



**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA MARIA  
CENTRO DE CIÊNCIAS RURAIS  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIA DO SOLO**

**USO DA TERRA E CARACTERIZAÇÃO  
HIDROPEDOLÓGICA NA REGIÃO DE VILA KRAMER,  
SÃO FRANCISCO DE ASSIS - RS**

**TESE DE DOUTORADO**

**Gislaine Mocelin Auzani**

**Santa Maria, RS, Brasil**

**2010**

**USO DA TERRA E CARACTERIZAÇÃO HIDROPEDOLÓGICA NA  
REGIÃO DE VILA KRAMER, SÃO FRANCISCO DE ASSIS - RS**

**por**

Gislaine Mocelin Auzani

Tese apresentada ao Curso de Doutorado do Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo, Área de Concentração: Processos Físicos e Morfogenéticos do Solo, da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM), como requisito parcial para obtenção do grau de **Doutora em Ciência do Solo.**

**Orientador: Prof. Dr. Ricardo Simão Diniz Dalmolin**

**Santa Maria, RS, Brasil.**

**2010**

A944u      Auzani, Gislaine Mocelin  
              Uso da terra e caracterização hidropedológica na região de Vila  
              Kramer, São Francisco de Assis, RS / por Gislaine Mocelin Auzani. –  
              2010.  
              129 f. ; il. ; 30 cm

              Orientador: Ricardo Simão Diniz Dalmolin  
              Coorientador: José Luiz Silvério da Silva  
              Tese (doutorado) – Universidade Federal de Santa Maria, Centro  
              de Ciências Rurais, Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo,  
              RS, 2010

              1. Ciência do solo 2. Aptidão agrícola 3. Aquífero 4. Vulnerabilidade  
              natural das águas subterrâneas 5. Sistema de Informação Geográfica  
              (SIG) 6. DRASTIC 7. GOD I. Dalmolin, Ricardo Simão Diniz II. Silva,  
              José Luiz Silvério da III. Título.

              CDU 631.4

Ficha catalográfica elaborada por Cláudia Terezinha Branco Gallotti – CRB 10/1109  
Biblioteca Central UFSM

**Universidade Federal de Santa Maria  
Centro de Ciências Rurais  
Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo**

A Comissão Examinadora, abaixo assinada,  
aprova a Tese de Doutorado

**USO DA TERRA E CARACTERIZAÇÃO HIDROPEDOLÓGICA NA  
REGIÃO DE VILA KRAMER, SÃO FRANCISCO DE ASSIS - RS**

elaborada por  
**Gislaine Mocelin Auzani**

como requisito parcial para obtenção do grau de  
**Doutora em Ciência do Solo**

**Comissão Examinadora:**

**Ricardo Simão Diniz Dalmolin, Dr. (UFSM)**  
(Presidente/Orientador)

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

**Fabício de Araújo Pedron, Dr. (UFSM)**

**Jean Paolo Gomes Minella, Dr. (UFSM)**

**Elsbeth Léia Spode Becker, Dr<sup>a</sup>. (UNIFRA)**

Santa Maria, 31 de agosto de 2010

**“Agradeço todas as dificuldades que enfrentei; não fosse por elas, eu não teria saído do lugar... as facilidades nos impedem de caminhar”.**

**(Chico Xavier)**

Dedico a minha tese...

À minha família, especialmente aos meus pais **Nadir Adão Gindri Auzani** e **Maria de Lourdes Mocelin Auzani**.

## **AGRADECIMENTOS**

No fundo da prática científica existe um discurso que diz: nem tudo é verdadeiro; mas em todo lugar e a todo momento existe uma verdade a ser dita e a ser vista, uma verdade talvez adormecida, mas que no entanto, está à espera de nossa mão para ser desvelada (Foucault).

A pesquisa científica é tarefa social, produto de esforço compartilhado por seres humanos, tanto de modo direto quanto indireto, na forma de contribuições técnicas e/ou sublimes intenções de êxito!!!

Portanto, neste momento deixo algumas palavras a especiais contribuições:

### **Aos professores orientadores...**

Ao professor Dr. Ricardo Simão Diniz Dalmolin, pela sabedoria na orientação das ações necessárias ao trabalho científico.

Ao professor Dr. José Luiz Silvério da Silva, pela generosidade, segurança e competências técnica e humana com que acompanhou os processos de produção e finalização do trabalho empreendido.

Ao professor Dr. Fabrício de Araújo Pedron, pela disponibilidade, cooperação e diálogo a cerca de reflexões teórico-práticas que permearam a construção científica.

### **Aos colegas....**

Aos colegas André Dotto, Isabel Camponogara, Pablo Miguel, Alessandro Samuel, Leonidas Descovi Filho e João Henrique Quoos, obrigada pela disponibilidade e pela prontidão em acompanhar tarefas exigentes.

### **À Instituição franciscana...**

Instituição de Ensino Superior de excelência que promove minha atividade profissional! E que, acima de tudo, acreditou em minha capacidade de aprimoramento! A esta instituição, mantereí minha colaboração na caminhada de crescimento profissional!

## **Aos colegas de Instituição...**

Pela confiança, apoio e otimismo!

## **Aos alunos...**

Por constituírem forte razão de minha trajetória de aperfeiçoamento acadêmico: contribuir ao qualificado processo de formação à docência.

## **Aos familiares...**

Aos meus pais, Nadir Adão Gindri Auzani e Maria de Lourdes Mocelin Auzani, meus grandes e fiéis exemplos de persistência, seriedade, honestidade, justiça, humanismo e fé!

Aos meus irmãos, Gilsani, Gilberto e Gilvana e sobrinhos, Valéria, Maria Leonor e Vitor, doces seres humanos, sempre presentes em meu coração!

## **A uma pessoa especial...**

Ao Fernando, esta pessoa muito especial em minha vida, que surgiu num momento muito importante e decisivo, obrigada por tudo!

## **Aos amigos e amigas...**

Aos meus amigos e às minhas amigas, fraternos acompanhantes na partilha de momentos alegres, de fragilidade, de carinho, de força, de vitórias e de superação!

## **A Deus...**

Pela vida! Pela existência sobre um mundo dotado de possibilidades para atingir a felicidade! Basta segui-Lo em palavras e atitudes!

## RESUMO

Tese de Doutorado  
Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo  
Universidade Federal de Santa Maria, RS, Brasil

### **USO DA TERRA E CARACTERIZAÇÃO HIDROPEDOLÓGICA NA REGIÃO DE VILA KRAMER, SÃO FRANCISCO DE ASSIS - RS**

Autora: Gislaine Mocelin Auzani  
Orientador: Prof. Dr. Ricardo Simão Diniz Dalmolin  
Data e local da defesa: Santa Maria, 31 de agosto de 2010

O conhecimento do meio físico-natural a ser explorado é extremamente importante para o desenvolvimento correto das atividades humanas. O planejamento do uso e ocupação da terra acaba minimizando o impacto ambiental, assim garantindo um ecossistema equilibrado nas suas diversas fases. O manejo incorreto da terra pode trazer perdas consideráveis ao meio ambiente e muitas vezes irreversíveis. O objetivo do trabalho foi avaliar o uso da terra em diferentes épocas, estudar a vulnerabilidade natural dos sistemas aquíferos e analisar os parâmetros físico-químicos das águas subterrâneas na região da Vila Kramer, município de São Francisco de Assis, RS. Foi realizado um levantamento de solos, identificando e caracterizando as diferentes classes de solos que ocorrem na área, utilizando técnicas de geoprocessamento. Foram gerados mapas de solos, geológico, hipsométrico, de declividade, de uso das terras de 1989, 1999 e 2009, de Áreas de Preservação Permanente (APPs), de aptidão agrícola, de adequação de uso e identificadas as áreas de conflito do uso das terras. O recurso usado para estudar a vulnerabilidade natural dos aquíferos (confinado/não confinado) foi a metodologia DRASTIC e GOD. Para caracterizar as águas subterrâneas, fez-se análise de parâmetros físico-químicos em amostras coletadas dos poços. Os resultados mostraram que a floresta nativa apresentou um decréscimo relativo entre 1989 e 2009, onde atualmente corresponde a 26,32% da área. Nas áreas de campo, não houve muita diferença entre 1989 e 1999 nessa classe de uso, sendo que em 2009 ocorreu um aumento de 10,16% em relação à década passada. Esse aumento está relacionado principalmente à diminuição nas áreas utilizadas com culturas. Como resultado, pode-se destacar, em relação à vulnerabilidade natural dos aquíferos da área, que a metodologia DRASTIC variou entre área vulnerável, muito vulnerável e extremamente vulnerável, enquanto que na metodologia GOD variou de insignificante, baixa, média, alta e extrema. As metodologias DRASTIC e GOD proporcionaram a identificação das classes de vulnerabilidade e também as condições naturais dos aquíferos. A partir daí, pode-se ter a utilização dos SIGs, através da elaboração de mapas temáticos que podem ser usados para o gerenciamento de modo sustentável dos recursos hídricos subterrâneos.

**Palavras-chaves:** Aptidão Agrícola, Aquífero, Vulnerabilidade Natural das águas subterrâneas, DRASTIC, GOD, Sistema de Informação Geográfica (SIG).

## ABSTRACT

Doctorate Thesis  
Post-Graduate Program in Soil Sciences  
Federal University of Santa Maria, RS, Brazil

### LAND USE AND HIDROPEDOLOGICAL CHARACTERIZATION IN THE REGION OF VILA KRAMER, SÃO FRANCISCO DE ASSIS - RS

Author: Gislaine Mocelin Auzani  
Advisor: Ricardo Simão Diniz Dalmolin  
Date and Local of the defense: Santa Maria, August 31, 2010

The knowledge about the physical-natural environment to be explored is extremely important for the correct development of human activities. The planning of land use and occupation minimizes the environmental impact, therefore, providing a balanced ecosystem in its different phases. The incorrect use of land can harm considerably the environment, which is many times irreversible. The aim of this work was to evaluate the use of land in different times, to study the natural vulnerability of aquifer systems and to evaluate the physical-chemical parameters of groundwater in the region of Vila Kramer, in the city of São Francisco de Assis, Rio Grande do Sul, State, Southern Brazil. A soil study was made, identifying and characterizing the different soil classes which occur in the area, using geoprocessing techniques. Different soil maps were made, such as: geological, hypsometrical, gradient index, land use in 1989, 1999 and 2009, Permanent Preservation Areas (PPAs), agricultural sustainability, and adaptation of the soil use. There was also an identification of the areas with land use conflict. The tool used to study the natural vulnerability of aquifers (confined/not confined) was the DRASTIC and GOD methodology. In order to characterize the groundwater, an analysis of physical and chemical parameters was made using the water collected from the wells. The results showed that the natural forest cover presented a significant decrease between 1989 and 2009, which corresponds for 26.32% of the area. In the areas without forest there was not much difference between 1989 and 1999 considering this class of use. In 2009 there was an increase of 10.16% compared to the past decade. This increase is related mainly to the decrease in the areas used with crops. As a result we can highlight, in relation to the natural vulnerability of the aquifer area, that, the DRASTIC methodology ranged between vulnerable, high vulnerable, and extremely vulnerable area, while in the GOD methodology it ranged between negligible, low moderate, high and extreme. The DRASTIC and GOD methodologies provided approaches to identification of the vulnerability of the areas and the natural conditions of the aquifers, as well. From this point, it is possible to have the use of GIS, through the delineation of theme maps, which can be used to sustainably manage the hydric groundwaters resources.

