados decodificados em planos de informações (PI's). Na Figura 4 pode-se observar o esquema conceitual do Modelo DRASTIC. Este modelo foi desenvolvido para avaliar áreas maiores de 0,4 km².

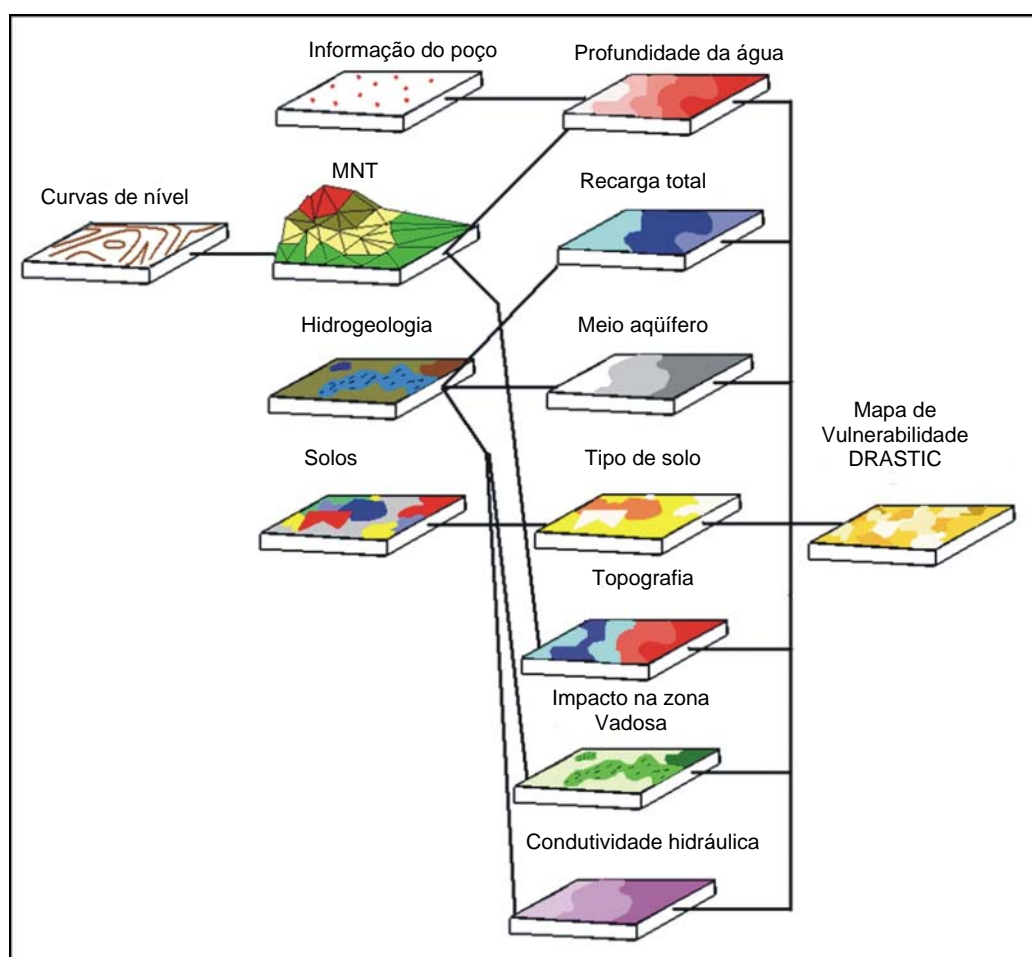


Figura 4 – Esquema de avaliação da vulnerabilidade natural de aquíferos (Modelo DRASTIC).
Fonte: Adaptado de Aller *et. al.* (1987) por Camponogara, I.

O cenário hidrogeológico inclui os principais fatores geológicos e do meio aquífero que conferem o nome à metodologia, sendo que para cada um dos fatores confere-se um peso, o qual está relacionado à maior ou à menor importância que se

atribui ao fator na avaliação da vulnerabilidade do aquífero. O Quadro 7 ilustra os fatores DRASTIC, bem como seus respectivos pesos:

Fatores DRASTIC	Pesos (p)
D – Profundidade das águas subterrâneas (<i>Depth to water</i>);	5
R – Recarga total (<i>Recharge</i>);	4
A – Meio aquífero (<i>Aquifer media</i>);	3
S – Solos (<i>Soil media</i>);	2
T – Topografia (<i>Topography</i>);	1
I – Impacto na zona vadosa (<i>Impact of the vadose zone</i>);	5
C – Condutividade hidráulica (<i>Hydraulic conductivity</i>).	3

Quadro 7 - Fatores DRASTIC e seus respectivos pesos (Peso= p)

Fonte: abe.www.ecn.purdue.edu (2002)

Organização: Camponogara, I.

De acordo com o modelo, os fatores DRASTIC são divididos em faixas ou tipos de meios, cada um dos quais é estimado para uma variação entre 1 e 10, com base na significância do potencial de contaminação da água subterrânea ou do tipo de meio. A partir das faixas se estabelece a carga para cada situação. Quanto maior a carga, maior sua vulnerabilidade, ou seja, pior a condição no que se refere à susceptibilidade a contaminação. Ao conjunto dos sete fatores (DRASTIC) são atribuídos pesos de acordo com a provável contribuição de cada um. Isso é feito com o intuito de se obter e quantificar o chamado índice potencial de poluição. Quanto mais elevado o índice, maior a vulnerabilidade do aquífero. Os fatores DRASTIC estão abaixo descritos:

- Profundidade do lençol freático (**D**): pode ser obtido em campo com medidor jaciri (freatímetro) ou de dados pré-existentes, ou ainda, adquirido no sistema de informações de Águas Subterrâneas do Brasil, na página <http://www.cprm.gov.br>. No Quadro 8 apresentam-se as faixas de profundidade do lençol freático e suas respectivas cargas:

Faixas (m)	Carga (Dc)
0 – 1,5	10
1,5 – 4,6	9
4,6 – 9,1	7
9,1 – 15,2	5
15,2 – 22,9	3
22,9 – 30,5	2
>30,5	1

Quadro 8 - Faixas de profundidade da água subterrânea e respectivas cargas (Dc). (Peso: Dp=5).

Fonte: abe.www.ecn.purdue.edu (2002)

Organização: Camponogara, I.

- Recarga total (R): Segundo Hausman (1995) a infiltração anual para a área estudada varia entre 50 e 100mm/ano, de acordo com a precipitação do local de estudo. Por isso, o intervalo de recarga corresponde ao que varia de 51,85 a 103,7mm/ano e a carga 3. No Quadro 9 ilustra-se esse fator.

Intervalo de recarga em polegadas	Intervalo de recarga em mm/ano	Carga
0 – 2	0 – 51,85	1
2 – 4	51,85 – 103,7	3
4 – 7	103,7 – 181,48	6
7 – 10	181,48 – 259,26	8
>10	>259,26	9

Quadro 9 - Recarga total durante o ano (Peso: Rp= 4).

Fonte: abe.www.ecn.purdue.edu (2002)

Organização: Camponogara, I.

– Meio aquífero (A): Este fator é definido a partir de unidades geológicas e hidrogeológicas, podendo-se associar aos tipos de aquíferos (livres, confinados, semiconfinados, nascentes), disponíveis no *site* do SIAGAS/CPRM. O Quadro 10 ilustra este fator:

Tipo de meio aquífero	Faixa de variação (carga)	Cargas (Ac)
Folhelho maciço (rocha argilosa)	1 – 3	2
Metamórfica/Ígneas (rochas cristalinas)	2 – 5	3
Rochas Metamórficas/ ígneas intemperizadas (saprólitos)	3 – 5	4
Till Glacial (depósitos de degelo glacial)	4 – 6	5
Calcários, arenitos e folhelhos acamadados	5 – 9	6
Arenito maciço	4 – 9	6
Calcário maciço	4 – 9	6
Cascalho com matriz arenosa (conglomerado)	4 – 9	8
Basalto fraturado	2 – 10	9
Calcário cárstico (poroso)	9 – 10	10

Quadro 10 - Tipos de meio aquíferos e suas respectivas cargas (Ac). (Peso: Ap=3).

Fonte: abe.www.ecn.purdue.edu (2002)

Organização: Camponogara, I.

– Solos (**S**): Este fator pode ser obtido a partir de levantamentos pré-existentes, ou da caracterização da granulometria das rochas sedimentares e/ou rochas e produtos de alteração, frações de areia, silte e argila. Também os tipos de solos podem ser identificados e espacializados e separados com o uso de imagens de satélite e/ou fotografias aéreas. O Quadro 11 apresenta alguns dos tipos de solos e suas respectivas cargas.

Granulometria	Carga (Sc)
Cascalho	10
Arenoso	9
Turfa	8
Argila agregada e/ou expansiva	7
Franco arenoso	6
Franco	5
Franco siltoso	4
Franco argiloso	3
Turfa	2
Argiloso não expansivo e não agregado	1

Quadro 11 - Solos e suas respectivas cargas (Sc), (Peso: Sp=2).

Fonte: abe.www.ecn.purdue.edu (2002)

Organização: Camponogara, I.

– Topografia (**T**): O fator Topografia pode ser identificado a partir das classes de declividade, identificadas por meio da elaboração da carta clinográfica da área. Neste caso usam-se as classes sugeridas por Leite & Möbus (1998). No Quadro 12 apresentam-se as diferentes classes de declividade e suas respectivas cargas.

Declividade (Topografia)	Cargas (Tc)
0 - 2%	10
2 - 6%	9
6 - 12%	5
12 - 18%	3
>18%	1

Quadro 12 - Classes de declividade e suas respectivas cargas (Tc). (Peso: Tp=1).

Fonte: abe.www.ecn.purdue.edu (2002)

Organização: Camponogara, I.

– Impacto da zona vadosa (**I**): Este fator corresponde àquela região do terreno não saturada em água, que apresenta poros mais gases ($\text{CO}_2 + \text{O}_2$), podendo sofrer ação dos elementos da biosfera, organismos escavadores, tais como oligoquetas, termitas, raízes, aeração, canalização, etc. É a região que pode sofrer flutuações

sazonais pela flutuação do nível do lençol freático. Este fator pode ser inferido no Quadro 13, bem como suas respectivas cargas.

Tipo de material	Faixa (carga)	Cargas típicas (Ic)
Camada confinante.	1	1
Silte/Argila	2 – 6	3
Folhelho (argilitos laminados)	2 – 6	3
Calcário	2 – 5	3
Arenito	2 – 7	6
Calcário, arenito e folhelho intercamadados	4 – 8	6
Areia e cascalho com significativa matriz síltica ou argilosa	4 – 8	6
Cascalho com pouca areia na matriz	4 – 8	8
Basalto (fraturas, amígdalas, vesículas)	2 – 10	9
Calcário cárstico (rocha porosa)	8 – 10	10

Quadro 13 - Impacto da Zona Vadosa e suas respectivas cargas (Ic). (Peso: Ip=5).

Fonte: abe.www.ecn.purdue.edu (2002)

Organização: Camponogara, I.

– Condutividade hidráulica (**C**): A condutividade hidráulica nas formações superficiais determina a quantidade de percolação no subsolo através do aquífero. A condutividade Hidráulica, também é chamada de coeficiente de permeabilidade (K) é a facilidade com que uma litologia permite a percolação de fluido sob um gradiente potencial. Fisicamente, é a vazão através de uma área unitária em função de um gradiente hidráulico unitário, na unidade de tempo, em meio saturado; depende do meio e do fluido que o percola. Sua unidade no SI é cm/s. (<http://www.abas.org.br>).

Nesta pesquisa foram utilizadas informações de testes de bombeamento para obter a condutividade hidráulica pontual em poços. Desse modo, fez-se o cálculo da transmissividade e permeabilidade pelos métodos de Jacob e Theis, assim obteve-se uma condutividade hidráulica inferior a 4m/d. No Quadro 14 apresenta-se este fator e suas respectivas cargas.

Coeficiente de infiltração m/dia	Cargas (Cc)
0 – 4	1
4 – 12	2
12 – 28	4
28 – 41	6
41 – 82	8
> 82	10

Quadro 14 - Condutividade hidráulica, cargas (Cc). (Peso: Cp=3).

Fonte: abe.www.ecn.purdue.edu (2002),

Organização: Camponogara, I.

Estes fatores, denominados fatores DRASTIC, são avaliados entre si por meio de uma equação, aplicada a cada unidade geográfica de trabalho.

$$\text{Índice DRASTIC} = DpDc + RpRc + ApAc + SpSc + TpTc + IpIc + CpCc \quad (1)$$

Onde: Dp, Rp, Ap, Sp, Tp, Ip e Cp= pesos dos fatores DRASTIC.

Onde: Dc, Rc, Ac, Sc, Tc, Ic e Cc = Fator de carga das variáveis nos seus respectivos intervalos de ocorrência.

Para ressaltar a importância deste modelo, pode-se citar que, a partir da espacialização dos índices de vulnerabilidade obtidos por esta metodologia, pode-se identificar as áreas em condições ideais para locação de poços ou mesmo outras atividades, bem como os locais onde não são indicadas para aqueles fins, sugerindo-se então como áreas de preservação permanente (recarga de aquíferos).

No Quadro 15 apresentam-se os intervalos de vulnerabilidade recomendados pela metodologia DRASTIC. Pode-se observar que estes se estendem de uma susceptibilidade mínima, com índice menor que 35 (bem protegida, pouco vulnerável), até um índice máximo, maior que 120 (área de proteção obrigatória, extremamente vulnerável).

Grau de vulnerabilidade	Intervalos dos índices DRASTIC
Área protegida	<35
Área pouco vulnerável	35 – 65
Área vulnerável	65 – 95
Área muito vulnerável	95 – 120
Área de proteção obrigatória (Extremamente vulnerável)	>120

Quadro 15 - Classes de vulnerabilidade e seus respectivos intervalos, segundo Aller *et al.* (1987)

Fonte: Aller *et al.* (1987), extraído de abe.www.ecn.purdue.edu (2002)

Organização: Camponogara, I.

A partir do mapa de vulnerabilidade natural, ou seja, após a definição das áreas mais vulneráveis, estas são avaliadas em termos de risco de contaminação frente às atividades antrópicas existentes, as quais são classificadas segundo seu potencial de ameaça à qualidade da água subterrânea. A associação da vulnerabilidade natural dos aquíferos e o potencial de ameaça das atividades antrópicas permite a caracterização e a classificação do risco de contaminação dos aquíferos, identificando as áreas mais críticas onde o monitoramento e estudos de maior detalhe devem ser direcionados.

4.2.12. Fontes potenciais de contaminação

As principais fontes potencialmente contaminantes foram cadastradas e analisadas neste trabalho, incluindo-se: área de destinação final de resíduos sólidos domiciliares e de outras origens; posto de serviço com estocagem subterrânea de combustível, área industrial e cemitérios.