**Key words:** Agricultural Sustainability, Aquifer, Natural Vulnerability Groundwater, DRASTIC, GOD, Geographic Information System (GIS).

# SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO</b> .....	11
<b>1.1 Hipóteses</b> .....	13
<b>1.2 Objetivo Geral</b> .....	13
<b>1.3 Objetivos Específicos</b> .....	13
<b>2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b> .....	15
<b>2.1 Uso da terra</b> .....	15
<b>2.2 Caracterização dos sistemas de informação geográfica (SIG)</b> .....	16
<b>2.3 Água e ciclo hidrológico</b> .....	18
<b>2.4 Recursos hídricos subterrâneos e sua distribuição vertical: zona insaturada e zona saturada</b> .....	20
<b>2.5 Utilização e contaminação dos aquíferos</b> .....	22
<b>2.6 Vulnerabilidade natural dos aquíferos à contaminação</b> .....	23
<b>2.7 Metodologia DRASTIC e GOD</b> .....	25
<b>3 MATERIAL E MÉTODOS</b> .....	30
<b>3.1 Caracterização da área de estudo</b> .....	30
<b>3.2 Mapa Geológico</b> .....	33
<b>3.3 Mapa de Solos</b> .....	35
<b>3.4 Mapa Clinográfico</b> .....	40
<b>3.5 Mapa de Uso da Terra</b> .....	41
<b>3.6 Mapa de Áreas de Preservação Permanente (APPs)</b> .....	42
<b>3.7 Mapa de Aptidão Agrícola das Terras</b> .....	42
<b>3.8 Mapa de Adequação do Uso das Terras</b> .....	43
<b>3.9 Mapa dos Conflitos de Uso das Terras</b> .....	43
<b>3.10 Análises Estatísticas</b> .....	44
<b>3.11 Cadastro dos Poços Escavados e Tubulares</b> .....	44
<b>3.12 Mapa da Variação do Nível Estático dos Poços Escavados e Tubulares</b> ..	46
<b>3.13 Mapa da Vulnerabilidade do aquífero à Contaminação</b> .....	46
3.13.1 Metodologia DRASTIC .....	46
3.13.2 DRASTIC - Análise dos dados .....	51

3.13.3 Metodologia GOD.....	52
<b>3.14 Análise de parâmetros físico-químicos das águas subterrâneas.....</b>	<b>53</b>
<b>4 RESULTADOS E DISCUSSÃO .....</b>	<b>55</b>
<b>4.1 Mapa Hipsométrico e Clinográfico .....</b>	<b>55</b>
<b>4.2 Evolução do Uso das Terras .....</b>	<b>60</b>
<b>4.3 Áreas de Preservação Permanente (APPs).....</b>	<b>66</b>
<b>4.4 Aptidão Agrícola das Terras.....</b>	<b>69</b>
<b>4.5 Adequação do Uso das Terras.....</b>	<b>73</b>
<b>4.6 Conflitos de Uso das Terras.....</b>	<b>75</b>
<b>4.7 Estudo da Vulnerabilidade Natural dos Aquíferos à contaminação (DRASTIC).....</b>	<b>80</b>
<b>4.8 Análise estatística dos dados analisados pela metodologia DRASTIC.....</b>	<b>99</b>
<b>4.9 Análise de regressão linear.....</b>	<b>100</b>
<b>4.10 Análise de agrupamento.....</b>	<b>102</b>
<b>4.11 Estudo da Vulnerabilidade Natural dos Aquíferos à contaminação (GOD).....</b>	<b>105</b>
<b>4.12 Comparação entre as metodologias DRASTIC e GOD.....</b>	<b>109</b>
<b>4.13 Avaliação dos parâmetros físico-químicos das águas subterrâneas.....</b>	<b>110</b>
<b>5 CONCLUSÃO .....</b>	<b>116</b>
<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....</b>	<b>118</b>
<b>ANEXOS .....</b>	<b>125</b>

# 1 INTRODUÇÃO

O conhecimento do meio físico-natural a ser explorado é de grande importância para o desenvolvimento correto das atividades humanas. Planejar a ocupação e o uso da terra minimiza o impacto ambiental, assim garantindo um ecossistema equilibrado e obtendo nas suas diversas fases um desenvolvimento eficaz e correto. De acordo com Azevedo e Dalmolin (2006), o solo é a fonte mais básica e primordial de sustento da humanidade. Por isso, o manejo incorreto da terra pode trazer perdas consideráveis ao solo e ao ambiente e, muitas vezes, irreversíveis ao ecossistema, degradando ambientes naturais e, com isso, afetando diretamente a economia de uma determinada região.

O uso e a ocupação da terra referem-se a todas as atividades desenvolvidas em um determinado espaço geográfico, a partir das alterações provocadas na paisagem pelas atividades humano-econômicas. As diferentes classes de uso e manejo acabam, muitas vezes, alterando os processos físicos, químicos e biológicos dos recursos naturais como o solo e a água, podendo levar à degradação dos mesmos. O solo, como a água, é um recurso vital para a humanidade, mas geralmente esse recurso é mal avaliado (ARAUJO et al., 2005).

O conhecimento atual dos aspectos físico-naturais e ambientais contribui para futuros prognósticos, analisando e avaliando os recursos naturais, proporcionando dados referentes à sua capacidade de uso e produção, ou melhoramentos de áreas pouco favoráveis ao uso e à ocupação das terras. A utilização agrícola das terras de um modo sustentável requer o conhecimento de suas características, como níveis de fertilidade do solo, deficiência ou excesso de água, suscetibilidade à erosão do solo e restrições a práticas agrícolas que envolvem mecanização, permitindo avaliar, cientificamente, sua real capacidade de suporte de manejo adequado. Este procedimento tem por finalidade prolongar ou mesmo aumentar o potencial produtivo das terras e também preservar e conservar os tais recursos (MIGUEL, 2010).

Atualmente, as técnicas empregadas pelos Sistemas de Informações Geográficas (SIGs) têm uma gama de aplicação no campo do mapeamento, principalmente no que se refere à evolução espaço temporal do uso da terra, proporcionando um diagnóstico eficiente e rápido dos principais usos e ocupação de

uma determinada área. Conforme Rocha e Seer (2008), a utilização dos recursos computacionais para compreender e avaliar a transformação dos ambientes tem se expandido em função da eficiência dos SIGs em produzir resultados confiáveis, em um tempo muito menor, quando comparado a outras metodologias.

As atividades de uso e ocupação da terra de maneira incorreta podem alterar o regime e a qualidade de ecossistemas subterrâneos, prejudicando a potabilidade da mesma, principalmente nos poços escavados devido à falta de proteção. Conforme Lopes et al. (2008), os recursos hídricos subterrâneos representam fonte estratégica de grande valia e com forte alcance social para sobrevivência e fixação do homem no campo.

A qualidade das águas subterrâneas pode ser afetada pelas condições de uso e ocupação das terras e também de outros fatores como: a declividade do terreno, a geologia, o tipo de solo, a cobertura vegetal, entre outros. Existem diferentes metodologias que são utilizadas para avaliar a vulnerabilidade natural das águas subterrâneas, entre elas a metodologia DRASTIC (ALLER et al., 1987) e o método GOD (FOSTER et al., 2006).

A área escolhida para a realização desse trabalho abrange a carta topográfica Vila Kramer, município de São Francisco de Assis, Rio Grande do Sul (RS). Levou-se em consideração a diversidade da área em função dos aspectos geológicos, diferentes classes de solos e diferentes usos da terra. Para tanto, foi realizada análise de imagens de satélite em diferentes épocas (1989, 1999 e 2009) e estudo dos conflitos de uso em cada época, utilizando um SIG. Também foram elaborados os mapas de solos, de áreas de preservação permanente e de aptidão agrícola para a geração do mapa de adequação do uso das terras. Além disso, foram aplicadas as metodologias DRASTIC e GOD para o estabelecimento de índices de vulnerabilidade natural à contaminação das águas. Também nesse trabalho houve a avaliação dos parâmetros físico-químicos das águas subterrâneas de vinte e dois poços escavados e tubulares localizados na área de estudos.

## **1.1 Hipóteses**

- (i) diferentes usos e ocupação da terra, em escala espaço/tempo, favorecem determinados riscos ambientais como pode ter alguma alteração da qualidade das águas subterrâneas.
- (ii) a vulnerabilidade natural dos aquíferos aumenta devido ao mau uso e ocupação da terra, facilitando à contaminação da água subterrânea. A vulnerabilidade dos aquíferos pode ser estimada utilizando informações da geologia e características do solo.
- (iii) os parâmetros físico-químicos das águas subterrâneas e sua qualidade podem estar relacionados as unidades geológicas, dos solos e do uso da terra.

## **1.2 Objetivo Geral**

O objetivo geral do trabalho foi avaliar o uso da terra em diferentes épocas, estudar a vulnerabilidade natural dos sistemas aquíferos e analisar os parâmetros físico-químicos das águas subterrâneas na área que abrange a carta topográfica Vila Kramer, município de São Francisco de Assis, RS.

## **1.3 Objetivos Específicos**

Este trabalho possui os seguintes objetivos específicos:

- (i) Avaliar a evolução do uso e da ocupação da terra, através de imagens de satélites em diferentes épocas (1989, 1999 e 2009) e estudo dos conflitos de uso em cada época, utilizando técnicas de Geoprocessamento e SIG;
- (ii) Elaborar o mapa de adequação do uso das terras, a partir do mapa de solos, mapa de declividades, mapa de áreas de preservação permanente

e mapa de aptidão agrícola das terras, utilizando técnicas de geoprocessamento.

- (iii) Aplicar a metodologia DRASTIC e GOD para identificar a vulnerabilidade natural dos aquíferos à contaminação;
- (iv) Comparar as metodologias DRASTIC e GOD para avaliar a vulnerabilidade natural dos aquíferos à contaminação;
- (v) Avaliar os valores atribuídos na metodologia DRASTIC buscando-se identificar correlações estatísticas na área do estudo.
- (vi) Analisar os parâmetros físico-químicos das águas subterrâneas e sua qualidade em função da legislação específica.

## **2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA**

### **2.1 Uso da terra**

Na superfície da terra são desenvolvidas todas as atividades antrópicas, as quais apresentam grandes impactos ao solo. O solo, por estar em equilíbrio dinâmico com os fatores que determinam as suas características, poderá apresentar reações diversas, dependendo da intensidade das mudanças e da sensibilidade do solo em suportar cada tipo de tensão (DREW, 2002).

O uso e a ocupação da terra dependem da utilização adequada de técnicas de manejo que garantam a sustentabilidade do sistema. O manejo inadequado e o uso incorreto das terras sem o conhecimento e planejamento ambiental dos recursos naturais podem ocasionar perdas significativas e irreversíveis ao meio ambiente. Conforme Auzani (2003), o uso e a ocupação da terra estiveram ligados a práticas inadequadas para com meio ambiente. O desconhecimento e o uso de técnicas incorretas de manejo da terra deixam o meio ambiente comprometido no que se refere à sua utilização; a ação homem acaba afetando sua diversidade, a cobertura vegetal e, muitas vezes, a sua recuperação se torna inviável.

O levantamento e o conhecimento do uso da terra são uma tarefa indispensável para os estudos relacionados às análises físico-naturais, pois visam a contribuir para a busca de soluções a fim de amenizar os impactos e propor soluções para melhoramentos de áreas improdutivas e/ou mal planejadas.

Trabalhos de Lepsch et al. (1991); Miguel (2010) enfatizam que, para conseguir estabelecer o melhor uso da terra, deve se conhecer o solo e o meio onde ele se encontra, através de informações pré-existentes, obtidas por levantamentos realizados na área de estudo. Um sistema de vocação de uso das terras define principalmente como estas podem ser utilizadas para que ocorra o mínimo de impacto ambiental.

O uso agrícola das terras exige um planejamento e monitoramento de forma a garantir a adequação ao potencial das terras utilizadas, definido em função de suas

limitações, e a execução de práticas de manejo que minimizem os impactos resultantes (NASCIMENTO et al., 2004).

Entretanto, o uso da terra para a prática agrícola intensificou e tem modificado a paisagem, provocando a desestruturação das propriedades do solo e o esgotamento de sua capacidade produtiva, além de erosão e contaminação pelo uso excessiva de produtos químicos. Segundo Araujo et al. (2005), um conjunto de práticas inadequadas está relacionado com a extensão de terras, sendo o principal problema da expansão gradual do cultivo para áreas de encostas e, geralmente, para áreas ditas marginais.

Para que os riscos de degradação das terras sejam reduzidos, é necessário utilizar técnicas que identifiquem as atividades mais rentáveis para a região, sendo elas capazes de possibilitar uma convivência harmoniosa entre homem e ambiente. Devem, ainda, garantir a implantação e o desenvolvimento de alternativas ecologicamente favoráveis, economicamente viáveis e ambientalmente sustentáveis para exploração agrícola e pecuária (SOUSA et al., 2007).

Entretanto, deve-se planejar um ordenamento que acompanhe a dinâmica de uso e ocupação da terra e, respectivamente, avaliar e analisar a sua evolução espaço-tempo. Estes são fatores primordiais no grau de influência antrópica, bem como no planejamento ambiental da utilização dos recursos físico-naturais, os quais podem influenciar na qualidade da água dos aquíferos. O Sistema Aquífero Guarani (SAG), por exemplo, é citado por Wendland et al. (2007) como de grande importância estratégica, social e econômica para a Argentina, Uruguai, Paraguai e o Brasil. Existe, portanto, a necessidade de ordenação do uso adequado desse recurso hídrico. Um dos pontos relevantes para a boa gestão do SAG é a promoção de estudos hidrológicos visando à determinação das taxas de recarga do sistema. Na área do estudo ocorrem afloramentos do SAG em sua área de recarga direta a partir de precipitações pluviométricas.

## **2.2 Caracterização dos Sistemas de Informação Geográfica (SIG)**

A utilização do Geoprocessamento e de SIG vem crescendo no que se refere às técnicas adequadas para monitorar, planejar e ordenar áreas rurais e urbanas,

proporcionando um diagnóstico rápido e atualizado dos principais usos e ocupações da terra de um determinado espaço geográfico. Rauber (2008) diz que o geoprocessamento pode ser entendido como sendo a utilização de técnicas matemáticas e computacionais para tratar dados obtidos de objetos ou fenômenos geograficamente identificados ou extrair informações desses objetos ou fenômenos, quando eles são observados por um sistema sensor.

O SIG constitui-se de uma tecnologia eficiente para análise, avaliação e investigação da superfície terrestre. Pode ser utilizado em estudos relacionados com o espaço geográfico, meio ambiente, geologia, geomorfologia e outras áreas diretamente ligadas à ciência da terra. A finalidade do SIG é servir de ferramenta para todas as áreas do conhecimento, pois é uma metodologia que agrega dados, possibilita a coleta, o armazenamento e o processamento de imagens, a partir de dados georreferenciados, para obter informações atuais e precisas. Auzani (2003) relata que o SIG permite a entrada de dados de diferentes fontes e gera novos tipos de informações, visando à segurança, à confiabilidade, à facilidade de uso, à agilidade nas atividades humanas referentes ao monitoramento, ao planejamento e à tomada de decisões relativas ao espaço físico geográfico.

Para Meneses et al. (2009), a popularização da tecnologia dos SIGs tem possibilitado o surgimento de diversos *softwares*, cada um com seus potenciais e limitações, os quais devem ser utilizados com base em critérios técnicos, uma vez que, como em qualquer sistema computacional, os resultados obtidos pelos processamentos dependem estritamente da qualidade dos dados inseridos nos mesmos e da interpretação que se aplica aos mesmos.

Nesse sentido, essas tecnologias auxiliam e fornecem dados referentes à quantificação das diversas formas de uso e ocupação da superfície da terra, pois permitem fazer cálculos de áreas, análises e avaliação dos processos de uso e ocupação da terra. Florenzano (2002) diz que as imagens de sensores remotos têm um grande potencial no estudo do uso da terra de ambientes rurais. A partir da interpretação dessas imagens, pode-se identificar o tipo de uso, a área ocupada com cada tipo de uso, obter uma estimativa de área plantada e da produção agrícola, além de informações sobre o vigor vegetativo das culturas, porque a energia refletida pelas culturas muda quando elas são submetidas a estresse hídrico decorrente de seca, ou ainda quando sofrem agressões por geada, granizo, ataques de pragas, etc. Rocha e Seer (2008) relatam que a interpretação das imagens de

satélite associada a outros tipos de dados oriundos de mapas, de laboratórios e de campo, quando integrados a um SIG, permite elaborar mapas, calcular áreas, construir tabelas e gráficos, obtendo grande precisão na avaliação de um determinado espaço.

Portanto, através da tecnologia SIG, pode-se obter uma série de dados e informações e avaliar o uso e a ocupação de terras, em diferentes épocas, tendo em vista a sua rapidez e eficiência nos resultados obtidos.

### **2.3 Água e ciclo hidrológico**

A água é considerada a substância mais abundante na superfície do planeta, participando dos seus processos modeladores pela dissolução de materiais terrestres e do transporte de partículas (TEIXEIRA et al., 2000). A água é um recurso natural indispensável à vida na terra e à manutenção dos ecossistemas. Conforme Tundisi (2005), água é um recurso natural, distribuído desigualmente pela superfície e aquíferos do planeta, sendo que sua disponibilidade, uso e gerenciamento adequado são fundamentais para o futuro da humanidade.

Os recursos hídricos superficiais e subsuperficiais distribuem-se de acordo com o ciclo hidrológico. De acordo com Tundisi (2005), o ciclo hidrológico é impulsionado pela energia da radiação solar, pela ação dos ventos, pela interação dos oceanos com a atmosfera e pela evaporação a partir das massas de águas continentais e oceânicas. O ciclo global da água, por um lado, depende das fontes naturais de energia e, por outro, tem considerável influência no balanço de energia da atmosfera e na superfície dos continentes. Para Heath (1983), o termo “ciclo hidrológico” refere-se ao constante movimento da água sobre, na e sob a superfície terrestre.

A descrição do ciclo hidrológico começa com o vapor de água presente na atmosfera que, sob determinadas condições meteorológicas, condensa-se, formando microgotículas de água que se mantêm suspensas no ar devido à turbulência natural (SILVEIRA, 2002). A precipitação na forma de chuva, neve ou granizo, ao atingir o solo, pode sofrer evaporação em ambientes quentes e secos e retornar à atmosfera. Mas, se a chuva cair sobre um solo com cobertura vegetal, parte do volume é retida

pela vegetação, pelo processo de interceptação, que pode ser definida, conforme Silva e Righes (2009), como o processo pelo qual a água da chuva é temporariamente retida pelas copas de árvores, sendo subsequentemente redistribuída em: água que chega ao solo; água que escoar pelo tronco e água que retorna à atmosfera por evaporação. Segundo Fiorin (2008), a cobertura e os tipos de uso do solo, além de seus efeitos sobre as condições de infiltração da água no solo, exercem importante influência na interceptação da água advinda da precipitação. Ao atingir o solo descoberto, a gota da chuva promove a formação de uma microcratera compactada que pode ser de até quatro vezes o tamanho da gota, diminuindo com isso a infiltração da água no solo. Para Silveira (2002), a água que atinge o solo segue diversos caminhos. Como o solo é um meio poroso, há infiltração de toda a precipitação que chega ao solo, enquanto a superfície do solo não satura. A partir do momento da saturação superficial, à medida que o solo vai sendo saturado a maiores profundidades, a infiltração decresce até uma taxa residual, com o excesso não-infiltrado da precipitação gerando escoamento superficial.

De acordo com Guerra (1998), a água da chuva que chega ao solo pode ser armazenada em pequenas depressões ou se infiltra, aumentando a umidade do solo, e abastece o lençol freático. A infiltração é o processo mais importante de recarga de água no subsolo. O volume e a velocidade de infiltração dependem de vários fatores (TEIXEIRA et al., 2000). O tipo de material de cobertura da superfície do solo é um dos fatores determinantes no processo de infiltração de água no solo. Materiais porosos e permeáveis, como solo, sedimentos arenosos e inconsolidados, rocha fraturada e porosa, entre outros, apresentam maiores taxas de infiltração de água no solo. A infiltração é o movimento da água no interior do solo. Os solos definem o volume e a quantidade de água que infiltra e/ou que excede, ocasionando o escoamento superficial. Heath (1983) diz que a primeira infiltração repõe a umidade do solo e, após, o excesso percola lentamente através da zona não saturada até atingir a zona de saturação. Nesta última, move-se descendente e lateralmente ao local de descarga de água subterrânea, tais como fontes nas encostas ou como surgências sob os rios, lagos e oceano.

As propriedades hidráulicas do solo têm um papel fundamental no transporte e armazenamento de água no solo. A água que não infiltra acaba escoando superficialmente ou armazenada em depressões que infiltrará ou evaporará. De acordo com Silveira (2002), o escoamento superficial é impulsionado pela gravidade

para as cotas mais baixas, vencendo principalmente o atrito com a superfície do solo. Manifesta-se inicialmente na forma de pequenos filetes de água que se moldam ao microrrelevo do solo.