Desse modo, em pesquisa de campo, adquiriram-se as coordenadas UTM de cada uma das referidas fontes prováveis de contaminação. Após foram espacializadas com o programa Spring 4.2, obedecendo a sua localização geográfica na área.

Posteriormente, realizou-se a integração das fontes de contaminação com o mapa de vulnerabilidade natural de aquíferos. Assim, foi possível identificar em qual das classes de vulnerabilidade se encontra cada uma das fontes de contaminação e, desta forma, propor alternativas mais sustentáveis para a área em estudo.

5. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Os resultados obtidos do processamento e análise dos dados provindos de diversas fontes e suas avaliações estão apresentados em 4 temas principais, abordados pela presente pesquisa, sendo eles:

5.1) Cadastro dos poços e parâmetros hidrodinâmicos;

5.2) Mapeamento da vulnerabilidade natural de sistemas aquíferos;

5.3). Identificação de fontes potenciais de contaminação;

5.4) Integração de informações: vulnerabilidade natural de aquíferos e fontes potenciais de contaminação.

5.1. Cadastro dos poços e parâmetros hidrodinâmicos

Na área de estudo cadastrou-se um total de 185 poços tubulares e fontes, distribuídos em uma área de aproximadamente 73,69Km². Entre os poços cadastrados, 43 são pertencentes ao DAE (Departamento de Águas e Esgotos) e os demais a proprietários privados. É importante ressaltar que existe um número maior de poços em relação ao que foi cadastrado para a pesquisa, porém, em função das disponibilidades de tempo e financeira, optou-se por apresentar apenas estes, os quais podem ser conferidos no Anexo 1, com suas respectivas informações. Na Figura 5 apresenta-se a espacialização dos poços e de fontes cadastradas.

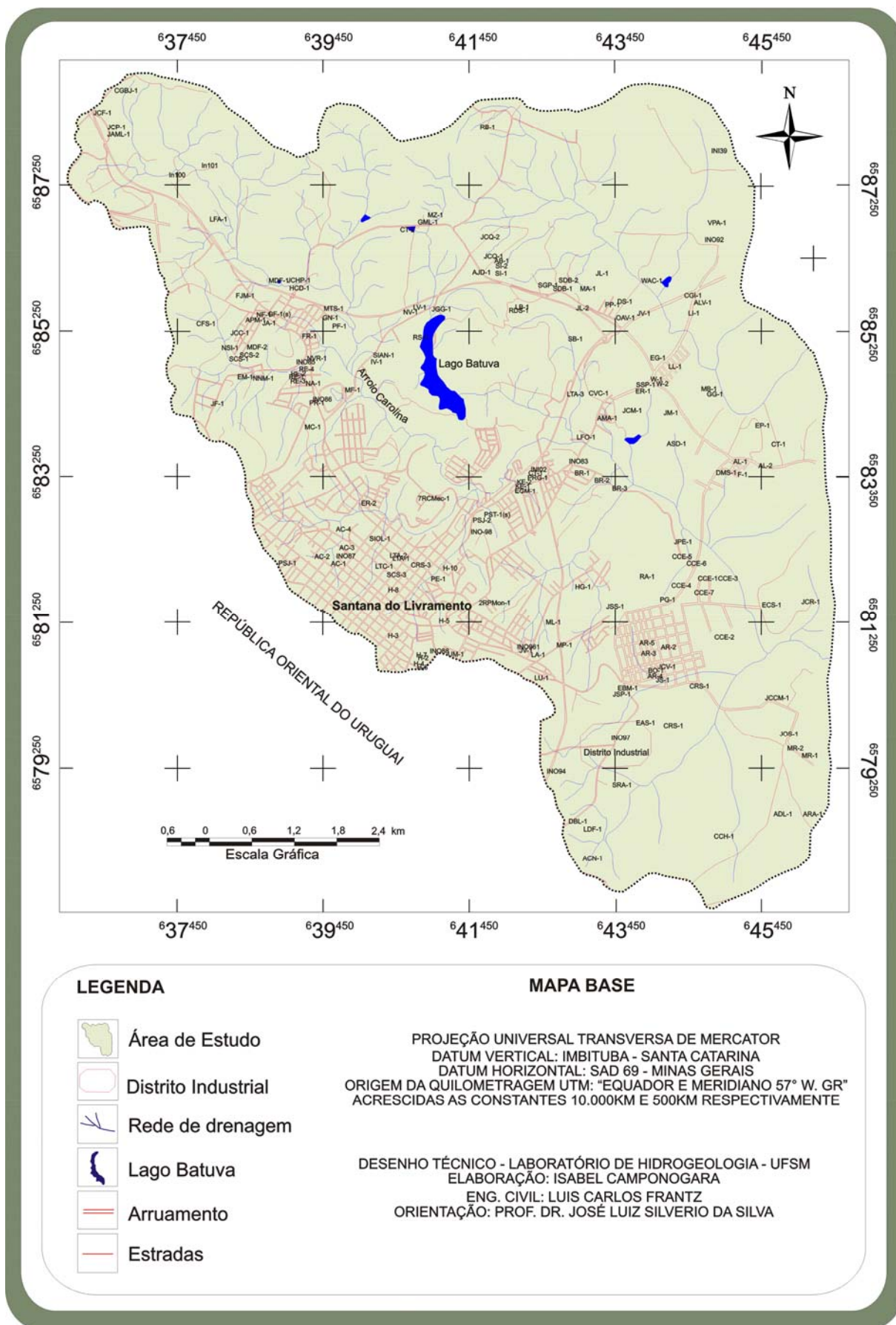


Figura 5 - Especialização dos poços tubulares na área de estudo

Observando-se a distribuição espacial dos poços, pode-se perceber que a maioria localiza-se na área urbana, onde há maior concentração populacional, cerca de 84.455 habitantes. Por outro lado, o grande número de poços se explica em função da cidade utilizar, para abastecimento humano, entre outras atividades, da água subterrânea, uma vez que nesta área não existem rios com grande volume de água que possa ser armazenada em barragem, assim a procura pelas águas subterrâneas se torna uma alternativa viável.

Os principais usos da água são para a dessedentação humana e animal, irrigação de jardins, industrial, recreação. Dos poços cadastrados 23 encontram-se sem uso, um para recreação, um para irrigação de flores, um para usos múltiplos e alguns se encontram desativados. Na Figura 6 apresenta-se o percentual referente aos usos das águas subterrâneas na área de estudo.

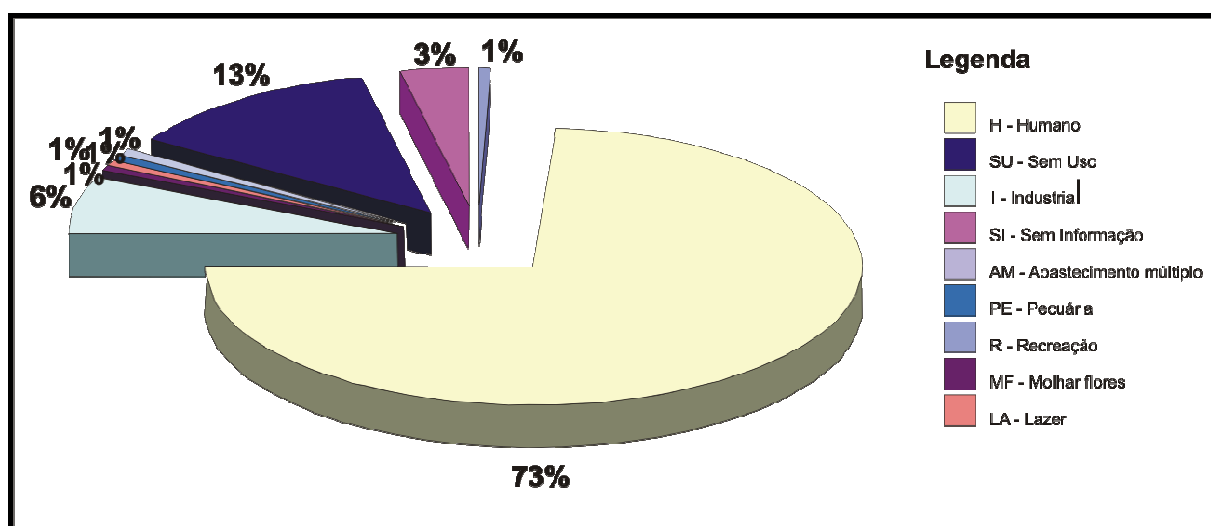


Figura 6 – Usos da água subterrânea da área de estudo

Fonte: Silverio da Silva, *et al.* (2005)

Organização: Camponogara, I.

Em relação à profundidade dos poços, constatou-se que varia de zero (0) a 140m. O valor zero de profundidade é atribuído às nascentes ou fontes que afloram em superfície e as outras profundidades correspondem aos demais poços, tanto aos tubulares como aos escavados. Na Figura 7 pode-se observar a espacialização dos intervalos de profundidades dos poços.

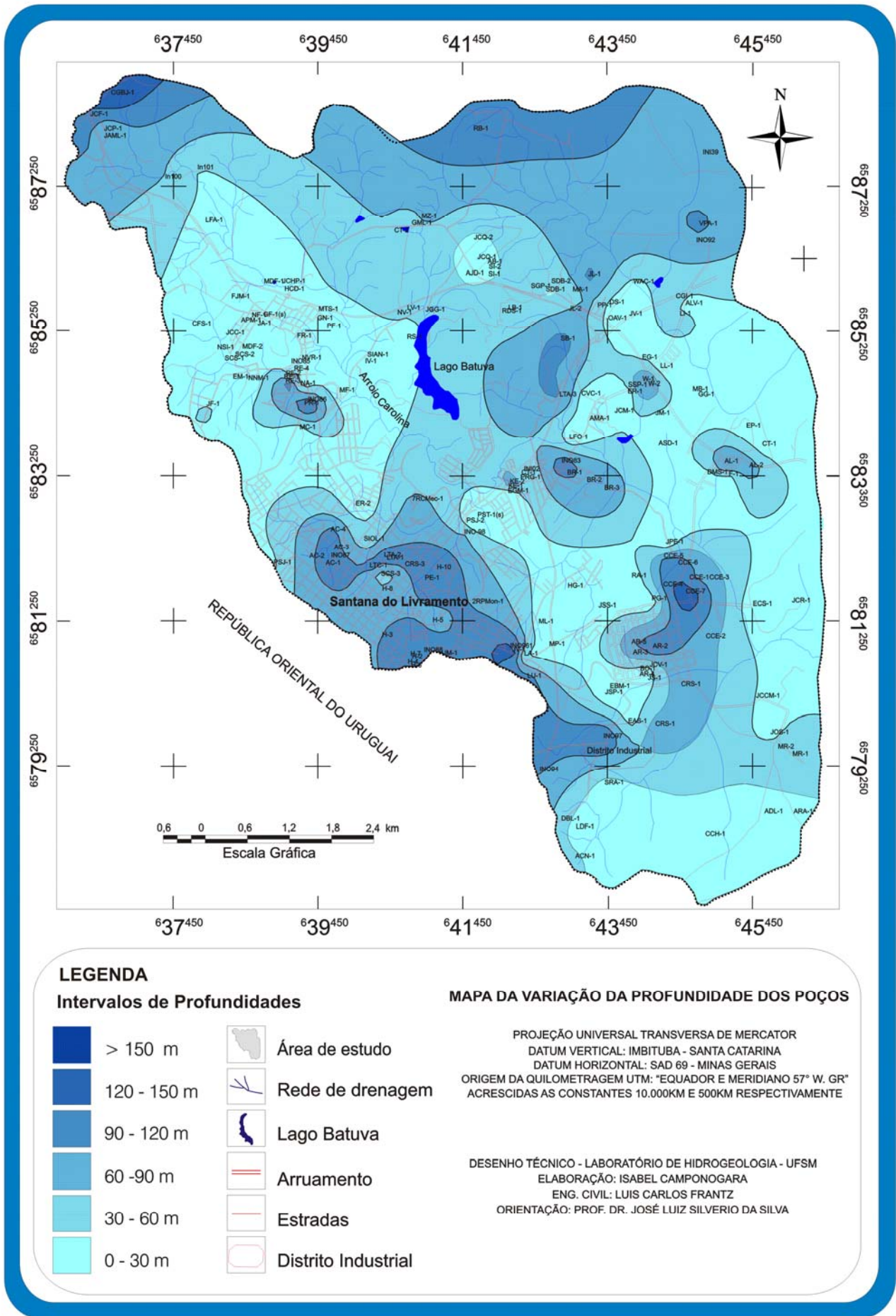
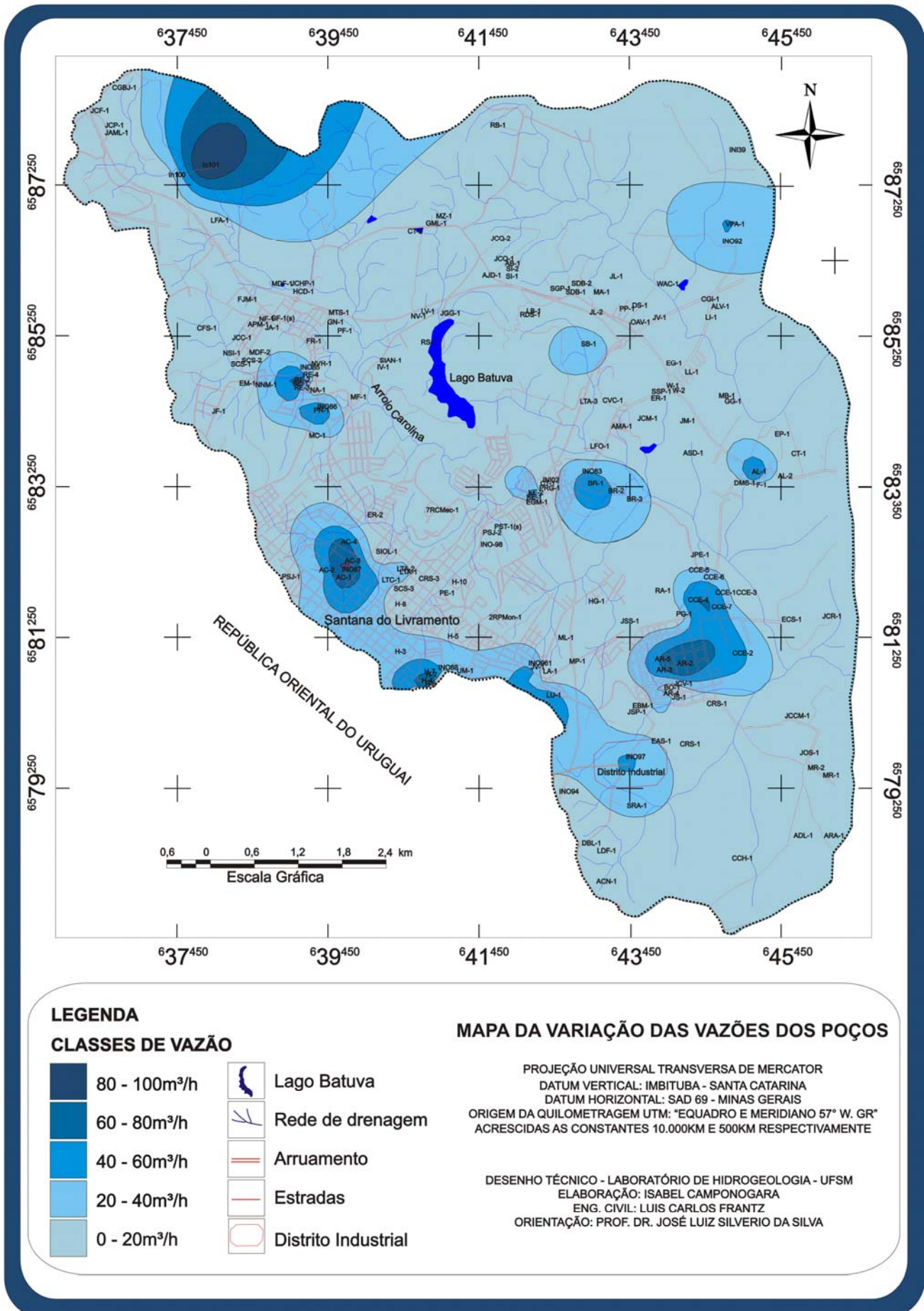