## **2.4 Recursos hídricos subterrâneos e sua distribuição vertical: zona insaturada e zona saturada**

A água subterrânea é aquela que se encontra abaixo da superfície da terra, preenchendo todos os espaços, poros e/ou vazios das rochas sedimentares, como também fraturas, fissuras e diáclases das rochas coerentes. A água subterrânea corresponde a um compartimento do ciclo hidrológico e contribui para a recarga das nascentes, rios, córregos, entre outros. A origem da água em subsuperfície pode ter várias origens, destacamos: as de infiltração e a água livre ou gravitacional. De acordo com Maciel Filho (2008), a água de infiltração é originada pela infiltração da água das chuvas (águas meteóricas). E, a água livre ou gravitacional é aquela que não consegue mais ser retida pelos grãos sólidos e circula no solo conforme as leis de gravidade.

Conforme Melo et al. (2006), a recarga das águas subterrâneas pode ser definida no senso geral como o fluxo d'água descendente que alcança o nível d'água de um aquífero livre, formando uma reserva de água adicional para as águas subterrâneas.

Os recursos hídricos subterrâneos ocorrem em duas porções distintas do terreno. A primeira é a zona não saturada, também denominada insaturada, de aeração ou zona vadosa; a segunda é a zona saturada ou zona de saturação (VOGEL, 2008). Na zona de saturação todos os interstícios estão preenchidos com água sob pressão hidrostática. A zona de aeração consiste de interstícios parcialmente ocupados por água e parcialmente por ar (MACIEL FILHO, 2008).

O nível freático é o limite superior da zona saturada ou do lençol de água subterrâneo. Acima do nível freático encontra-se uma faixa de umidade, que resulta da ação da força capilar (zona não saturada) e adsorção. A zona saturada é a que dá origem às captações por poços e às nascentes. A água que recarrega a zona saturada provém da zona não saturada e pode muitas vezes sofrer elevação do

lençol freático devido ao aumento do volume de água infiltrada. Para Camponogara (2006), as águas subterrâneas encontram-se em constante movimento abaixo do nível do solo, variando no tempo e no espaço dependendo diretamente do tipo de formação rochosa atravessada. Este movimento da água está ligado à permeabilidade das rochas e dos solos.

A ocorrência de uma camada de menor permeabilidade da água no perfil do solo limita a capacidade de ele ser infiltrado. O perfil do solo apresentará uma capacidade de infiltração igual à permeabilidade da camada limitante. Essa camada de impedimento poderá ser tanto arenosa como argilosa, dependendo da condição inicial de umidade do solo. Uma camada argilosa limita a infiltração em condições de saturação do solo enquanto uma camada arenosa limita a infiltração em condições não saturadas do perfil (CARLESSO & ZIMMERMANN, 2000; FIORIN, 2008). Em relação à textura dos solos Streck et al. (2008) coloca que, nos com textura uniformes a taxa de infiltração da água é geralmente maior nos solos arenosos em comparação aos argilosos.

A composição do solo, segundo (AZEVEDO et al., 2007; STÜRMER, 2008) pode influir na taxa de infiltração e na capacidade de retenção da água. Nos arenosos, ocorre infiltração mais rápida e há pouca retenção da água devido ao espaço poroso (predomínio de macroporos), que permite a drenagem livre da água do solo. Esses são solos que retêm pouca água. Nos argilosos, geralmente a infiltração é mais lenta e existe maior retenção de água no solo devido à presença dos microporos que retêm a água contra a força da gravidade. Isto reduz o espaço poroso e limita o movimento do ar e da água através do solo.

A Resolução nº 15/2001, art. 1, do Conselho Nacional de Recursos Hídricos (CNRH), considera o aquífero um corpo hidrogeológico com capacidade de acumular e transmitir água através dos seus poros, fissuras ou espaços resultantes da dissolução e carreamento de materiais rochosos.

Segundo Press et al. (2006), a água subterrânea pode fluir em aquíferos não-confinados ou confinados. Em aquíferos não-confinados, a água percola através de camadas de permeabilidade mais ou menos uniforme, que se estendem até a superfície, tanto em áreas de descarga como de recarga. Muitos aquíferos permeáveis, tipicamente de arenitos, são conectados acima e abaixo por camadas de baixa permeabilidade, como folhelhos. Essas camadas relativamente impermeáveis são aquiocludes e a água subterrânea não pode percolá-los ou o faz

muito lentamente. Quando os aquícludes situam-se tanto sobrepostos como sotopostos a um aquífero, forma-se um aquífero confinado.

Para os aquíferos da região central do Estado do Rio Grande do Sul, Silvério da Silva et al. (2004) consideraram dois tipos: 1) Os aquíferos porosos intergranulares constituídos por rochas sedimentares arenosas como a Formação Botucatu ou a Formação Rosário do Sul. 2) Os aquíferos cristalinos fissurais associados aos derrames de rochas vulcânicas pertencentes à Formação Serra Geral.

## **2.5 Utilização e contaminação dos aquíferos**

A água infiltrada e armazenada no solo é utilizada na absorção das plantas, podendo também ser evaporada. De acordo com Coelho Netto (1998), a água que não retorna à atmosfera recarrega o reservatório de água subsuperficial ou subterrânea e daí converge muito lentamente para as correntes de fluxos. Em solos com boa infiltração, o fluxo d'água subterrâneo pode alimentar os canais abertos (ou rios). Estes reservatórios subsuperficial e subterrâneo constituem fontes de água muito importantes para atender ao abastecimento doméstico, às demandas de atividades urbanas, industriais ou agrícolas.

Tundisi (2005) relata que a deterioração dos mananciais e do suprimento de água é resultado do constante aumento no volume de água utilizado para diversas finalidades e do aumento da poluição e da contaminação hídrica. Esses impactos, do ponto de vista quali e quantitativo, têm custos econômicos elevados na recuperação dos mananciais e fontes de abastecimento, lagos e represas.

A contaminação nos aquíferos pode ocorrer de várias maneiras, seja pelas atividades econômicas ou pelo uso indiscriminado decorrente do crescimento populacional. Dependendo do tipo de contaminante, este poderá ser persistente, contaminando a reserva de água subterrânea, ocasionando muitos danos e efeitos negativos ao meio. Segundo as palavras de Coelho Netto (1998), a retirada em excesso de água subterrânea ou a contaminação por elementos poluentes pode causar grandes danos ecológicos e, por isso, sua utilização deve ser regulamentada. De acordo com Leitão et al. (2003), um poluente depositado à superfície do solo

pode ser lixiviado para zonas mais profundas através de processos de recarga natural ou artificial até atingir um aquífero.

O solo participa ativamente da atenuação de muitos contaminantes da água subterrânea. O processo de atenuação continua em menor grau na zona não-saturada, especialmente onde sedimentos não consolidados, em oposição a rochas fraturadas (pouco reativas), estão presentes. Tanto o solo como a zona não saturada são a primeira linha de defesa natural contra a poluição da água subterrânea (TEIXEIRA et al., 2000).

Em relação à poluição de aquíferos, Foster et al. (2006) destacam os seguintes fatores como sendo os principais na degradação da qualidade das águas subterrâneas: aumento nas práticas de disposição dos efluentes domésticos e industriais sobre os solos em larga escala, como resultado dos elevados custos de tratamento ou eliminação dos resíduos líquidos; aumento e diversificação de produtos químicos, potencialmente contaminantes das águas subterrâneas, gerados por efluentes industriais e agrícolas; uso maciço de fertilizantes e pesticidas na agricultura; dificuldades técnicas e econômicas de recuperação de aquíferos contaminados; toxicologia pouco conhecida de contaminantes potencialmente nocivos à saúde; dificuldade e impraticabilidade de localização/identificação de poços abandonados que podem servir como entrada de poluentes.

A qualidade da água de superfície pode ser determinada pelas respostas hidrológicas que variam geograficamente. As zonas insaturada e saturada, entretanto, tem uma influência primária no movimento da água subterrânea e, portanto, na migração de poluente para a água de subsuperfície (RAHMAN, 2007).

## **2.6 Vulnerabilidade natural dos aquíferos à contaminação**

O conceito de vulnerabilidade do aquífero deriva da suposição de que o ambiente físico pode fornecer algum grau de proteção da água subterrânea contra os impactos humanos, especialmente em relação aos poluentes entrando na subsuperfície (ROBINS et al., 2007).

Conforme Leitão et al. (2003), a vulnerabilidade de um aquífero depende também do tipo de poluente. Por exemplo, a qualidade da água subterrânea pode

ser muito vulnerável a uma carga de nitratos, originada por práticas agrícolas incorretas e, no entanto, ser pouco vulnerável a cargas patogênicas. Levando-se em consideração esta realidade, é cientificamente preferível avaliar a vulnerabilidade em relação a casos específicos de poluição, como o uso de pesticidas, nutrientes, materiais de origem orgânica, metais pesados, entre outros.

A vulnerabilidade de poluição do aquífero se refere à características intrínsecas que determinam se ele será afetado adversamente por um carregamento de poluente. A avaliação da vulnerabilidade é feita com base no tempo de percurso da superfície do solo ao nível do lençol de água, sendo que, quanto maior o tempo de percurso, maior o potencial de atenuação do poluente (ROBINS et al., 2007).

A avaliação da vulnerabilidade de um aquífero à contaminação tem sido determinada pelo mapeamento de áreas mais suscetíveis a isso, para que as atividades humano-econômicas não afetem o meio. Conforme Camponogara (2006), 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. Babiker et al. (2005) enfatiza que a avaliação da vulnerabilidade para delinear (espacializar) áreas que são mais suscetíveis à contaminação a partir de fontes antropogênicas tornou-se um importante “elemento” para o manejo de recursos naturais e planejamento do uso do solo. Os autores ainda ressaltam que o uso combinado do modelo DRASTIC e SIG como sendo um método efetivo na avaliação do risco de poluição de águas subterrâneas.

Nos estudos realizados por Rahman (2007), a tecnologia SIG foi uma ferramenta eficiente para avaliação e análise da vulnerabilidade da poluição da água subterrânea. Segundo Robins et al. (2007), o objetivo de definir e mapear a vulnerabilidade do aquífero é ajudar os planejadores a proteger a água subterrânea como um recurso econômico essencial e agir como uma fundação para a designação de zonas de proteção.

Assim, conforme Meneses et al. (2009), o mapeamento da vulnerabilidade de aquíferos apresenta-se útil na medida em que pode auxiliar na alocação de recursos e na priorização das diversas atividades de monitoramento ambiental. Pode-se, por exemplo, através da utilização de mapas de vulnerabilidade, definir áreas onde o monitoramento deva ser executado de maneira mais intensa, bem como auxiliar no planejamento de práticas conservacionistas, visando à definição de áreas que devam

ser protegidas de modo a garantir a integridade do aquífero em termos de qualidade de água.

## **2.7 Metodologia DRASTIC e GOD**

Dentre os vários métodos que podem ser utilizados para avaliar a vulnerabilidade natural dos aquíferos, destacam-se o modelo DRASTIC, proposto por Aller et al. (1987), e o modelo GOD, proposto por Foster et al. (2006).

O modelo DRASTIC constitui um sistema padronizado de avaliação das classes de vulnerabilidade natural do tipo de aquíferos (confinado/não confinado) a partir de dados decodificados em planos de informações, como características litológicas e texturais das camadas sobrejacentes ao aquífero, a profundidade da água em relação à superfície e o impacto da zona não-saturada. O modelo DRASTIC foi desenvolvido para avaliar áreas maiores que 0,4Km<sup>2</sup>.

Conforme Thirumalaivasan et al. (2003), o modelo DRASTIC foi originalmente desenvolvido como uma ferramenta fácil de usar para avaliação de vulnerabilidade de aquíferos englobando diversas configurações hidrogeológicas baseadas no índice de vulnerabilidade. O índice de vulnerabilidade DRASTIC é útil numa escala regional para priorizar áreas de vulnerabilidade alta, moderada e baixa, as quais poderiam ser seguidas por investigações de campo detalhadas. O modelo é rígido na designação de pontos e pesos para os parâmetros do modelo. Entretanto, para melhor trabalhar as características locais para representação de configurações hidrogeológicas, existem várias modificações do modelo DRASTIC original. As modificações estão na forma de utilizar os parâmetros adicionais, remoção de certos parâmetros e utilização de diferentes pontuações e pesos para os parâmetros. Nos trabalhos realizados por Hamza et al. (2007) é utilizado o modelo DRASTIC, que inclui duas versões: a genérica (normal) DRASTIC, aplicada no caso dos poluentes inorgânicos, e a DRASTIC pesticidas, aplicada no caso dos pesticidas. Ainda, considerou o índice DRASTIC com valores de medição a vulnerabilidade do aquífero que variaram de 23 - 226 no caso da versão DRASTIC genérico, onde foram classificados em quatro graus de vulnerabilidade sendo: baixa (1 - 100); média (101 - 140); alta (141 - 200); muito alta (>200), (HAMZA et al., 2007).

O outro modelo muito utilizado para as pesquisas de vulnerabilidade natural dos sistemas aquíferos à contaminação é o GOD, que se baseia em três parâmetros: o grau de confinamento; a ocorrência dos estratos; e a profundidade do nível da água subterrânea. Embora com um menor número de informações, essas três características contêm parâmetros importantes para definir a vulnerabilidade natural de um sistema aquífero quanto ao risco de contaminação. Para Tavares et al. (2009), o método GOD destaca-se como alternativa preferencial, graças a sua simplicidade conceitual e de aplicação.

A seguir, são descritos os parâmetros determinados pelas metodologias DRASTIC e GOD, sendo que cada letra corresponde ao parâmetro investigado referindo-se a sigla do modelo (DRASTIC e GOD).

O modelo DRASTIC utiliza sete parâmetros:

**D** - Profundidade do Nível Estático - representa a distância que um contaminante deve atravessar antes de atingir a zona saturada. Quanto maior for a profundidade, menor será o índice de contaminação a atingir o aquífero.

**R** - Recarga do aquífero - corresponde à quantidade de água que atinge a área e se infiltra no solo ou na rocha até atingir a zona saturada. A recarga das águas subterrâneas ocorre principalmente pela precipitação pluviométrica, na qual a água se infiltra na zona não saturada e percola até atingir a zona saturada. Quanto maior for a recarga de uma determinada área, maior a probabilidade de contaminação da água subterrânea. Conforme Barreto (2006), a recarga condiciona o transporte de um poluente na zona não saturada e a disponibilidade de água para os processos de dispersão e diluição tanto na zona vadosa como na zona saturada.

**A** - Material do aquífero - refere-se à textura dos sedimentos, às rochas consolidadas ou aos sedimentos inconsolidados que constituem o aquífero. Esse parâmetro determina a mobilidade do contaminante, ou seja, a capacidade do aquífero em atenuar os efeitos dos poluentes (BARRETO, 2006). O conhecimento do material do aquífero é importante porque irá determinar a mobilidade e atenuação dos poluentes à sua contaminação. Conforme Melo Junior (2002), quanto maior o tamanho dos grãos dos sedimentos ou rochas e quanto mais aberturas ou fraturas dentro do aquífero, maior será a permeabilidade e menor a capacidade de atenuação do meio aquífero à contaminação.

**S** - Tipo de solo - compreende o material de cobertura da superfície terrestre constituído por partículas no tamanho areia, silte e argila, além de constituintes orgânicos.

**T** - Topografia - refere-se à declividade do terreno. Quanto maior for a declividade, menor será a possibilidade de infiltração de água e, conseqüentemente, de poluente no subsolo. Já em áreas com declividades planas, a suscetibilidade à infiltração dos contaminantes é maior. Barreto (2006) destaca que esse parâmetro condiciona a probabilidade de um poluente escoar superficialmente ou de permanecer à superfície durante o tempo suficiente para se infiltrar.

**I** - Impacto da zona vadosa - refere-se à zona não saturada, que se encontra abaixo da superfície da terra e acima do nível estático (freático). O tipo de material encontrado nessa zona determina ou minimiza o processo de contaminação do aquífero. Nessa zona pode ocorrer uma flutuação no nível de água, ampliando a espessura desta zona em um período anual em terrenos com características climáticas sazonais. Estudos realizados por Silvério da Silva et al. (2009) observaram flutuações do nível da água subterrânea em aquíferos livres do SAG no município de Rosário do Sul da ordem de 0 a 2,8m em terrenos com plantio de eucaliptos no período de abril a outubro (outono, inverno e primavera). Este parâmetro é considerado com maior peso neste método.

**C** - Condutividade Hidráulica - corresponde à habilidade do material que compõe o aquífero em percolar a água, determinando, assim, a taxa com que a água subterrânea fluirá sob um determinado gradiente hidráulico (MELO JUNIOR, 2002).

A metodologia GOD utiliza apenas três parâmetros para avaliar a vulnerabilidade natural dos aquíferos à contaminação:

**G** - O Grau de confinamento do aquífero - corresponde ao arranjo entre as camadas sedimentares e/ou derrames vulcânicos, rochas cristalinas ou calcários (cársticos). Estes aquíferos podem ser livres, os quais recebem uma carga maior por representarem um risco mais elevado de contaminação. Os aquíferos fissurais podem ou não conectar-se, recebendo uma carga menor.

**O** - Ocorrência dos estratos - encontrados acima do nível da água subterrânea, considera os tipos litológicos consolidados (arenitos, siltitos), inconsolidados (sedimentos aluviais não litificados) e ainda as rochas cristalinas.

**D** - Profundidade do nível da água subterrânea - mensurada desde a "boca" do poço até o nível da água subterrânea. Esse parâmetro considera que, quanto

mais profundos, mais difícil será a capacidade de o contaminante disperso atingir o nível da água e assim difundir-se. Poços com níveis rasos representam um risco maior de contaminação.

Vários estudos foram e estão sendo realizados em diversas regiões do Brasil e do mundo utilizando o modelo DRASTIC e GOD.

Melo Junior (2002) realizou um trabalho na Área de Disposição de Resíduos Sólidos (ADRS) da Indústria Alumínio Brasileiro S. A. (ALBRAS), no município de Barcarena, no Pará, para determinar as principais características físicas do aquífero livre e a sua vulnerabilidade natural à contaminação. Utilizou os métodos GOD e DRASTIC, fundamentados em diversos parâmetros como profundidade da água, tipo de aquífero, características litológicas da zona não saturada, condutividade hidráulica dos sedimentos, recarga do aquífero e topografia. O estudo mostrou que a vulnerabilidade do aquífero livre, determinada através do método GOD, variou entre moderada e alta; enquanto que, pelo modelo DRASTIC, foram obtidos índices de vulnerabilidade entre 128 a 151. Pode-se considerar que a vulnerabilidade natural do aquífero estudado pelo DRASTIC também apresenta valores que variam de moderada à alta. O estudo determinou que a vulnerabilidade natural do aquífero livre em áreas de pequena extensão como a investigada teve melhor exequibilidade pelo método GOD por utilizar um menor número de parâmetros.

Nos estudos realizados por Thirumalaivasan et al. (2003), os parâmetros referentes ao modelo DRASTIC sofreram modificações para adaptação às condições locais, quais sejam: variações de profundidade até o lençol freático, topografia e impacto da zona vadosa e da condutividade hidráulica. Os demais, os quais estão ou na escala nominal de medição ou têm uma variação inteira de pontuação, não foram modificados e usados como tal.

Camponogara (2006) estudou a vulnerabilidade natural do Sistema Aquífero Guarani e analisou parâmetros físico-químicos das águas subterrâneas em Quaraí (Brasil) e Artigas (Uruguai) utilizando o modelo DRASTIC para estudar a vulnerabilidade natural dos aquíferos. O estudo mostra que, a respeito desse modelo, é importante ressaltar a dificuldade de se conseguir os sete fatores, pois alguns deles necessitam de muita pesquisa de campo, e qualquer suplementação aos dados analisados demandaria maior custo e tempo de pesquisa. Como resultado constatado, pode-se destacar, em relação à vulnerabilidade natural dos aquíferos da

área, a identificação de três dessas classes: vulnerável, muito vulnerável e extremamente vulnerável.

Rahman (2007) realizou um trabalho para descobrir as zonas vulneráveis da água subterrânea em aquíferos rasos na cidade de Aligarh (Índia) e em áreas no seu entorno. Utilizando o modelo DRASTIC em um ambiente do SIG, o estudo mostrou que mais de 80% da água subterrânea da cidade está sob média e alta vulnerabilidade à poluição, que é a principal causa de preocupação para aproximadamente 800 mil pessoas que lá vivem. O estudo sugeriu que este modelo pode ser uma ferramenta eficiente para as autoridades locais projetarem um gerenciamento adequado dos recursos hídricos subterrâneos.

Rauber (2008) efetuou um estudo referente ao diagnóstico urbano ambiental do Município de Santa Maria - RS. O estudo objetivou digitalizar a carta das unidades geotécnicas de Maciel Filho (1990), e avaliou a condutividade hidráulica nelas, como também determinou a vulnerabilidade natural dos aquíferos existentes, aplicando a metodologia GOD, simulando-se 36 poços. Como resultado, fez a espacialização dos poços tubulares e da condutividade hidráulica na carta das unidades geotécnicas e avaliou a superfície potenciométrica associada aos cartogramas de vulnerabilidade e aos pontos potenciais de contaminação.

Meneses et al. (2009) elaboraram o mapa de vulnerabilidade no município de João Pessoa - PB, através da utilização de técnicas de geoprocessamento. O trabalho realizado apresentou a metodologia empregada e os resultados obtidos na elaboração do mapa de vulnerabilidade dos aquíferos livres superiores presentes no município. Nesse estudo, adotou-se o modelo DRASTIC, que utiliza de fatores hidrogeológicos para definir o índice de vulnerabilidade de um aquífero. Por meio de um Sistema de Informações Geográficas foram espacializados os fatores e, após o cruzamento de mapas, obteve-se o mapa síntese contendo classes que variam de baixa à elevada vulnerabilidade. Os resultados obtidos apontaram para a necessidade urgente de um ordenamento do uso da terra em áreas onde a expansão imobiliária está em grande crescimento, como no caso da região litorânea do município.