Figura 7 - Mapa da variação das profundidades dos poços da área de estudo

Fazendo-se uma avaliação da Figura 7, que representa a simulação das profundidades dos poços, pode-se observar que os poços com as maiores profundidades localizam-se ao sul e sudoeste, nos basaltos e arenitos no Parque da Hidráulica e também em parte do centro e ao norte. Os poços de menores profundidades encontram-se mais a nordeste da área e também no centro-leste; nestes estão as nascentes cadastradas, além de outros poços escavados.

Em relação à vazão dos poços, a variação ocorreu de $1\text{m}^3/\text{h}$ a $93\text{m}^3/\text{h}$. Analisando-se os valores das vazões, nota-se que os poços com as maiores vazões encontram-se localizados nas extremidades da área, no setor sul e a noroeste; e enquanto os poços que apresentam as menores vazões estão mais na parte central, de leste a oeste, coincidindo esse fato com as menores profundidades. Entretanto, isso não significa afirmar que estes poços apresentam pouca vazão, uma vez que estão localizados em formações geológicas de arenitos, considerados os melhores aquíferos em termos de armazenamento de água. A Figura 8 apresenta a espacialização dos poços com suas respectivas vazões.



LEGENDA

CLASSES DE VAZÃO

- | | | | |
|--|--------------|--|---------------------|
| | 80 - 100m³/h | | Lago Batuva |
| | 60 - 80m³/h | | Rede de drenagem |
| | 40 - 60m³/h | | Arruamento |
| | 20 - 40m³/h | | Estradas |
| | 0 - 20m³/h | | Distrito Industrial |

MAPA DA VARIAÇÃO DAS VAZÕES DOS POÇOS

PROJEÇÃO UNIVERSAL TRANSVERSA DE MERCATOR
 DATUM VERTICAL: IMBITUBA - SANTA CATARINA
 DATUM HORIZONTAL: SAD 69 - MINAS GERAIS
 ORIGEM DA QUILOMETRAGEM UTM: "EQUADRO E MERIDIANO 57° W. GR"
 ACRESCIDAS AS CONSTANTES 10.000KM E 500KM RESPECTIVAMENTE

DESENHO TÉCNICO - LABORATÓRIO DE HIDROGEOLOGIA - UFSM
 ELABORAÇÃO: ISABEL CAMPOGARA
 ENG. CIVIL: LUIS CARLOS FRANTZ
 ORIENTAÇÃO: PROF. DR. JOSÉ LUIZ SILVERIO DA SILVA

Figura 8 - Mapa da espacialização das vazões dos poços

Fazendo-se uma análise a respeito das profundidades dos poços com suas respectivas vazões, nota-se que a maioria dos poços que tem maior profundidade, possui as maiores vazões. Isto se explica por estarem localizados em formações geológicas homogêneas, com predomínio de arenitos, pois estes apresentam uma característica muito particular que é a grande porosidade, o que permite grande acúmulo de água e também podem ter um maior número de entradas de água e também podem conter um maior número de entradas de água.

No que se refere à superfície potenciométrica da área, que corresponde ao peso da coluna d'água em relação ao datum considerando-se o nível do mar, a variação ocorreu entre 138m a 221m. Na Figura 9 apresenta-se a espacialização da superfície potenciométrica.

Por meio da visualização da Figura 9, pode-se verificar que há uma tendência regional em relação à direção preferencial de fluxo das águas subterrâneas da área, de sudeste para noroeste. Nota-se, ainda, que os maiores fluxos encontram-se localizados na região central da área. Outro fluxo importante está vindo do lado uruguaio em direção ao brasileiro, nas proximidades do centro da cidade, enquanto que nas proximidades do parque industrial ocorre uma inversão na direção desse fluxo.

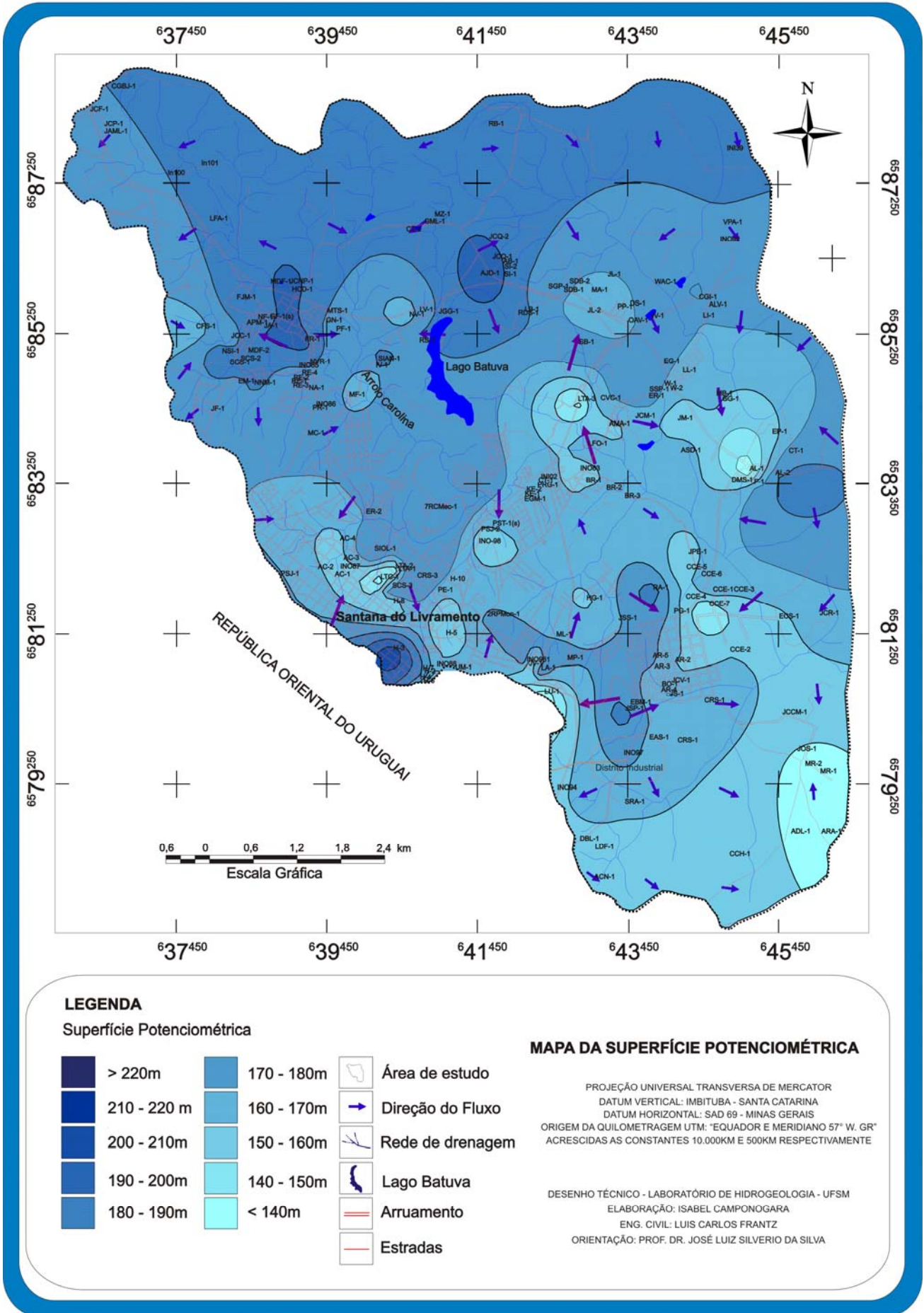


Figura 9 – Espacialização da superfície potenciométrica

5.2. Mapeamento da vulnerabilidade natural dos aquíferos

A vulnerabilidade natural baseia-se em sete fatores intrínsecos ao meio aquífero. A associação da vulnerabilidade natural dos aquíferos e o potencial de ameaça das atividades antrópicas possibilitou a caracterização e a classificação do risco de contaminação dos aquíferos, identificando as áreas mais críticas onde o monitoramento e estudos com maiores detalhes devem ser direcionados. O Anexo 2 mostra a relação dos 145 poços estudados, suas características e os parâmetros de entrada e saída necessários à determinação da vulnerabilidade natural. É importante destacar que a litologia identificada na área desempenha papel fundamental na aplicação da metodologia DRASTIC, pois através dela pode-se obter as informações a respeito do tipo de aquífero e dos solos. Também a condutividade hidráulica e o impacto na zona vadosa, pois estes fatores estão relacionados com a litologia, avaliada separadamente.

Na identificação do fator **Profundidade**, utilizou-se os níveis estáticos dos poços, entendido como sendo o nível da água do poço em situação de não bombeamento, sendo que foi de grande importância para a aplicação do modelo DRASTIC. O nível estático obtido de dados pré-existentes e em pesquisa de campo, através da mensuração do nível estático dos poços, com o uso do medidor (jaciri ou freatímetro), apresentou-se entre o mínimo de zero (0) e no máximo de 60 metros de profundidade. O valor zero corresponde às nascentes ou fontes que afloram em superfície. Os demais valores correspondem aos níveis dos poços tubulares ou escavados.

No Quadro 16 e na Figura 10 podem-se verificar os resultados obtidos deste fator e a espacialização. Na metodologia DRASTIC, este fator profundidade recebe peso 5. Em pesquisas de campo, realizadas em agosto e dezembro de 2004, e em março e julho de 2005, realizaram-se as mensurações dos níveis estáticos dos poços, a maior parte deles por meio de medições diretas, com a utilização do medidor Jaciri.

No Quadro 16 pode-se verificar a que intervalo se enquadrou o nível estático de cada poço e o respectivo valor da carga no intervalo.

Intervalos de Nível Estático	Poços no intervalo (código do poço)	Índice DRASTIC (cargas)
0 – 1,5	IN083, WAC-1, JCGM-1, GG-1, JSS-1, EGM-1, LFC-1, JS-1, RE-1, BR-1*, NVR-1, NSI-1, NNM-1.	10
1,5 – 4,6	MDF-1, MDF-2, JCR-1, SCS-1, PRG-1, CT-1, PSJ-2, GN-1, AMA-1, MB-1, PG-1, HG-1, MF-1, JV-1, ECS-1, EBM-1, JSP-1, UM-1.	9
4,6 – 9,1	RE-3, CGI-1, SRA-1, LDF-1, ACN-1, ADL-1, LFA-1, JCHP-1, SCS-2, SCS-3, PE-1, CCE-6, 7RCMec-1, FR-1, PF-1, EM-1, APM-1, JM-1, ASD-1, CVC-1, OAV-1, EP-1, JPE-1, BO-1, MP-1, LA-1, LV-1, NA-1, ER-2, LL-1, SIAN-1, KE-2, AR-3, AR-5*, SB-1*, IN098.	7
9,1 – 15,2	CCH-1, EAS-1, JOS-1, IN101, GML-1, JCF-1, SIOL-1, CCE-1, CCE-4, CCE-5, CCE-7, PSJ-1, CFS-1, JCC-1, FJM-1, ER-1, DS-1, IF-1, DMS-1, RS-1, H-7, H-3, PP-1, W-2, AR-2, IN139.	5
15,2 – 22,9	AB-1, SDB-1, IN100, VPA-1, SGP-1, CCE-2, JL-2, LB-1, NF-1, JCM-1, SSP-1, JCV-1, H-5, W-1*, CT-2, IN086, IN097, PR-1.	3
22,9 – 30,5	SI-1, MR-2, JA-1, EG-1, IV-1, H-2, H-8, MR-1.	2
>30,5	IN094, JL-1, JCP-1, MZ-1, LTA-1, LTA-2, LTA-3, LTC-1, 2RPMon-1, RDS-1, NV-1, H-4, LU-1*, IN087, AC-4, AL-1, H-6*, H-10, JV-1, IN088, IN096.	1

Quadro 16 - Classificação do Nível estático dos poços nos intervalos e suas respectivas cargas
Organização: Camponogara, I.

Na Figura 10 pode-se verificar que os maiores níveis estáticos dos poços estão na porção centro sul e sudoeste da área, pertencentes à Formação Botucatu, em área de recarga direta. Sendo assim, no que se refere ao fator em análise, a situação em que se encontram os níveis estáticos é considerada melhor sob o ponto de vista da vulnerabilidade, pois, quanto maior o nível estático significa que mais distante está o nível da água da superfície, e em situação mais favorável de não ser atingido por um contaminante. Entretanto, por estar em áreas de arenitos, onde o processo de infiltração ocorre com maior facilidade, por serem mais porosos e permeáveis, ainda pode ser atingido por substâncias de atividades contaminantes.

Em relação aos outros níveis estáticos menores, pode-se destacar que as águas estão mais vulneráveis à contaminação, pois o nível freático encontra-se mais próxima à superfície. Conseqüentemente, com o desenvolvimento de atividades antrópicas potencialmente poluidoras, estas podem atingir as águas subterrâneas.