## 3 MATERIAL E MÉTODOS

### 3.1 Caracterização da área de estudo

A área de estudo está localizada no Fuso 21J entre as coordenadas UTM (Universal Transversa de Mercator) 6762000 e 6736000 m N e 670000 e 694000 m E, meridiano central 57º WGr., abrangendo a carta topográfica Vila Kramer Folha SH.21-X-D-I-4, elaborada pela Diretoria do Serviço Geográfico do Exército (DSG), na escala 1:50.000, no município de São Francisco de Assis, situada na região central do Estado do Rio Grande do Sul. A Figura 1 apresenta a área de abrangência da carta topográfica na imagem CBERS. Para a elaboração do mapa base da área de estudo, digitalizou-se a carta topográfica Vila Kramer, utilizando o Sistema de Informação Geográfica - SIG, programa *Spring* 4.3, do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais - INPE.

O clima, de acordo com a classificação de Köppen, recebe denominação de Cfa "Subtropical Mesotérmico" constantemente úmido. Esse clima é caracterizado por meses de frio, com geadas de maio a agosto, e calor intenso, principalmente em janeiro e fevereiro, temperatura média do mês mais quente superior que 22°C e temperatura média anual maior que 18°C. A pluviosidade intensa é bem distribuída por todo o ano, com índices pluviométricos variando de 1.400 mm a 1.600 mm (HAUSMAN, 1995).

Na área de estudo, a variedade de vegetação é bastante limitada, estando parcialmente coberta por florestas e com vegetação representada por campos limpos, com pastagens nativas e exóticas, propícia para a criação de gado.

A geomorfologia da área possui um relevo em grande parte suave ondulado a forte ondulado (com áreas escarpadas e montanhosas), com desníveis topográficos que variam de 0 a 400 metros de altitude. Ali, ocorrem três grandes compartimentos de relevo, que são: Depressão Central (constituído de coxilhas e planícies aluviais); encosta do Planalto Meridional (apresentando patamares descontínuos) e o Planalto (topo). A encosta do Planalto, na parte leste, possui um relevo mais acidentado, com grandes alinhamentos devido a falhamentos. Essa área recai sob o domínio dos

basaltos. As maiores altitudes estão na faixa dos 400 m, situadas também na porção leste e compõem a superfície do Planalto, modulada por coxilhas de pequena altura. Nesta superfície afloram as rochas vulcânicas ácidas (MACIEL FILHO e SARTORI, 1979). Conforme estes autores, a feição geomorfológica mais conspícua da região é, certamente, o relevo tabuliforme caracterizado por elevações com topo plano na cota de 200 m aproximadamente e encostas abruptas, muitas vezes quase verticais, com a concavidade voltada para cima, formando uma vertente côncava.

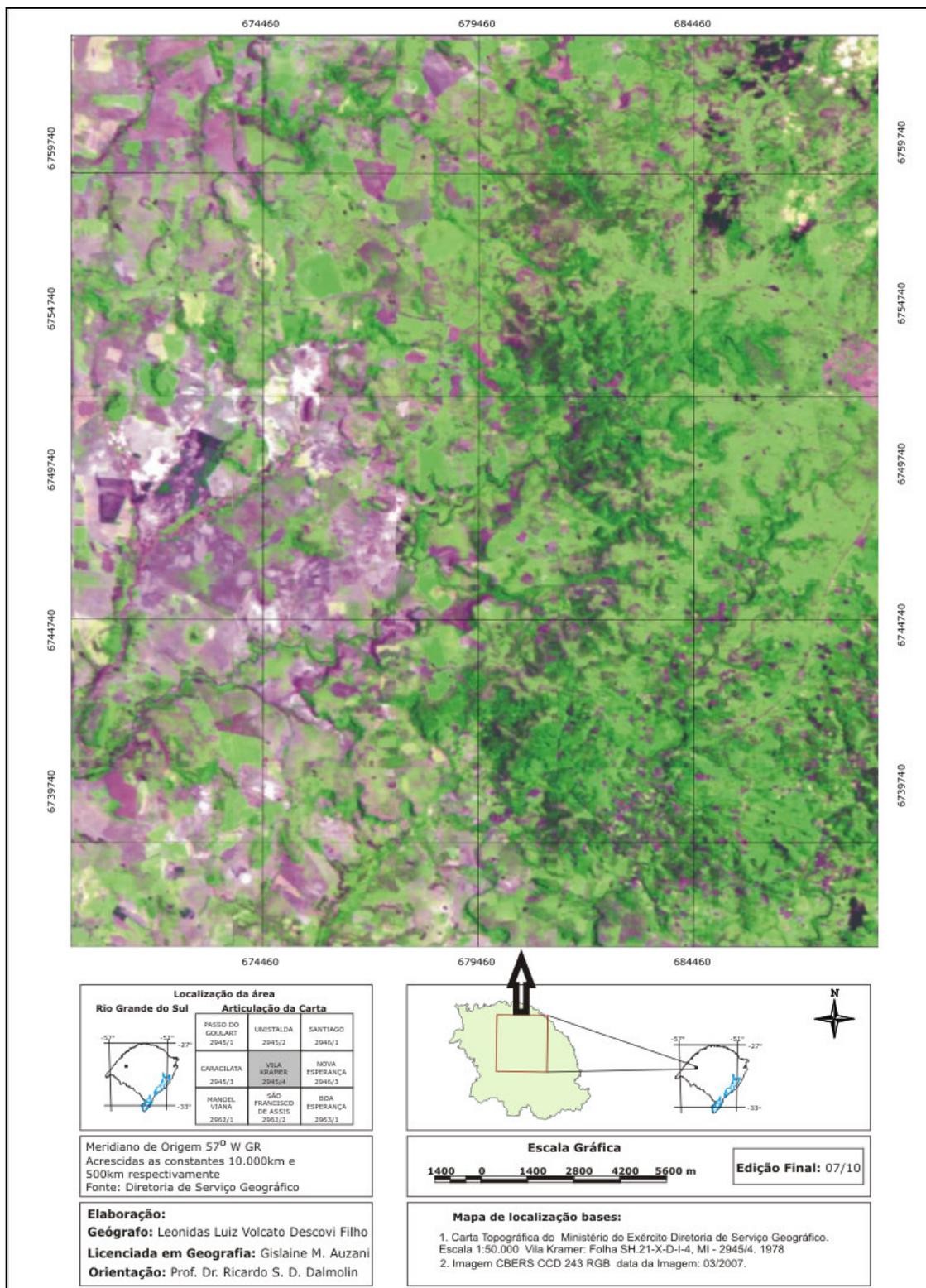


Figura 1 – Mapa de localização da área de abrangência da carta topográfica Vila Kramer na imagem CBERS, no município de São Francisco de Assis, RS.

### 3.2 Mapa Geológico

Do ponto de vista geológico, a área de estudos é constituída de diferentes tipos de rochas, como os derrames de rochas vulcânicas de origem básica e ácida, representadas por basalto e riólito e as rochas sedimentares, no caso o arenito interderrames e também aflorante. A representação cartográfica da geologia da área foi elaborada com base no mapa geológico do Estado do Rio Grande do Sul, na escala de 1:750.000 (Companhia de Pesquisas e Recursos Minerais, 2008) e mapa geológico da carta geológica de Santiago SH.21-X-D, na escala 1:250.000 (Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística, 2003). Foi realizado o recorte espacial da área de estudo (carta topográfica Vila Kramer, na escala de 1:50.000, do Ministério do Exército, 1975) digitalizando as informações com uso do Sistema de Informação Geográfica - SIG, programa *ArcGIS* 9.3 da *Environmental Systems Research Institute - ESRI*. (Figura 2).

As unidades geológicas identificadas na área são: Formação Guará, Formação Botucatu, Formação Serra Geral (Sequência Inferior - rochas vulcânicas básicas, pertencentes à Fácies Gramado e Sequência Superior - rochas vulcânicas ácidas, pertencentes à Fácies Caxias) e as Areias Quaternárias (Aluviões).

A Formação Guará, de idade jurássica, constitui-se de arenito fino a conglomerático, cores esbranquiçadas a avermelhadas, intercalado ocasionalmente com níveis centimétricos de pelitos, ambiente continental desértico, com depósitos fluviais, eólicos e lacustres (CPRM, 2008). A Formação Botucatu são tomados tanto o arenito eólico pré-basalto quanto o intertrapeano com espessura expressiva (MACIEL FILHO, 1990).

A Formação Serra Geral representa as rochas de origem vulcânica do tipo basalto e riólito granofíricos. Conforme Maciel Filho (1990), o substrato rochoso é constituída por duas sequências vulcânicas: uma básica e outra ácida. As rochas vulcânicas apresentam textura quanto ao tamanho do grão afanítica e estrutura vesicular e amigdalóide, o que pode produzir diferentes tipos de solos e/ou associar diferente permeabilidade. O substrato rochoso formado por riólito, que é a sequência ácida da Formação Serra Geral, é constituído por delgados derrames de vitrófiros e um derrame superior muito espesso, de riólito ou riodacito, com textura de intercrescimento micrográfico de quartzo e feldspato de cor cinza clara. Os depósitos

aluviais constituídos por areias Quaternárias são representados litologicamente por sedimentos inconsolidados recentes, que ocorrem margeando as calhas dos rios e riachos que drenam a área de estudo, predominando as areias finas.