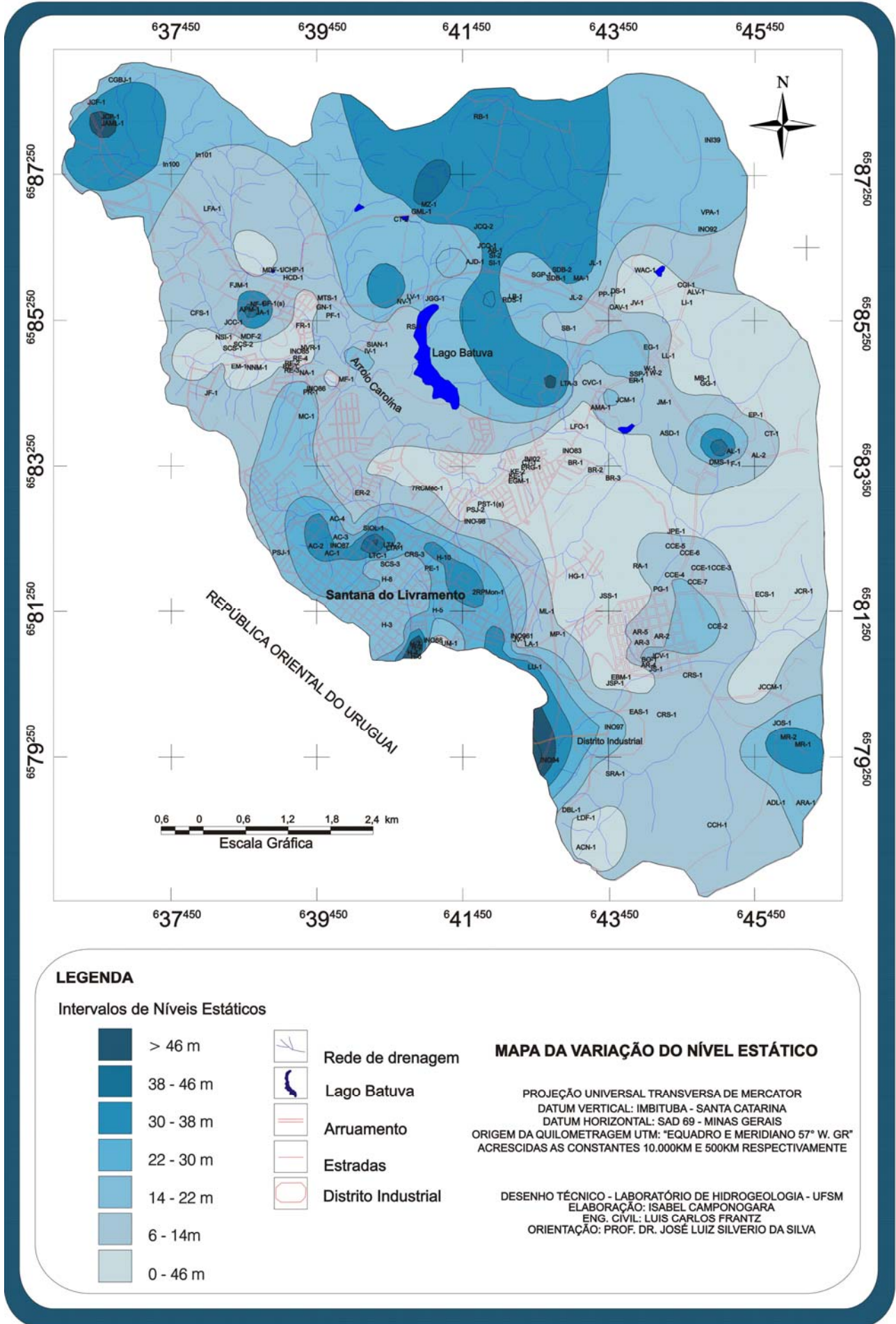


Figura 10 - Mapa da variação do Nível Estático dos poços

O fator **Recarga total** (recarga pela infiltração da chuva), considerado pelo modelo DRASTIC, está relacionado com a quantidade de água que atinge a zona saturada, ou seja, condiciona o transporte dos poluentes que possivelmente poderá atingir o sistema aquífero. De maneira geral, quanto maior for a recarga, maior o acúmulo de água no sistema aquífero, porém, havendo atividades com potencial de poluição em superfície, poderá haver transporte de substâncias poluidoras até o sistema aquífero.

Na área de estudo tem-se uma precipitação média anual de 1400mm/ano, ou seja, aproximadamente 50 a 100mm/ano se infiltram para recarga do Sistema Aquífero Guarani. Na aplicação do modelo considerou-se que esta infiltração é homogênea para toda a área, uma vez que a mesma possui apenas 73,693Km² e não apresenta variações na precipitação anual em seus diferentes setores. Sendo assim, no que se refere ao fator R, a área em estudo encontra-se no intervalo de recarga de 51,85 a 103,7 mm/ano. Este intervalo confere ao fator uma carga igual a 3, conforme o Quadro 17.

Intervalo de recarga em polegadas	Intervalo de recarga em mm/ano	Carga
2 – 4	51,85 – 103,7	3

Quadro 17 - Recarga total durante o ano (Peso: Rp= 4).
Organização: Camponogara, I.

A recarga em aquíferos é um fator de extrema importância, pois através desta se mantêm o equilíbrio do aquífero. No caso de ocorrer superexploração, pode ocasionar problemas de rebaixamento dos níveis freáticos. Por isso, é importante que para o uso desta água, deva-se usar racionalmente.

O fator **Meio Aquífero** pode ser definido com base nas unidades geológicas e hidrogeológicas ou ser associado aos tipos de aquíferos (confinados, semiconfinados, livres, nascentes). Este parâmetro refere-se à capacidade de atenuação do aquífero, que é função do material que o constitui. Uma rocha de grãos mais grosseiros ou mais fraturados possui menor capacidade de atenuar os poluentes, por outro lado um arenito argiloso, um siltito ou um argilo atenuam favoravelmente. Na área de estudo constatou-se a presença de aquíferos confinados (Fm. Serra Geral) e não confinados (Fm. Rosário do Sul e Fm. Botucatu) aflorantes.

As Formações TRjb (Formação Botucatu) e TRrs (Formação Rosário do Sul) foram enquadradas no tipo de meio aquífero dos arenitos, para a primeira arenitos e folhelhos acamadados, para a segunda, correspondendo aos aquíferos, arenitos limpos da Formação Botucatu, por serem menos atenuantes, receberam respectivamente carga 8, já menos permeáveis os arenitos argilosos da Formação rosário do Sul, dificultam a circulação de contaminantes, por conterem argilos mineras (minerais hidratados) de alta capacidade de troca de cátions, daí receberem nota 4.

A Formação Serra Geral (JKsg), a qual está inserida no tipo de meio aquífero dos basaltos fraturados, pois nem sempre elas estão inter-conectadas, muitas vezes os derrames são maciços e de porosidade menor que 1%, recebeu nota 3, ou seja, esta é a formação em melhor condição no que se refere ao fator A. Corresponde aos aquíferos confinados, que dificultam a infiltração, conseqüentemente a penetração de substancias tóxicas não ocorre facilmente, a não ser que existam fraturas ou fissuras presentes na unidade geológica. Ressalta-se que a carga foi atribuída a toda a unidade geológica em análise. Assim, os poços que estão sobre a mesma unidade estão inclusos na mesma situação. O Quadro 18 da metodologia permite a visualização dos diferentes meios aquíferos e suas respectivas cargas.

Tipo de meio aquífero	Faixa de variação (carga)	Poços (Código dos poços)	Cargas (Ac)
Arenitos (Botucatu)	5 – 9	IN101, IN100, LFA-1, VPA-1, GML-1, SGP-1, MZ-1, JCHP-1, LTA-1, LTA-2, LTA-3, LTC-1, SIOL-1, SCS-1, SCS-2, SCS-3, PRG-1, CT-1, PSJ-2, PE-1, CCE-1, AL-1, AL-2, SB-1, H-6, H-10, MR-1, JV-1, CT-2, IN098, IN102, IN086, IN088, IN092, IN096, IN139, RE-4, PR-1, CT-1, NVR-1, NSI-1, NNM-1, IN083, RE-3, SI-1, AB-1, SDB-1, JL-1, AJD-1, CGI-1, WAC-1, MDF-1, MDF-2, JCR-1, LDF-1, CCH-1, CAN-1, ADL-1, ARA-1, MB-1, GG-1, EP-1, IF-1, DNS-1, JPE-1, RA-1, PG-1, JSS-1, HG-1, MP-1, LA-1, MF-1, IV-1, LV-1, NV-1, RS-1, NA-1, ER-2, EGM-1, LFC-1, SSP-1, JV-1, LL-1, ECS-1, CCE-4, CCE-5, CCE-6, CCE-7, PSJ-1, 2RPMon-1, JL-2, LB-1, RDS-1, CFS-1, JCC-1, NF-1, FJM-1, JA-1, FR-1, GN-1, PF-1, EM-1, APM-1, ER-1, JM-1, JCM-1, ASD-1, AMA-1, OAV-1, DS-1, SIAN-1, H-4, H-2, H-7, H-3, H-8, H-5, IN087, AC-3, AC-4, KE-1, KE-2, RE-1, RE-2, PP-1, W-1, W-2, BR-1, BR-2, BR-3.	8
Arenito (Rosário do Sul)	4 – 9	JCGM-1, AR-5, IN097, MR-2, CRS, SRA-1, EAS-1, BO-1, JCV-1, CCE-2, EBM-1, JSP-1, JS-1, LU-1, AR-2, AR-3, AR-4.	4
Basalto (Serra Geral)	2 – 10	JCP-1, JAML-1, JCF-1, RB-1, IN094, EG-1, 7RCMec-1, CVC-1, UM-1.	3

Quadro 18 - Tipos de meio aquíferos e suas respectivas cargas (Ac) e distribuição dos poços em cada unidade. (Peso: Ap=3).

Organização: Camponogara, I.

Observando-se as informações no Quadro 18, percebe-se que a maioria dos poços estão localizados nos tipos de aquíferos livres da Formação Arenito Botucatu. Estes aquíferos apresentam grande capacidade de armazenamento de água, por essa Formação ser mais permeável e porosa em função de sua granulometria mais homogênea (bem selecionado).

As Figuras 11 e 12 apresentam respectivamente os aspectos das formações litológicas presentes na área e a suas representações cartográficas.

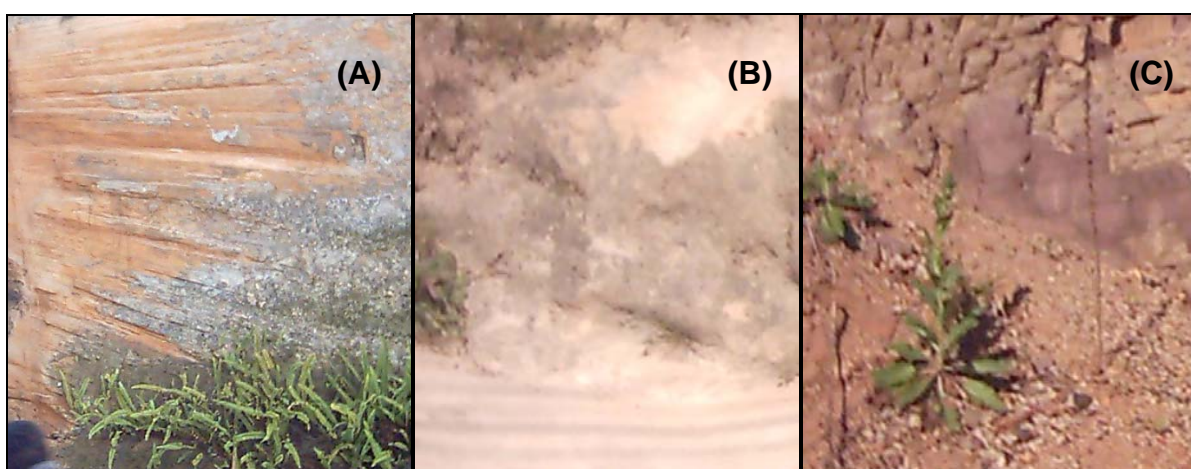


Figura 11 - Aspectos da Fm. Botucatu (A), Fm. Rosário do Sul (B) e Fm Serra Geral (C)

Observando-se os aspectos das três formações presentes na área de estudo pode-se constatar as características estruturais bem distintas dos arenitos da Formação Botucatu e da Formação Rosário do Sul com relação aos basaltos, da Formação Serra Geral, os quais são fraturados, em diáclases horizontais e verticais.

Os arenitos da Formação Botucatu ocupam a maior extensão da área de estudo, e aparecem aflorando em superfície, assim recebem recarga direta oriunda de chuvas. Apresentam boa permeabilidade e porosidade, por isso, permitem armazenamento e captação de água em grandes quantidades, sendo considerados os melhores aquíferos na região. Já os arenitos da Formação Rosário do Sul aparecem em menor área, sua granulometria de areia fina argilosa, resultam em permeabilidade mais baixa que a Formação Botucatu, mas também apresenta boa capacidade de armazenamento de água em vários poços no setor leste.

Por outro lado, os basaltos, da Formação Serra Geral, aparecem ao norte e em algumas áreas isoladas (morros testemunhos) na parte central da área de estudo, recobrando os arenitos, deixando estes confinados. Os basaltos não permitem um grande acúmulo de água, pois em sua estrutura maciça não ocorrem espaços vazios, como nos arenitos, exceto em suas fraturas ou fissuras, aí sim podem reservar água.

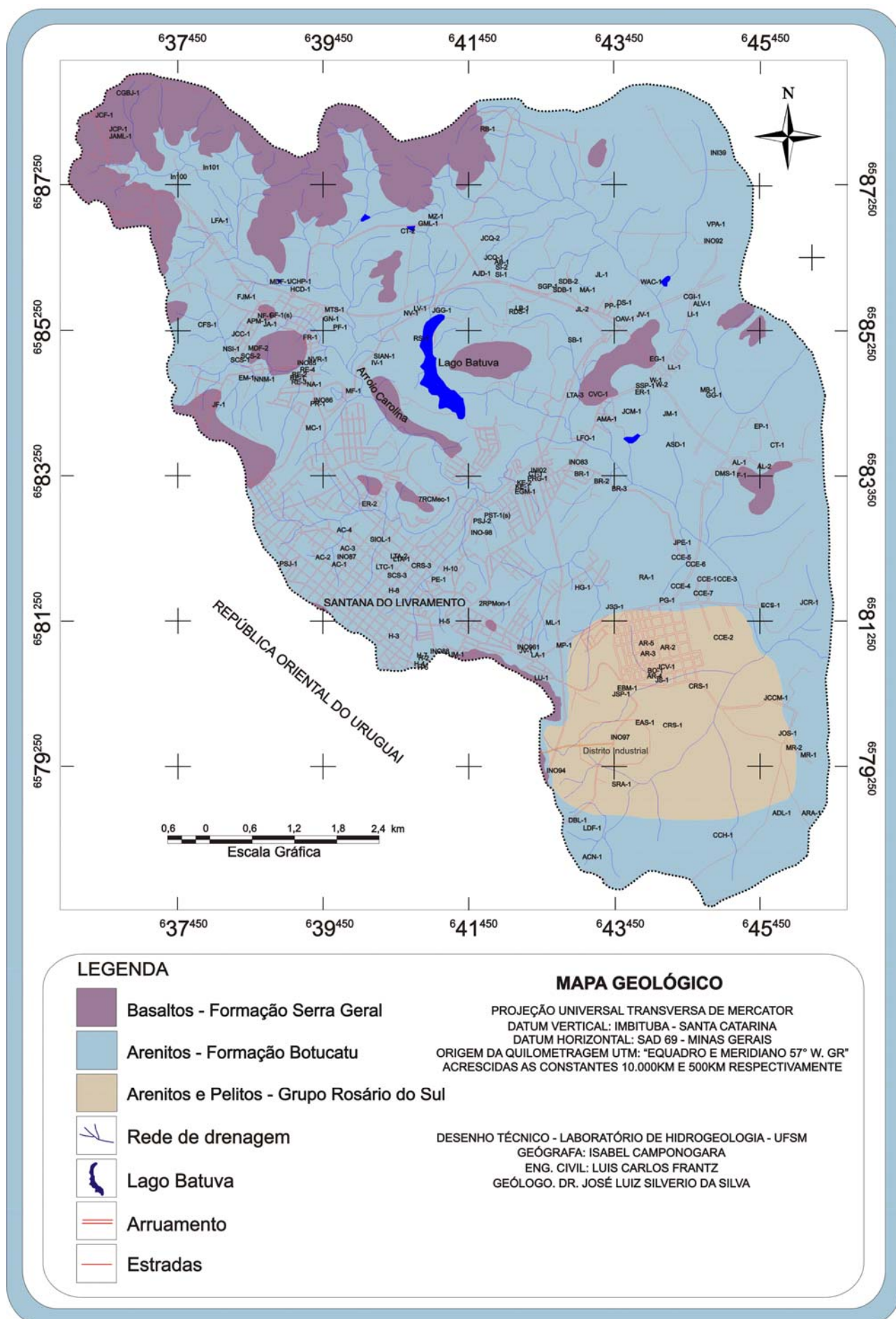


Figura 12 - Mapa das formações geológicas

O fator **Solos** (S) para o modelo DRASTIC recebe peso 2. O enquadramento e pontuação deste fator baseou-se nas amostras coletadas para cada unidade geológica presente na área de estudo. A referida análise granulométrica realizada permitiu constatar 3 tipos de solo. As cargas deste fator (S) foram dadas para cada unidade, de acordo com a percentagem de areia, silte e argila, conforme o modelo DRASTIC.

As referidas cargas foram dadas pela lógica de que, quanto maior a granulometria de um solo, maior deve ser sua permeabilidade. Como exemplo pode-se citar a areia muito grossa (1,0 – 2,0 mm) e o silte e argila (0,062 - 0,002 mm). O primeiro, de maior granulometria, possui maior permeabilidade que o segundo, de menor granulometria. Um solo que tem maior permeabilidade se caracteriza por deixar a água percolar mais facilmente. Sendo assim, a carga contaminante que se infiltra junto com a água sofrerá uma menor atenuação antes de chegar ao aquífero podendo espalhar-se.

O teste de granulometria realizado para as amostras da formação geológico Rosário do Sul revelou que este possui uma percentagem de 7 a 27% de argila, de 28 a 50% de silte e menos de 52% de areia. Assim, de acordo com o triângulo textural (Vieira, 1975 p. 263), este solo é classificado como sendo de textura Franco. Esta unidade recebeu carga 5, em função das características apresentadas, conforme Quadro 19.

A Formação Botucatu recebeu carga 6, uma vez que, de acordo com o triângulo textural, este se enquadrava no tipo Areia Franca fina, com 50% ou mais de areia fina, menos de 25% de areia muito grossa e média, e menos de 50% de areia muito fina.

A Formação Serra Geral foi classificada, de acordo com o triângulo textural, em Textura Franco Siltosa, com 50% ou mais de silte e de 12 a 27% de argila, ou 50 a 80% de silte e menos de 12% de argila. Assim, esta unidade recebeu carga 4. No Quadro 19 apresentam-se as classes de solos com os respectivos poços distribuídos em cada intervalo.

Granulometria	Poços no intervalo (código do poço)	Carga (Sc)
Franco arenoso (Formação Botucatu)	IN101, IN100, LFA-1, VPA-1, GML-1, SGP-1, MZ-1, JCHP-1, LTA-1, LTA-2, LTA-3, LTC-1, SIOL-1, SCS-1, SCS-2, SCS-3, PRG-1, PSJ-2, PE-1, CCE-1, AL-1, AL-2, SB-1, H-6, H-10, MR-1, JV-1, CT-2, IN098, IN102, IN086, IN088, IN092, IN096, IN139, RE-4, PR-1, CT-1, NVR-1, NSI-1, NNM-1, IN083, RE-3, SI-1, AB-1, SDB-1, JL-1, AJD-1, CGI-1, WAC-1, MDF-1, MDF-2, JCR-1, LDF-1, CCH-1, CAN-1, ADL-1, ARA-1, MB-1, GG-1, EP-1, IF-1, DNS-1, JPE-1, RA-1, PG-1, JSS-1, HG-1, MP-1, LA-1, MF-1, IV-1, LV-1, NV-1, RS-1, NA-1, ER-2, EGM-1, LFC-1, SSP-1, JV-1, LL-1, ECS-1, CCE-4, CCE-5, CCE-6, CCE-7, PSJ-1, 2RPMon-1, JL-2, LB-1, RDS-1, CFS-1, JCC-1, NF-1, FJM-1, JA-1, FR-1, GN-1, PF-1, EM-1, APM-1, ER-1, JM-1, JCM-1, ASD-1, AMA-1, OAV-1, DS-1, SIAN-1, H-4, H-2, H-7, H-3, H-8, H-5, IN087, AC-3, AC-4, KE-1, KE-2, RE-1, RE-2, PP-1, W-1, W-2, BR-1, BR-2, BR-3.	6
Franca (Formação Rosário do Sul)	JCGM-1, AR-5, IN097, MR-2, CRS, SRA-1, EAS-1, BO-1, JCV-1, CCE-2, EBM-1, JSP-1, JS-1, LU-1, AR-2, AR-3, AR-4.	5
Franco siltosa (Formação Serra Geral)	JCP-1, JAML-1, JCF-1, RB-1, IN094, EG-1, 7RCMec-1, CVC-1, UM-1.	4

Quadro 19 - Solos e suas respectivas cargas (Sc), distribuição dos poços (Peso: Sp=2).

Fonte: Pesquisa de campo e Lab. Sedimentologia – Departamento de Geociências/UFSM (2005)
Organização: Camponogara, I.

Como se pode observar, no Quadro 19, a maioria dos poços, cerca de 181, encontram-se localizados sobre o tipo de solos Franco arenoso representando 84% do total avaliado, originário da Formação Botucatu. No tipo de solo Franco, da Formação Rosário do Sul, constatou-se a presença de 18 e no tipo de solo Franco siltosa, da Formação Serra Geral, verificou-se 12 poços.

A seguir na Figura 13 apresenta-se a representação cartográfica das unidades de solos encontradas na área de estudo, bem como a locação dos poços tubulares e escavados e das fontes.

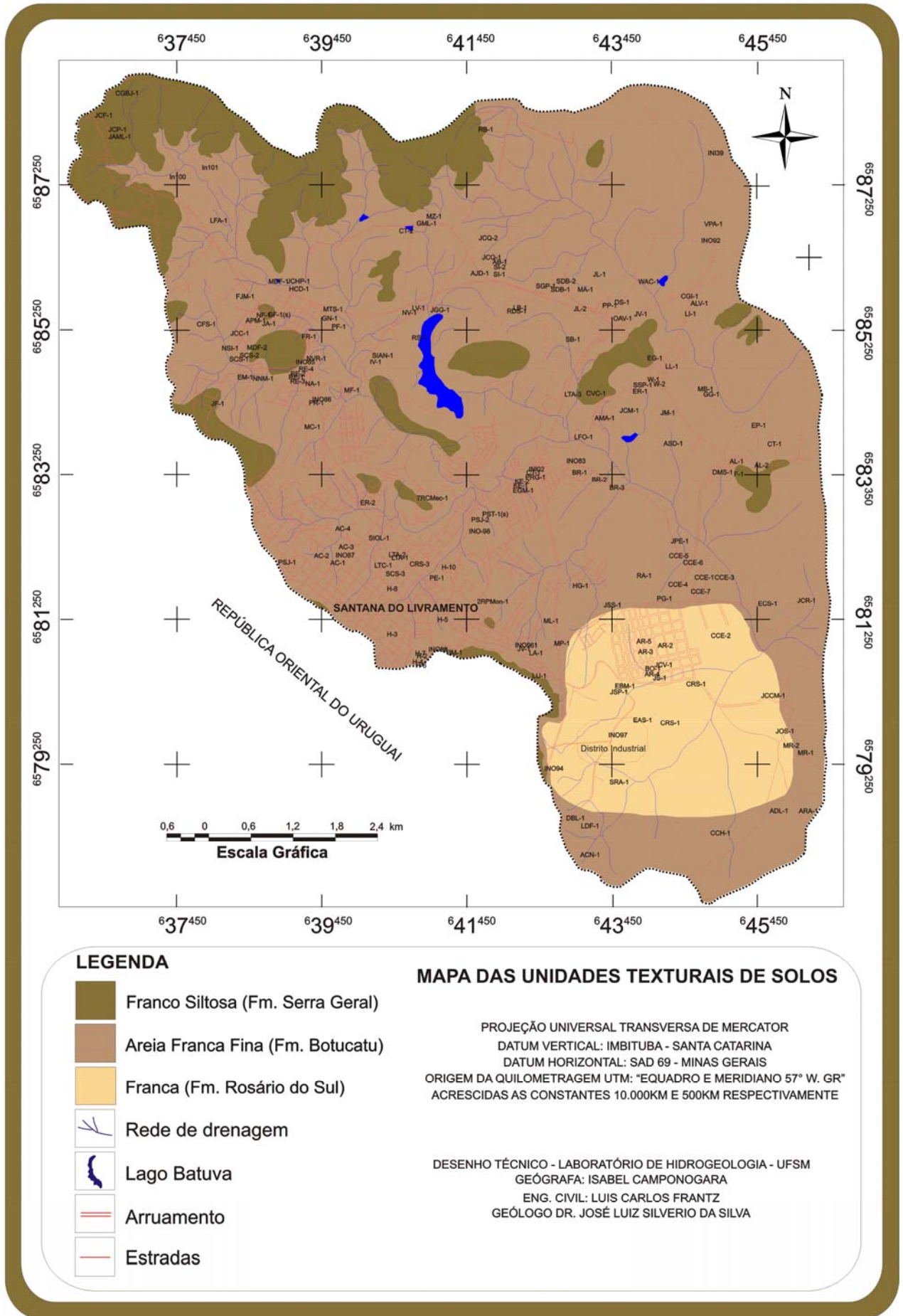


Figura 13 - Mapa das unidades de solos

O fator **Topografia**, obtido do levantamento da declividade, fornece informações valiosas a respeito das aptidões naturais da terra, ou seja, é revelador dos limites impostos pelo relevo para os diferentes tipos de uso. Neste sentido, é de grande valia para o planejamento de uso de uma área. Este foi identificado com base no Modelo Digital do Terreno (MNT), o qual foi obtido a partir das cartas topográficas.

Nesta pesquisa, especificamente, a declividade é de fundamental importância, pois constitui um dos fatores considerados pelo modelo DRASTIC para o levantamento da vulnerabilidade natural da área. Para o modelo DRASTIC o fator topografia tem peso igual a um (1), ou seja, é o fator considerado de menor importância pelo modelo em questão. A partir dos intervalos de classes do mapa clinográfico foram estabelecidos os diferentes valores de carga para a área conforme pode ser observado no Quadro 20.

Classes de Declividade	Poços no intervalo (código do poço)	Carga DRASTIC
0 – 2%	RE-3, AJD-1, WAC-1, MR-2, MDF-1, CRS, SRA-1, JOS-1, ADL-1, JCGM-1, SIOL-1, SCS-1, PSJ-2, PE-1, CCE-4, 7RCMec-1, RDS-1, CFS-1, FJM-1, FR-1, EM-1, APM-1, JM-1, ASD-1, AMA-1, MB-1, GG-1, EP-1, DMS-1, RA-1, BO-1, MP-1, EG-1, MF-1, NA-1, ER-2, EGM-1, JCV-1, JS-1, H-3, H-5, AC-2, AC-4, KE-1, KE-2, RE-1, AR-4, SB-1, H-10, MR-1, IN098, IN139, CT-1, NSI-1.	10
2 – 6%	IN083, SDB-1, LFA-1, VPA-1, SGP-1, LTA-1, LTA-2, LTC-1, PRG-1, CT-1, CCE-1, CCE-5, CCE-6, CCE-7, PSJ-1, 2RPMon-1, JL-2, PF-1, JPE-1, LFC-1, H-2, H-7, W-2, BR-1*, AR-5*, IN102, IN086, PR-1, NVR-1, LTA-1, LTA-2	9
6 – 12%	SI-1, AB-1, IN094, JL-1, CGI-1, JCR-1, CCH-1, ARA-1, JCP-1, JCF-1, LTA-3, SCS-3, CCE-2, LB-1, NF-1, GN-1, CVC-1, OAV-1, DS-1, IF-1, PG-1, JSS-1, HG-1, NV-1, ECS-1, SIAN-1, H-8, IN087, AC-3, RE-2*, PP-1, W-1*, BR-2, BR-3, AR-2, AL-1, JV-1, CT-2, IN092, IN092, RE-4, IN097.	5
12 - 18%	LDF-1, CCH-1, CAN-1, EAS-1, IN100, GML-1, MZ-1, ER-1, JCM-1, LA-1, LV-1, RS-1, JV-1, LL-1, EBM-1, LU-1, AR-3, AL-2, RB-1, IN088, IN096, NNM-1.	3
>18%	MDF-2, IN101, JCHP-1, SCS-2, SCS-3, JCC-1, JA-1, IV-1, SSP-1, JSP-1, H-4, UM-1, H-6.	1

Quadro 20 - Classes de declividade da área de estudo com a distribuição dos poços e cargas sugeridas no modelo DRASTIC (Tc)

Fonte: Lab. Hidrogeologia – Departamento de Geociências/UFSM (2005)

Organização: Camponogara, I.