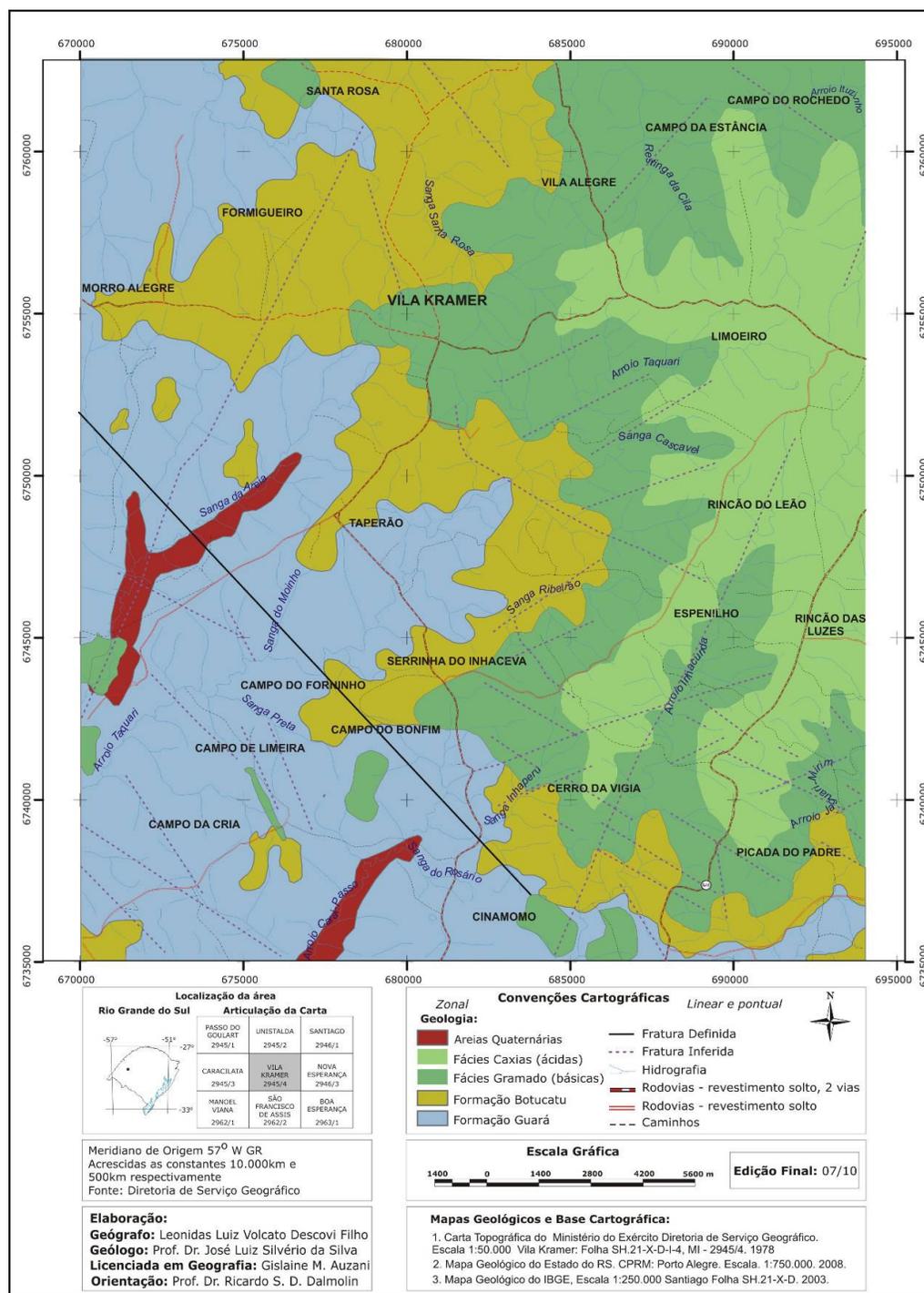


Figura 2 – Mapa das Formações Geológicas da área de abrangência da carta Otopográfica Vila Kramer.

### 3.3 Mapa de Solos

As principais classes de solos identificadas na área de estudo são: Argissolos, Cambissolos, Gleissolos, Latossolos, Neossolos Litólicos e Neossolos Quartzarênicos.

Segundo Streck et al. (2008) os Argissolos são solos geralmente profundos a muito profundos, variando de bem drenados a imperfeitamente drenados. Já, os Cambissolos são solos rasos a profundos. As condições de drenagem desses solos variam de bem drenados a imperfeitamente drenados, dependendo da posição que ocupam na paisagem (STRECK et al., 2008). Os Gleissolos são solos pouco profundos a profundos, muito mal drenados, de cor acinzentada ou preta. Os Latossolos são solos bem drenados, normalmente profundos a muito profundos. Os Neossolos são solos rasos ou profundos, de formação muito recente (STRECK et al., 2008).

O Mapa de solos (escala 1:50.000) da área de estudos foi elaborado por Flores (2009), sendo realizada a transferência do material analógico para o meio digital via “scanner”, realizado o georreferenciamento (Programa Computacional *Spring* 4.3) e para a edição final do mapa, utilizou-se o programa Corel DRAW 13 (Figura 3). A legenda foi atualizada para o novo Sistema Brasileiro de Classificação de Solos (EMBRAPA, 2006) e está descrita no Quadro 1.

Para o mapa de solos (escala 1:1.000.000) da área de estudos, inicialmente fez-se o georreferenciamento da imagem do mapa de solos de Santiago, RS (Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística, 2003), junto ao banco de dados da área, utilizando o programa *Spring*. Após, fez-se o recorte da área de estudo e, por fim, realizou-se a sobreposição com o mapa base da área de pesquisa. No programa *Corel* DRAW 13 fez-se a edição final do mapa (Figura 4). A legenda foi atualizada para o atual Sistema Brasileiro de Classificação de Solos (EMBRAPA, 2006) e está descrito no Quadro 2.

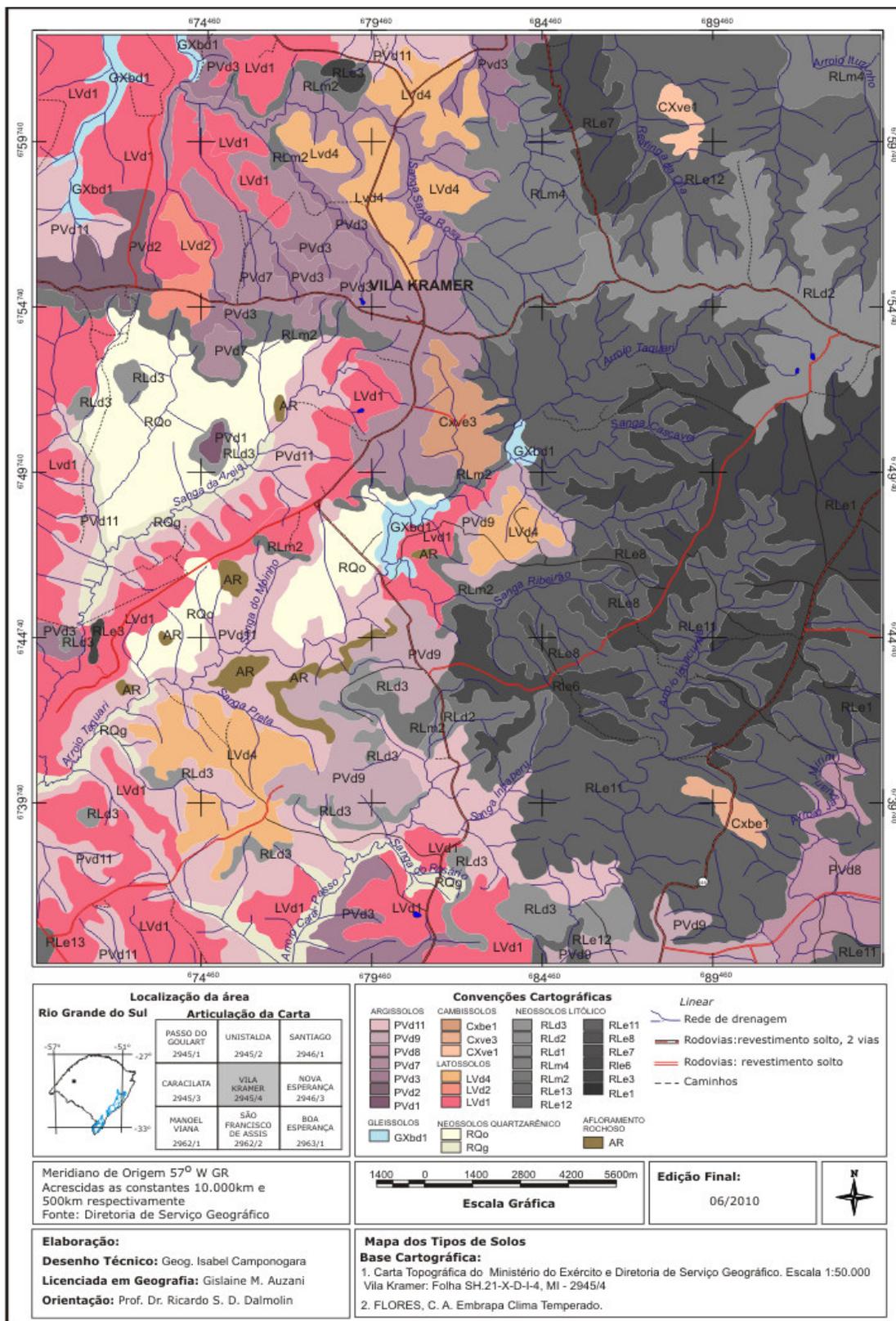


Figura 3 – Mapa de solos, escala 1:50.000, da área de abrangência da carta topográfica Vila Kramer.

<b>Classes de solos e descrição das unidades de mapeamento</b>	<b>Legenda</b>
<b>ARGISSOLOS</b>	
ARGISSOLO VERMELHO Distrófico arênico A moderado, textura arenosa/média, fase campo subtropical, relevo ondulado.	PVd 1
ARGISSOLO VERMELHO Distrófico abruptico A proeminente, textura média/argilosa, fase campo subtropical, relevo suave ondulado.	PVd 2
ARGISSOLO VERMELHO Distrófico abruptico A moderado, textura arenosa/média, fase campo subtropical, relevo suave ondulado.	PVd 3
ARGISSOLO VERMELHO Distrófico típico A proeminente, textura argilosa, fase campo subtropical, relevo suave ondulado.	PVd 7
ARGISSOLO VERMELHO Distrófico típico A moderado, textura arenosa/média, fase campo subtropical, relevo suave ondulado.	PVd 8
ARGISSOLO VERMELHO Distrófico típico A moderado, textura média/argilosa, fase campo subtropical, relevo suave ondulado e ondulado.	PVd 9
Associação: ARGISSOLO VERMELHO Distrófico abruptico, textura arenosa/média + NEOSSOLO QUARTZARÊNICO Órtico típico, ambos A moderado fase campo subtropical, relevo suave ondulado.	PVd 11
<b>CAMBISSOLOS</b>	
CAMBISSOLO HÁPLICO Tb Eutrófico típico A chernozêmico textura argilosa fase floresta subtropical e parque relevo suave ondulado	CXbe 1
CAMBISSOLO HÁPLICO Ta Eutrófico léptico A moderado textura argilosa fase pedregosa campo subtropical relevo ondulado.	CXve 1
CAMBISSOLO HÁPLICO Ta Eutrófico típico A moderado, textura argilosa, fase floresta subtropical, relevo ondulado.	CXve 3
<b>GLEISSOLOS</b>	
GLEISSOLO HÁPLICO Tb Distrófico típico, textura média, fase campo subtropical de várzea relevo plano.	GXbd 1
<b>LATOSSOLOS</b>	
LATOSSOLO VERMELHO Distrófico típico A moderado, textura média, fase campo subtropical, relevo suave ondulado.	LVd 1
LATOSSOLO VERMELHO Distrófico típico A proeminente, textura argilosa, fase campo subtropical, relevo suave ondulado.	LVd 2
LATOSSOLO VERMELHO Distrófico típico A moderado, textura argilosa, fase campo subtropical, relevo suave ondulado.	LVd 4
<b>NEOSSOLOS</b>	
NEOSSOLO LITÓLICO Chernossólico típico, textura média fase pedregosa floresta subtropical, relevo ondulado e forte ondulado (substrato rochas eruptivas básicas).	RLm 2
Associação: NEOSSOLO LITÓLICO Chernossólico típico, fase pedregosa, relevo ondulado e forte ondulado (substrato rochas eruptivas básicas) + CAMBISSOLO HÁPLICO Ta Eutrófico típico A chernozêmico, fase relevo ondulado, ambos textura média floresta subtropical.	RLm 4
NEOSSOLO LITÓLICO Distrófico típico A moderado, textura arenosa, fase pedregosa e rochosa campo e floresta subtropical, relevo suave ondulado (substrato rochas areníticas).	RLd 1
NEOSSOLO LITÓLICO Distrófico típico A moderado, textura argilosa fase pedregosa campo subtropical, relevo suave ondulado (substrato rochas efusivas ácidas).	RLd 2
Associação: NEOSSOLO LITÓLICO Distrófico típico A moderado, textura arenosa fase campo e floresta subtropical, relevo ondulado (substrato rochas areníticas) + AFLORAMENTO ROCHOSO.	RLd 3
NEOSSOLO LITÓLICO Eutrófico típico A moderado, textura média fase pedregosa campo subtropical, relevo suave ondulado (substrato rochas eruptivas básicas).	RLe 1
NEOSSOLO LITÓLICO Eutrófico típico A moderado, textura média fase pedregosa campo subtropical, relevo ondulado (substrato rochas eruptivas básicas).	RLe 3
Associação: NEOSSOLO LITÓLICO Eutrófico típico, textura média fase pedregosa e rochosa, floresta subtropical (substrato rochas eruptivas básicas) + CAMBISSOLO HÁPLICO Ta Eutrófico típico, textura argilosa, fase floresta subtropical ambos A moderado relevo suave ondulado.	RLe 6