Verificando-se o Quadro 20 pode-se constatar, que no intervalo de declividade de 0 – 2%, encontram-se 62 poços. Este intervalo recebe carga igual a 10. Para o intervalo de 2 -6%, estão 36 poços, e sua carga corresponde a 9. No intervalo de 6 –

12%, estão 49 poços, e sua carga é 5. No intervalo de 12 – 18%, verificou-se 23 poços, o mesmo recebeu carga 3, e no intervalo de declividade maior que 18%, verificaram-se 15 poços, e este recebeu carga igual a 1. Na Figura 14 pode-se verificar a representação cartográfica das declividades com os respectivos poços.

A declividade é um fator muito importante para a recarga dos aquíferos, pois em declividades menores o processo de infiltração ocorre com maior intensidade; em contrapartida, nas declividades maiores ocorre maior escoamento superficial e conseqüentemente menor será a infiltração.

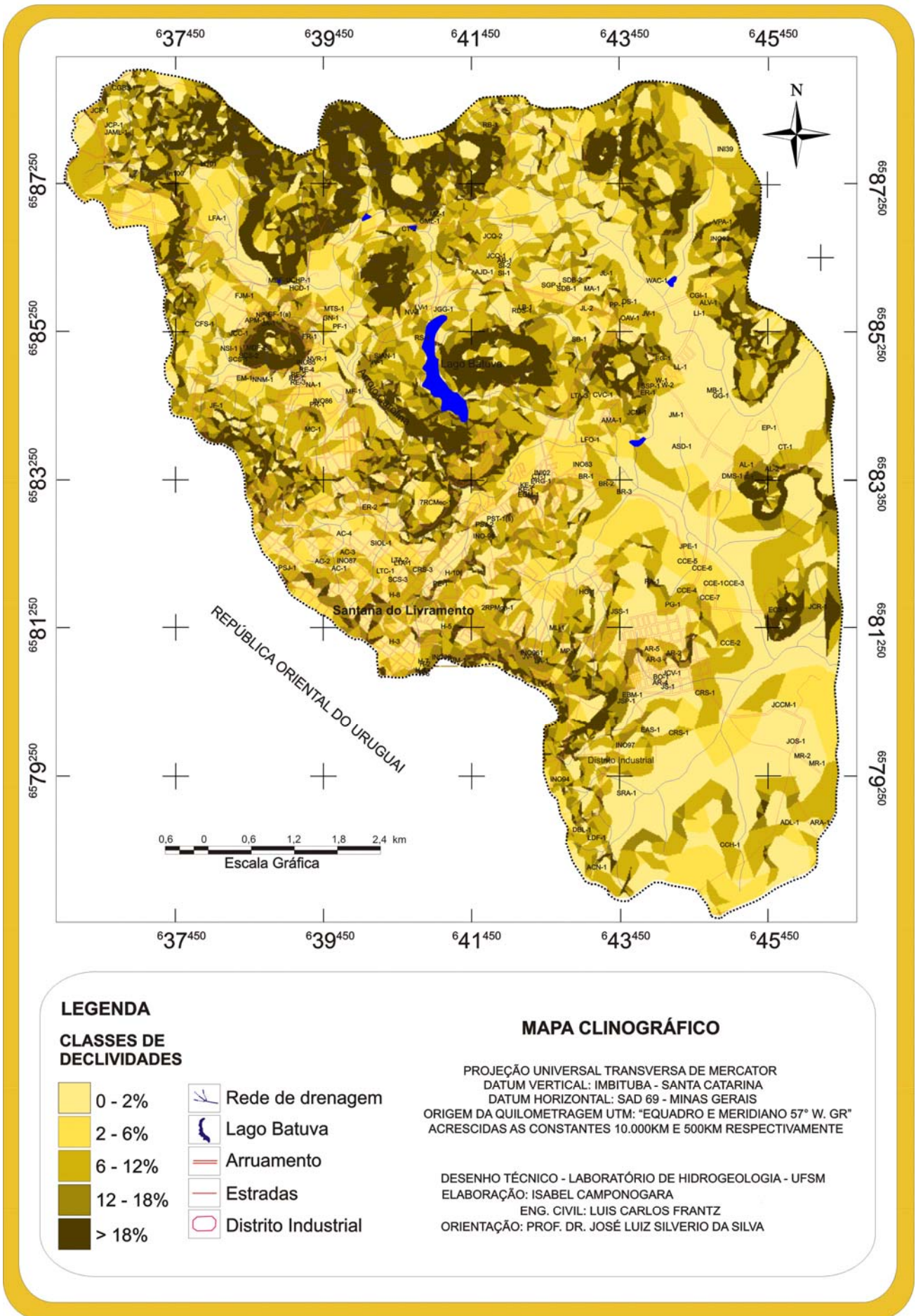


Figura 14 - Mapa clinográfico da área de estudo

O fator **impacto na zona vadosa (I)**, entendida como a região do terreno não saturada em água que antecede a zona saturada, recebe peso 5. É definido a partir da análise do tipo de material da zona acima do nível freático (zona vadosa). Este material é determinante do tempo de percurso do poluente até a zona saturada, permitindo a ocorrência de diversos processos de atenuação. O Quadro 21 apresenta os intervalos do fator impacto na zona vadosa (I), com respectiva classificação dos poços.

Tipo de material	Faixa (carga)	Poços no intervalo (código do poço)	Cargas típicas (Ic)
Arenito Botucatu, (Cenozóico)	2 – 7	IN101, IN100, LFA-1, VPA-1, GML-1, SGP-1, MZ-1, JCHP-1, LTA-1, LTA-2, LTA-3, LTC-1, SIOL-1, SCS-1, SCS-2, SCS-3, PRG-1, CT-1, PSJ-2, PE-1, CCE-1, AL-1, AL-2, SB-1, H-6, H-10, MR-1, JV-1, CT-2, IN098, IN102, IN086, IN088, IN092, IN096, IN139, RE-4, PR-1, CT-1, NVR-1, NSI-1, NNM-1, IN083, RE-3, SI-1, AB-1, SDB-1, JL-1, AJD-1, CGI-1, WAC-1, MDF-1, MDF-2, JCR-1, LDF-1, CCH-1, CAN-1, ADL-1, ARA-1, MB-1, GG-1, EP-1, IF-1, DNS-1, JPE-1, RA-1, PG-1, JSS-1, HG-1, MP-1, LA-1, MF-1, IV-1, LV-1, NV-1, RS-1, NA-1, ER-2, EGM-1, LFC-1, SSP-1, JV-1, LL-1, ECS-1, CCE-4, CCE-5, CCE-6, CCE-7, PSJ-1, 2RPMon-1, JL-2, LB-1, RDS-1, CFS-1, JCC-1, NF-1, FJM-1, JA-1, FR-1, GN-1, PF-1, EM-1, APM-1, ER-1, JM-1, JCM-1, ASD-1, AMA-1, OAV-1, DS-1, SIAN-1, H-4, H-2, H-7, H-3, H-8, H-5, AC-2, IN087, AC-3, AC-4, KE-1, KE-2, RE-1, RE-2, PP-1, W-1, W-2, BR-1, BR-2, BR-3.	3
Arenito Rosário do Sul (silto argiloso)	2 – 7	JCGM-1, AR-5, IN097, MR-2, CRS, SRA-1, EAS-1, BO-1, JCV-1, CCE-2, EBM-1, JSP-1, JS-1, LU-1, AR-2, AR-3, AR-4.	5
Basalto (fraturas, amígdalas, vesículas)	2 – 10	JCP-1, JAML-1, JCF-1, RB-1, IN094, EG-1, 7RCMec-1, CVC-1, UM-1.	9

Quadro 21 - Impacto da Zona Vadosa e suas respectivas cargas (Ic). (Peso: Ip=5).

Fonte: Pesquisa de campo e Lab. Sedimentologia – Departamento de Geociências/UFSM (2005)

Organização: Camponogara, I.

Neste, a Formação Botucatu (TRjb) foi enquadrada nos arenitos, recebendo carga 3; a Formação Rosário do Sul (TRrs) foi enquadrada no tipo de material silto argiloso, recebendo carga 5; e a Formação JKsg (Formação Serra Geral) enquadra-se no tipo de material basalto (fraturas, amígdalas e vesículas) e recebeu carga 9.

Os arenitos da Formação Botucatu e da Formação Rosário do Sul recebem carga menor por serem menos atenuantes; por outro lado, os basaltos, que são uma camada confinante, não permitem a penetração de contaminantes, a não ser que existam fraturas em sua estrutura, por isso recebem um valor maior na sua carga.

O fator **condutividade hidráulica (C)**, que consiste na quantidade de percolação de água no subsolo através do meio aquífero, segundo o modelo DRASTIC, recebe peso 3. Em relação à carga atribuiu-se 1, em função de, nas 3 formações geológicas presentes na área, o valor obtido para condutividade hidráulica ter sido menor que 20l/m².d; por isso, adotou-se para toda a área o intervalo que pode ser conferido no Quadro 22.

Coeficiente de infiltração L/m ² .d	Cargas (Cc)
<20	1

Quadro 22 - Condutividade hidráulica, cargas (Cc). (Peso: Cp=3).
Organização: Camponogara, I.

Nos arenitos da Formação Botucatu e da Formação Rosário do Sul, a condutividade hidráulica é maior de que nos basaltos, pois a percolação da água ocorre com maior facilidade, devido à grande permeabilidade, fato este que facilita a circulação da água no interior destas Formações, facilitando a recarga e a exploração.

A partir dos resultados obtidos em cada fator pode-se constatar a vulnerabilidade natural dos aquíferos da área de estudo. No Anexo 2 constam as informações utilizadas e os resultados obtidos com aplicação do Modelo DRASTIC.

Desta forma, obtiveram-se, para a área de estudo, 3 classes quanto ao grau de vulnerabilidade natural dos aquíferos. A classe considerada como vulnerável corresponde ao intervalo dos índices DRASTIC de 65 a 95. As áreas que representam esta classe estão localizadas no setor sudoeste da área de estudo e ao norte com maior abrangência, no centro em menores áreas. Nesta classe verificou-se a presença de 61 poços.

A classe considerada como muito vulnerável corresponde ao intervalo do índice DRASTIC que é de 95 a 120. Abrange a maior parte da área de estudo e fonte de grande preocupação, pois apresenta um índice de susceptibilidade muito alto, sendo necessário para estas áreas muito cuidado na execução de qualquer atividade que apresente algum tipo de risco para a manutenção da qualidade da água. Nesta classe verificou-se a locação de 68 poços.

A classe considerada como extremamente vulnerável corresponde ao intervalo do índice DRASTIC que está acima de 120. Esta classe aparece em menor abrangência no centro da área de estudo e também de leste a oeste. Verificou-se a

presença de 21 poços. Ressalta-se que, conforme a metodologia são áreas de proteção obrigatória.

A Figura 15, que representa a espacialização cartográfica da vulnerabilidade natural dos aquíferos, permitiu a identificação das áreas mais vulneráveis frente às atividades com potencial de poluição. Assim tem-se uma ferramenta de grande importância para o local de estudo, pois pode-se saber através desta representação cartográfica os locais mais apropriados para locação de poços ou mesmo para instalação de hospitais, de indústrias, de aterros sanitários, entre outros e com isso proteger o meio ambiente e os sistemas aquíferos de possíveis eventos de contaminação.

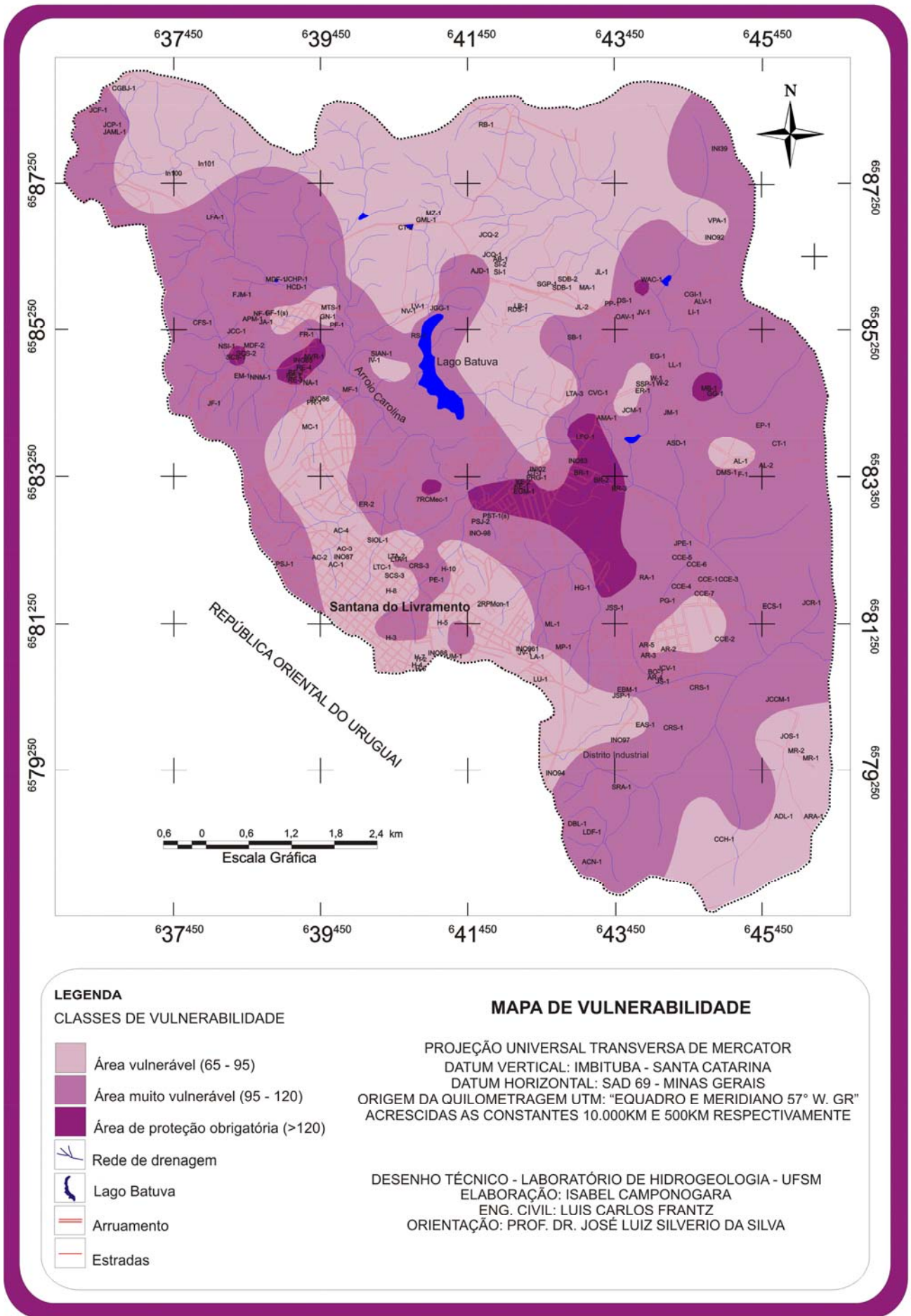


Figura 15 - Mapa da vulnerabilidade natural dos aquíferos

5.3. Identificação de fontes potenciais de contaminação

As principais fontes potencialmente contaminantes foram cadastradas e analisadas neste trabalho, incluindo-se: área de destinação final de resíduos sólidos domiciliar e de outras origens; e postos de serviços com estocagem subterrânea de combustível e cemitérios. No Quadro 23 apresentam-se as fontes potenciais de contaminação identificadas na área de estudo.

Fontes de Contaminação	Coordenadas UTM		Altitude (m)	Poço	Lavagem	Caixa Coletora	Troca de	Formação Litológica
	Long (E)	Lat. (N)		Tubular			Óleo	
Posto Cheyuhem	641081	6582069	205	Não	Sim	Sim	Sim	Botucatu
Posto Espigão (Matriz)	640882	6581844	221	Não	Não	Sim	Sim	Botucatu
Posto Espigão II	642293	6583303	196	Não	Não	Sim	Sim	Botucatu
Posto Espigão IV	642687	6580396	257	Não	Não	Sim	Sim	Botucatu
Posto Megapetro	639642	6581645	220	Sim	Sim	Sim	Sim	Botucatu
Posto Fortim (Ipiranga)	640283	6580435	249	Não	Sim	Sim	Sim	Botucatu
Posto Rosul	639192	6581748	246	Não	Sim	Sim	Sim	Botucatu
Posto Custódio AGIP	638828	6582072	234	Não	Sim	Sim	Sim	Botucatu
Posto São João I	638766	6582164	234	Sim	Sim	Sim	Sim	Botucatu
Posto Solup	639817	6581264	232	Sim	Sim	Sim	Sim	Botucatu
Posto Texaco	640193	6580818	244	Não	Não	Sim	Sim	Botucatu
Posto Santana	641684	6582794	205	Não	Não	Sim	Sim	Botucatu
Posto São João II	641467	6582692	202	Sim	Sim	Sim	Sim	Botucatu
Posto Lumax II	640038	6581111	210	Não	Não	Não	Não	Botucatu
Posto Lumax I	640336	6580974	232	Não	Não	Sim	Sim	Botucatu
Posto Lumax III	639307	6584517	193	Não	Não	Sim	Sim	Botucatu
Posto Lumax IV	671974	6592213	154	Sim	Não	Sim	Sim	Botucatu
Posto Lumax VII	643792	6581397	217	Sim	Não	Sim	Sim	Botucatu
Posto Caburé	640387	6582372	210	Não	Não	Sim	Sim	Botucatu
Posto Siol	640099	6582430	218	Não	Sim	Sim	Sim	Botucatu
Posto Monarca	640255	6581175	240	Não	Não	Sim	Sim	Botucatu
Posto Catalan	639943	6582042	219	Não	Não	Sim	Sim	Botucatu
Posto Tamandaré	640928	6581157	239	Não	Não	Sim	Sim	Botucatu
Cemitério Municipal	642193	6582891	198	Não				Botucatu
Cemitério tabatinga	645580	6583650	195	Não				Botucatu
Antigo Lixão**	641000	6587820	332	Não				SG

Quadro 23 - Fontes de contaminação e informações SG = Serra Geral (basaltos)

Fonte: Pesquisa de campo/Lab. de Hidrogeologia/UFMS (2004 - 2005)

Observando-se o Quadro 23 das fontes potenciais de contaminação, pode-se verificar que foram cadastrados 23 postos de combustível, 3 cemitérios, sendo que um Central e da Tabatinga, se divide em dois, e um lixão, o qual encontra-se desativado, porém, onde ainda há acúmulo de resíduos que podem causar danos ao meio ambiente, principalmente às águas, pois ocorre ainda a geração de chorume. Sugere-se o monitoramento.

Dentre as principais fontes potenciais de contaminação cadastradas, as de maior número foram os postos de combustíveis, com um total de 23. Os postos de combustíveis representam risco para as águas subterrâneas, pois os tanques de combustíveis ficam, na maioria das vezes, estocados no subsolo, e, no caso possível de ocorrer vazamentos, haverá séria contaminação do lençol freático, se não for detectado.

Os dois cemitérios cadastrados representam para as águas subterrâneas risco de contaminação, pois, à medida que ocorre o processo de decomposição de um corpo, que ao todo leva em média dois anos e meio, dá origem a um líquido chamado necrochorume. Este composto é eliminado durante o primeiro ano após o sepultamento. Trata-se de um escoamento viscoso, com a coloração acinzentada que com a chuva pode atingir o lençol freático. O necrochorume pode causar sérios problemas para a saúde humana no caso de atingir as águas subterrâneas e estas serem usadas para alimentação ou higiene pessoal.

O antigo lixão também foi cadastrado, embora se encontre desativado. No local ainda há resíduos, que, com ação da chuva, podem infiltrar com as águas, transportando substâncias tóxicas que são produzidas à medida que vai ocorrendo a decomposição, e assim chegar até os aquíferos, contaminando as águas; desta forma, são necessárias medidas para recuperar este local. Na Figura 16 apresentam-se exemplos das fontes potenciais de contaminação selecionadas para este estudo.



Figura 16 - Fotos de pontos potenciais de contaminação (Posto de combustível – A e Cemitério - B)

Visualizando-se a Figura 16 pode-se observar a imagem de um posto de combustível (A) e um cemitério (B); neste, pode-se ver, em seu interior, um poço escavado. Sabe-se que as substâncias oriundas de restos mortais são tóxicas, e em contato com a água podem causar diversas doenças aos seres vivos. No caso deste poço, é necessário realizar análises físico-químicas da água, a qual está sendo utilizada pela população, somente para regar flores.

5.4. Integração de informações: vulnerabilidade natural de aquíferos e fontes potenciais de contaminação.

É extremamente importante aferir a vulnerabilidade natural de aquíferos com as atividades antrópicas desenvolvidas em superfície, pois mesmo que o meio natural apresente uma estrutura frágil é o tipo, a intensidade, a forma, e o tempo de disposição das atividades que determinam a real situação do risco que o aquífero e mais precisamente os recursos hídricos estão submetidos.

Desse modo, na integração das fontes potenciais de poluição, identificadas na área de estudo, com o mapa de vulnerabilidade natural de aquíferos, pode-se constatar a que classes de vulnerabilidade estão localizadas estas fontes (Figura 17).

Na classe considerada como vulnerável constatou-se a presença de 9 postos de combustíveis e do antigo lixão. Para a classe muito vulnerável, verificou-se a presença de 11 postos de combustíveis e 2 cemitérios. E na classe extremamente vulnerável verificaram-se 2 postos de combustível.

As fontes de contaminação, como os postos de combustíveis, merecem muita atenção, pois utilizam produtos não biodegradáveis, e, considerando-se o tempo de execução, a idade dos tanques e o seu contato com o solo, poluentes podem atingir os recursos hídricos subterrâneos, dependendo da profundidade do lençol freático.

Os resíduos sólidos, quando lançados inadequadamente em superfície, representam uma significativa fonte de contaminação para as águas superficiais e subterrâneas. Então deve-se selecionar de modo mais adequado à locação para estes resíduos, para que o meio ambiente não seja mais gravemente atingido, mais especificamente os recursos hídricos superficiais e subterrâneos.

Os cemitérios podem ser fontes geradoras de impactos ambientais. A localização e operações inadequadas de necrópoles em meios urbanos podem provocar a contaminação de mananciais hídricos por microrganismos que proliferam

no processo de decomposição dos corpos. Se o aquífero freático for contaminado na área interna do cemitério, esta contaminação poderá fluir para regiões próximas, e aumentar o risco de doenças nas pessoas que venham a utilizar destas águas captadas através de poços rasos.

Portanto, conforme a Figura 17, destaca-se que as fontes potenciais de contaminação selecionadas para este estudo merecem muita atenção em função das características de susceptibilidade, ou seja, do alto índice de vulnerabilidade natural dos aquíferos.

O Distrito Industrial mesmo tendo apenas uma indústria engarrafadora de bebidas instalada em área muito vulnerável, portanto a instalação futura de indústrias que utilizem o subsolo para depósito de substâncias potencialmente contaminantes devem ser avaliados seu potencial tóxico e risco de contaminação. Deve-se propor para aqueles de maior risco a instalação de piezômetros para monitoramentos da qualidade das águas subterrâneas anualmente.

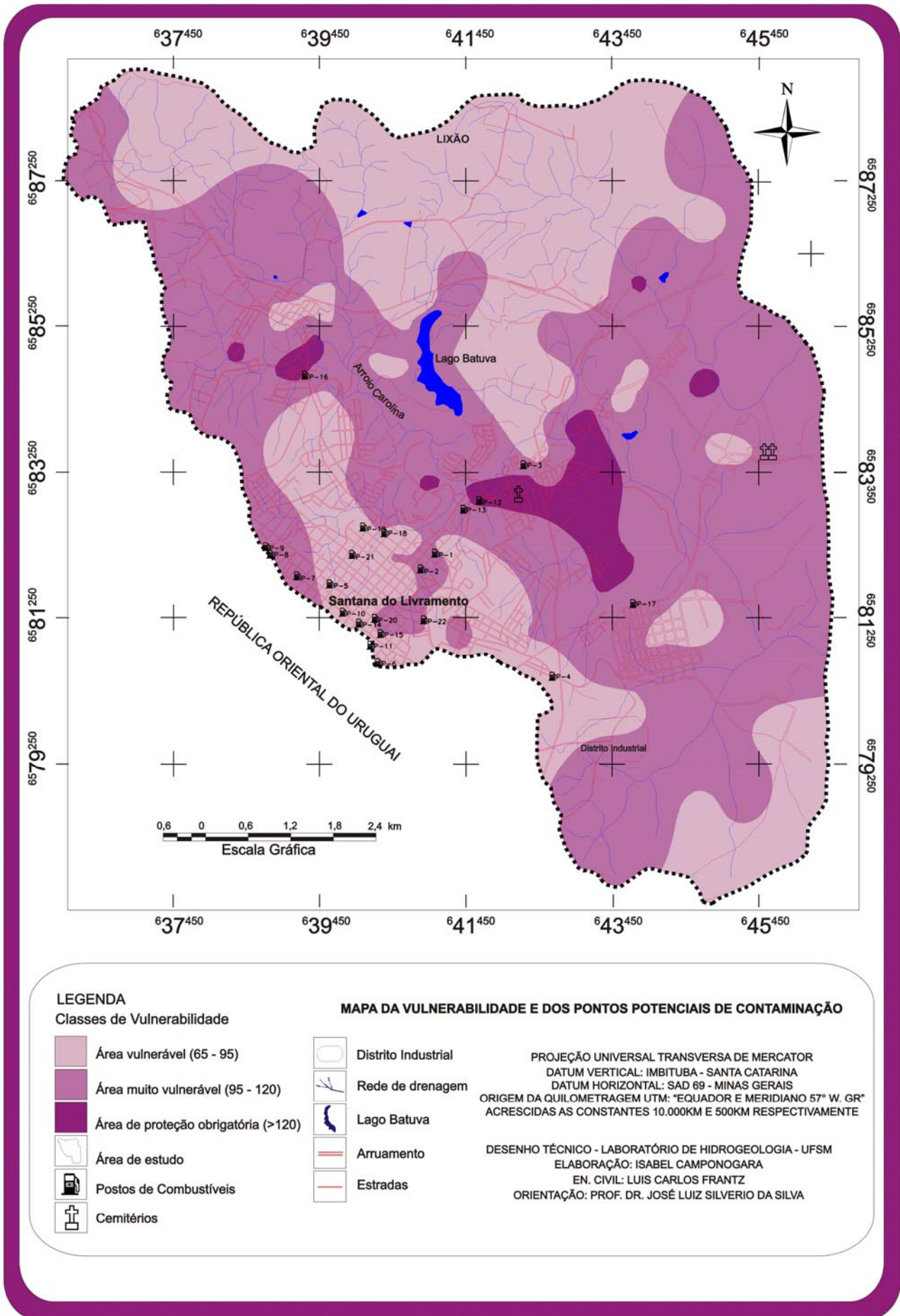


Figura 17 - Mapa da vulnerabilidade com fontes de contaminação

6. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Com o intuito de contribuir para a proteção e gerenciamento ambiental do Sistema Aquífero Guarani, o presente estudo empreendeu aprofundar o conhecimento e a compreensão da vulnerabilidade natural do meio aquífero e o risco de contaminação das águas subterrâneas, principalmente oriunda de postos de combustíveis, cemitérios e lixões, em Santana do Livramento, RS.

A utilização das águas subterrâneas tem se transformado numa alternativa viável na área de estudo, sobretudo porque as águas de superfície são escassas, seja pela sua quantidade ou qualidade. Contudo, para manter o atendimento a esta demanda segura e contínua, são necessárias mais investigações, e assim garantir sua sustentabilidade a futuras gerações.

Neste sentido, esta pesquisa, que se propôs identificar cartograficamente a vulnerabilidade natural dos aquíferos e cadastrar as fontes potenciais de contaminação, vem contribuir para estas investigações que visam à sustentação em equilíbrio dos recursos hídricos subterrâneos.

Por isso, inicialmente, foi realizado um levantamento das informações hidrodinâmicas de 185 poços tubulares e escavados e de fontes. Por meio deste levantamento obtiveram-se as informações que permitiram a execução dos objetivos propostos.

A identificação da vulnerabilidade natural dos aquíferos, obtida por meio do Modelo DRASTIC, o qual relaciona sete fatores referentes ao meio natural, possibilitou a representação cartográfica de três classes de vulnerabilidade (vulnerável, muito vulnerável e extremamente vulnerável). Assim tem-se uma ferramenta de grande importância para a área de estudo, pois se passa agora a conhecer exatamente quais as áreas mais susceptíveis à contaminação. Desse

modo, pode-se eleger as áreas adequadas para locação de poços ou para o desenvolvimento de atividades econômicas com potencial de poluição, e então adotar medidas preventivas para a proteção de possíveis eventos que venham a contaminar os aquíferos ou a expansão urbana evitando desmatamentos. É importante ressaltar a dificuldade de se obter os sete fatores, pois alguns deles necessitam mais pesquisa de campo, e qualquer suplementação aos dados analisados demandaria maior custo e tempo de pesquisa, como é o caso da condutividade hidráulica, que é obtida através de teste de bombeamento em poços ou por ensaios de infiltração. Ainda sobre a necessária expansão desta pesquisa, sugere-se a realização de vários ensaios para os diferentes tipos de litologias, e, na seqüência, adotar-se uma média entre elas, e reduzir-se, assim, a possibilidade de erros.

A utilização de geotecnologias dos SIG, de técnicas de geoestatísticas e cartográficas, bem como das pesquisas de campo, possibilitaram a elaboração dos produtos cartográficos, facilitando a análise, desvendando sua eficácia, pois são potentes ferramentas para planejamento adequado.

As fontes potenciais de contaminação selecionadas para esta pesquisa, como os postos de combustíveis, cemitérios e o lixão, revelam os locais que devem exigir maior atenção do poder público e direcionar pesquisas para recuperação, e mesmo prevenir posteriores eventos de poluição. Pois estas são atividades que podem contaminar o lençol freático e causar danos, tanto ao meio ambiente quanto ao homem. O principal risco de contaminação de fontes de abastecimento de água, bem como dos mananciais subterrâneos, é o necrochorume advindo da decomposição dos cadáveres em cemitérios.

Ressalta-se que, para as áreas próximas aos cemitérios, necessita-se de abastecimento por água, encanada e de qualidade, captada a distância que esteja fora de seus efeitos, em vista das próximas aos cemitérios serem susceptíveis a contaminantes. A implantação de uma adequada política de biossegurança, contemplando procedimentos que propiciem maior controle sanitário nos sepultamentos, com constante monitoramento, pode reduzir ao mínimo o impacto potencial ao meio ambiente.

Contudo, a partir da pesquisa efetivada, fica evidente que a área em estudo apresenta uma estrutura susceptível, principalmente no que se refere ao comportamento litológico, que influencia diretamente no sistema de recarga do

aqüífero, o que pode comprometer a qualidade das águas. O principal fator da real situação de risco a que os recursos hídricos subterrâneos estão submetidos é a disposição de resíduos sólidos, os postos de combustíveis e os cemitérios, nestas áreas. Outras fontes não avaliadas nesta pesquisa são os esgotos *in natura* ou seu vazamento em canalizações. Em muitos casos estas atividades podem modificar a qualidade dos recursos hídricos, e por em risco sua conservação às futuras gerações.

Como sugestão, recomenda-se à área de estudo o aprimoramento e aprofundamento em pesquisas que envolvam análises físico-químicas das águas subterrâneas, da direção dos fluxos subterrâneos, das condições de recarga natural, dos volumes exatos de extrações e dos riscos de contaminação nas áreas de afloramento, para posterior monitoramento, proteção e manejo sustentável desses recursos, em especial o sistema Aqüífero Guarani, tanto pelo Brasil quanto pelo país vizinho, o Uruguai em Rivera.

7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFIAS

ALLER, L., *et al.* **DRASTIC**: a standardized system for evaluating groundwater pollution potencial using hydrogeologic setting. United States: EPA, 1997.

ARAUJO, I. M. *et al.* **Aqüífero gigante do mercosul no Brasil, Argentina, Paraguai e Uruguai**: mapas hidrológicos das formações Botucatu, Pirambóia, Rosário do Sul, Buena Vista, Misiones e Tacuarembó. Curitiba: 1995.

ASMUS, H. E. **Uma Visão Crítica da Metodologia para Levantamento Ambiental costeiro no Brasil**. In: *Encontro Nacional de Estudos Sobre o Meio Ambiente*, Londrina, 1991.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE ÁGUAS SUBTERRÂNEAS – ABAS. Disponível em: < <http://www.abas.org.br> >. Acesso em: 10 out. 2004

BATALHA, B. L. **Glossário de engenharia ambiental**. Brasília: D.N.P.M., 1986.

BERRY, J. K. **Justifiable Interpolation**. GIS World, Feb, 1997, 34p.

BRASIL – **Ministério da Agricultura. Divisão de Pesquisa Pedológica**. Levantamento de reconhecimento de solos do Estado do Rio Grande do Sul. Recife: DPP, 1973.

BURROUGH, P. A.; McDONNELL, R. A. **Principles of geographical information systems: spacial information systems and geostatistics**. Oxford: Clarendon Press, 1998, 333p.

CÂMARA, G., *et al.* **Análise espacial de dados geográficos**. FEIRA E Congresso Internacionais de Geoinformação. São Paulo, 2000.

CEDERSTROM, D. J. **Água Subterrânea, Uma Introdução**. Centro de publicações técnicas aliança, Missão Norte-Americana de Cooperação Econômica e Técnica no Brasil – USAID: Rio de Janeiro, 1964.

COMPANHIA DE PESQUISAS E RECURSOS MINERAIS – CPRM. Disponível em: < <http://www.cprm.gov.br> >. Acesso em: 02 mar 2005.

DANGERMOND, J. What is a Geographic information System (GIS) In: JOHNSON, A .I.; PETTERSSON, C. B.; FULTON, J. L. **Geographic Information Systems (GIS) and Mapping – Practices and Standards**. Philadelphia: ASTM STP 1126, Eds. American Society for Testing and Materials, 1992, p.11-17.

DEUTSCH, C. V. JOURNEL, A. G. **GSLIB: Geostatistical Software Library and User's Guide**. New York: Oxford University Press, 1998, 369 p.

DORST, J. **Antes que a natureza morra: por uma ecologia política**. São Paulo: Edgard Blücher, 1973.

DOYLE, T. M.; GRAY, N. F. **Protocol for monitoring and predicting the impact of acid mine drainage: Designing and setting up a geographical information system (GIS)**. Thecnical Report: 25, Water Technology Research, Trinity College, University of Dublin, Dublin, 1995. 38p.

FELGUEIRAS, C. A.; *et al.* **Inferências e Estimativas de Incertezas Utilizando Técnicas de Krigeagem Não Linear**. In: V CONGRESSO E FEIRA PARA USUÁRIOS DE GEOPROCESSAMENTO DA AMÉRICA LATINA – GIS BRASIL 99, Salvador. [CD-ROM]. *Anais*. 1999.

FOSTER, S. & HIRATA, R. **Determinação do risco de contaminação das águas subterrâneas: um método baseado em dados existentes**. São Paulo: Instituto Geológico, 1993. (Boletim N.º 10).

FOSTER, S. S. D.; HIRATA, R. C. A. **Groundwater pollution risk evaluation: the methodology using available data**. Lima: CEPIS/PAHO/WHO, 1988.

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

GREGORASHUK, J. de los S. **Estudio del uso actual y potencial del acuífero guaraní: enero 2001**. Disponível em: <<http://www.sg-guarani.org.pdf>>. Acesso em: 02 mar 2004.

GUERRA, A. T. & GUERRA, A. J. T. **Novo dicionário geológico-geomorfológico**. Rio de Janeiro: Bertrand Brasil, 1997.

HAUSMAN, A. **Províncias Hidrogeológicas do Rio Grande do Sul**. São Leopoldo/RS: Universidade do Vale do Rio dos Sinos, 1995. 125p.

HEATH, R. C. **Hidrologia básica de águas subterrâneas**, Denver: 1983. 86 p. USGS Paper nº20. Wrege, M. e Potter, P. (Trad.) Instituto de Pesquisas Hidráulicas, UFRGS.

HIRATA, R. & REBOUÇAS, A. **La protección de los recursos hídricos subterráneos: Una visión integrada, basada en perímetro de protección de pozos y vulnerabilidade de acuíferos**. Boletín Geológico y Minero. Instituto Tecnológico GeoMinero de España. v.110. 1999, 79-92p..

HIRATA, R. C. A. & FERREIRA, L. M. R. Os aquíferos da bacia hidrográfica do alto Tietê: disponibilidade hídrica e vulnerabilidade à poluição. **Revista Brasileira de Geociências**, v. 31, n. 1, p. 43-50, 2001.

HIRATA, R. **Mapeamento da vulnerabilidade e risco de poluição das águas subterrâneas no Estado de São Paulo**. São Paulo: Instituto Geológico, CETESB, 2 v. 1997.

HIRATA, R. **Mapeamento da vulnerabilidade e risco de poluição das águas subterrâneas no Estado de São Paulo**. São Paulo: Instituto Geológico, CETESB, 2 v. 1997.

HIRATA, R. **Protección de acuíferos frente a la contaminación: metodología. I seminario-taller**. Toluca, México: 20-22 de Junio de 2001.

IBGE, Instituto Brasileiro de Geografia Estatística. 2001.

IBGE, Instituto Brasileiro de Geografia Estatística. 2003.

KÖPPEN, W. **Climatologia**. México: Fundo da cultura econômica. 1948.

LANNA, A. E. **Gestão dos Recursos Hídricos**. In: *Hidrologia, Ciência e Aplicações*. Porto Alegre: Editora da Universidade, ABRH, EDUSP, 2001. p. 728-768.

LEITE, C. E. S. e MÖBUS, G. **Vulnerabilidade natural à contaminação dos aquíferos da região de rochas sedimentares da bacia do rio Mundaú/Ceará**. X Congresso Brasileiro de Águas Subterrâneas: São Paulo, 9 – 11 de Setembro. 1998, 8p.

LINLEY, R. K. & FRANZINI, J. B. **Engenharia de recursos hídricos**. São Paulo: McGraw-Hill, 1978.

LUFT, C. P. **Minidicionário Luft**. 20^a ed. 5^a impressão. São Paulo, Ática, 2000, 688p.

MANOEL FILHO, J. Contaminação da água subterrânea. In: FEITOSA, F. A. C. & MANOEL FILHO, J. **Hidrologia - conceitos e aplicações**. Fortaleza: CPRM, UFPE, 1997, p. 109-114.

MARCHIORI, J. N. C. **Fitogeografia do Rio grande do Sul: enfoque histórico e sistema de classificação**. Porto Alegre: EST Edições, 2002. 9-49p.

MAZIEIRO, L. **Levantamento da vulnerabilidade dos recursos hídricos subterrâneos no município de Dona Francisca – RS**. Santa Maria/RS. 2002. 125f. Dissertação de Mestrado (Geografia) - Universidade Federal de Santa Maria, 2005.

MOTA, S. **Introdução à engenharia ambiental**. Rio de Janeiro: ABES, 1997.

ODUM, E. P. **Ecologia**. Rio de Janeiro: Guanabara Koogan, 1988.

OSÓRIO, Q. da S. **Vulnerabilidade natural de aquíferos e potencial de poluição das águas subterrâneas. Santa Maria/RS**. 2004. 139f. (Dissertação de Mestrado) - Universidade Federal de Santa Maria, 2004.

OSÓRIO, Q. da S. **Vulnerabilidade natural dos aquíferos e potencial de poluição das águas subterrâneas, na bacia hidrográfica do arroio Arenal, Santa Maria/RS**. 2002. 53f. Monografia (Licenciado em Geografia) - Universidade Federal de Santa Maria, 2002.

PRESOTTO, C. A.; DIAS, A.; KIRCHNER, A.; GARCIA, P. F. **Projeto Hidrogeologia da Fronteira Sudoeste do Rio Grande do Sul**. Relatório Final. Companhia de Pesquisas e Recursos Minerais. Porto Alegre: CPRM, 1973. 263p.

REBOUÇAS, A. C. **Águas Doces no Brasil**. Academia Brasileira de Ciências, Instituto de Estudos Avançados da USP. 2002.

REBOUÇAS, A. C. **Águas Subterrâneas**. Academia Brasileira de Ciências. São Paulo: USP. 1999.

Revista Mensal do Conselho Regional de Engenharia, Arquitetura e Agronomia do Rio Grande do Sul. **Conselho em revista**: Porto Alegre, nº 2, jun. 2005.

RIBEIRA, F. **Calidad, contaminación y protección de acuíferos** in III Curso Hispanoamericano de Hidrología Subterránea. 4 de octubre al 3 de diciembre de 2004, Montevideo-UY.

RICHARDS, J. A. **Remote Sensing Digital Image Analysis**: na introduction, Berlin: Springer-Verlag. 1986.

ROCHA, G. A. **O grande manancial do cone sul**. São Paulo: Estudos Avançados, 1997.

Secretaria de Turismo do Rio Grande do Sul. Disponível em <<http://www.terra gaucha.com.br>>. Acesso em: 27 fev 2005.

SILVA, A. de B. **Sistemas de informações geo-referenciadas**: conceitos e fundamentos. Campinas, SP: Editora da UNICAMP, 2003. 240p.

SILVEIRA, A. L. L. da. **Ciclo hidrológico e bacia hidrográfica**. In: TUCCI, C. E. M. (Org.) Hidrologia: ciência e aplicação. Porto Alegre: Ed. da Universidade, 1993. cap. 2, p. 35-52.

SILVERIO DA SILVA, J. L. *et al.* **Caracterização de áreas de recarga e descarga do Sistema Aqüífero Guarani em Santana/Rivera e Quaraí/Artigas e estudo da vulnerabilidade natural em Quaraí/Artigas**. UFSM/UDeLaR. Santa Maria, 2005. 200p.

SOLANES, M. **Integrated water management water planning and water legislation**. From the perspective of the dublim principles. Technical Advisory committee, Global Water Partnership. Manila, 1997. 9-13 June.

TODD, D. K. **Hidrologia de águas subterrâneas**. São Paulo: Edgard Blücher, 1959.

TUCCI, C. E. M. **Gestão da água no Brasil**. Brasília : UNESCO, 2001.

TUNDISI, J. G. Limnologia e gerenciamento integrado de recursos hídricos: avanços conceituais e metodológicos. **Ciência & Ambiente**, v. 1, n. 21, p. 9-20, 2000.

VIANA, P. C. G. **Aspectos da Gestão do Aquífero Guarani no âmbito do Mercosul**. Universidade Tuiuti do Paraná [S. I.]: Núcleo de Pesquisa em Geografia Aplicada - NPGA. 2003.

VIEIRA, L. S. **Manual da Ciência do Solo**. São Paulo, Ed. Agronômica Ceres, 1975. 464p.

VRBA, J. e ZAPOROZEC, A. **Guidebook on mapping groundwater vulnerability**. Internacional Association of hidrologists – International Contributions to Hydrogeology 16. 1994.

WREGGE, M. **Termos hidrogeológicos básicos**. Disponível em: <http://www.abas.org.br/estudos/hidrogeologia/termos_hidrogeo.htm> Acesso em: 24 maio 2003.

ZINGANO, A. C. **Surfer para Windows –Guia de consulta**. Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Laboratório de Pesquisa Mineral e Planejamento Mineiro. Notas de aula, Curso 2004, 20 p., ilustrado.

ANEXOS

ANEXO 1 – Banco de dados sobre os poços presentes na área de estudo

ANEXO 2 – Banco de dados do modelo DRASTIC