<b>Classes de solos e descrição das unidades de mapeamento</b>	<b>Legenda</b>
Associação: NEOSSOLO LITÓLICO Eutrófico típico, textura média fase pedregosa campo subtropical, relevo ondulado (substrato rochas eruptivas básicas) + CAMBISSOLO HÁPLICO Ta Eutrófico típico, textura argilosa, fase campo subtropical, relevo suave ondulado ambos A moderado.	RLe 7
Associação: NEOSSOLO LITÓLICO Eutrófico típico A moderado, fase pedregosa campo subtropical (substrato rochas eruptivas básicas) + CAMBISSOLO HÁPLICO Ta Eutrófico típico A chernozêmico, fase campo subtropical ambos, textura média, relevo ondulado.	RLe 8
Associação: NEOSSOLO LITÓLICO Eutrófico típico textura média, fase pedregosa e rochosa campo subtropical, relevo ondulado e forte ondulado (substrato rochas eruptivas básicas) + CAMBISSOLO HÁPLICO Tb Eutrófico típico, textura argilosa, fase floresta subtropical e relevo ondulado ambos A moderado.	RLe 11
Associação: NEOSSOLO LITÓLICO Eutrófico típico, textura média fase pedregosa e rochosa relevo forte ondulado e montanhoso (substrato rochas eruptivas básicas) + CAMBISSOLO HÁPLICO Ta Eutrófico típico, textura argilosa fase pedregosa, relevo ondulado A moderado, campo e floresta subtropical.	RLe 12
Associação: NEOSSOLO LITÓLICO Eutrófico típico A moderado, textura média fase pedregosa, campo subtropical relevo suave ondulado (substrato rochas eruptivas básicas) + AFLORAMENTO ROCHOSO.	RLe 13
NEOSSOLO QUARTZARÊNICO Hidromórfico típico A proeminente, fase campo e floresta subtropical de várzea relevo plano.	RQg
NEOSSOLO QUARTZARÊNICO Órtico típico A moderado, fase campo subtropical relevo suave ondulado.	RQo
AFLORAMENTO ROCHOSO.	AR

Quadro 1 – Classes de solos e descrição das unidades de mapeamento na área de estudo, na escala 1:50.000, com a legenda segundo a EMBRAPA (2006).

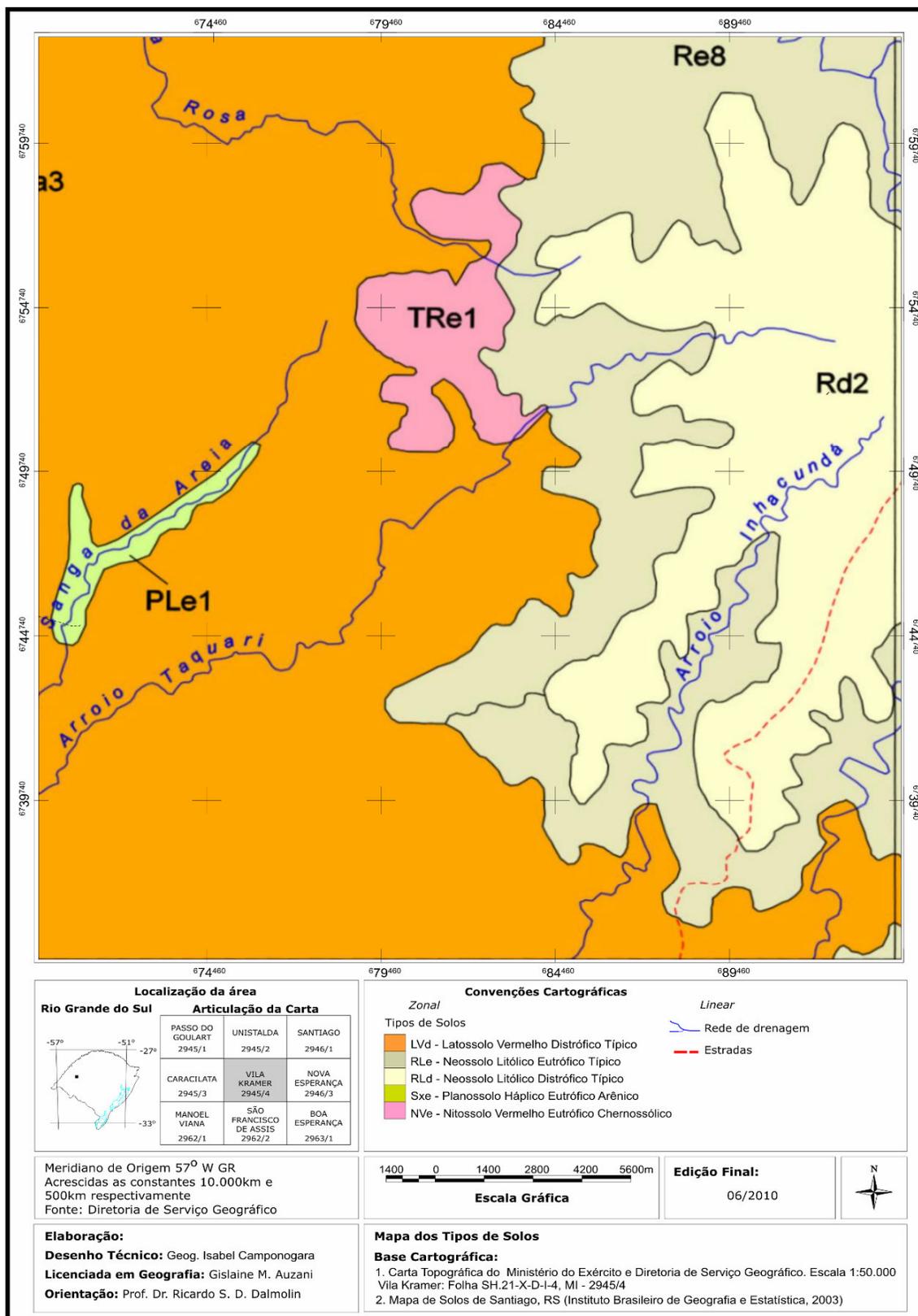


Figura 4 – Mapa de solos, escala 1:1.000.000, da área de abrangência da carta topográfica Vila Kramer.

Classes de solos	Legenda do Mapa	Legenda Atual
<b>LATOSSOLOS</b>		
Latossolos Vermelho Distrófico típico	Lea3	LVd
<b>NITOSSOLOS</b>		
Nitossolos Vermelho Eutrófico Chernossólico	TRe1	NVe
<b>PLANOSSOLOS</b>		
Planossolos Háptico Eutrófico arênico	PLe1	Sxe
<b>NEOSSOLOS</b>		
Neossolos Litólicos Distrófico típico	Rd2	RLd
Neossolos Litólicos Eutrófico típico	RL8	RLe

Quadro 2 – Classes de solos da área de estudo, na escala 1:1.000.000, Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (2003), legenda atualizada EMBRAPA (2006).

### 3.4 Mapa Clinográfico

Na elaboração do mapa de classes de declividade (clinográfico) adotaram-se como parâmetro 5 classes de declividades: 0 - 2%; 2 - 6%; 6 - 12%; 12 - 18% e > 18%, propostas por Aller et al. (1987), no modelo DRASTIC. Esse procedimento foi realizado com auxílio do *Spring 4.3*. Fez-se a digitalização das curvas de nível e dos pontos cotados em Modelo Numérico do Terreno - MNT, obtidos a partir da carta topográfica, das quais foram interpoladas pelo método de triangulação irregular (TIN), com base na triangulação *Delaunay*, onde esta serve de suporte para a geração do mapa clinográfico. A seguir, fez-se a grade retangular, que consiste no fatiamento das classes de declividade, gerando a média ponderada por cota e por quadrante como critério de interpolação. O fatiamento consiste em gerar uma imagem temática a partir da grade retangular. Esta, por sua vez, trata-se do modelo numérico do terreno que representa o mais fielmente possível 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 (PI) da categoria numérica originará um PI de categoria temática representando um aspecto particular do MNT e, conseqüentemente, a cada fatia deve ser associada a uma classe temática previamente definida no esquema conceitual do banco de dados, estabelecendo-se, assim, as diferentes classes de declividade. Para a edição final do mapa, foram usados o aplicativo *Scarta* e o programa gráfico Corel DRAW 13.

### 3.5 Mapa de Uso da Terra

Para avaliação temporal do uso da terra na área de estudos, utilizaram-se imagens de satélite de 1989, 1999 e 2009, correspondentes a Janeiro. As imagens de 1989 e 1999 foram obtidas do sensor Landsat 5 TM canais 3, 4 e 5, órbita/ponto 224/80. Para 2009, a imagem utilizada foi CBERS - 2B, nas bandas 2, 3 e 4, órbita/ponto 161/133. As imagens foram disponibilizadas pela Divisão de Geração de Imagens - INPE. Na imagem 2009, realizou-se uma classificação supervisionada, com a verificação e identificação dos diferentes usos da terra no campo; a partir daí, foram identificadas os diferentes usos da terra para 1989 e 1999.

A classificação digital de imagens foi realizada utilizando-se o programa *Spring* 4.3 para elaborar o banco de dados, e no aplicativo *Impima* fez-se a conversão das bandas de *tiff* para *grib*. Para inserir no banco de dados criado no *Spring*, partiu-se inicialmente do georreferenciamento da imagem. Após, fez-se a importação dos arquivos *grib* georreferenciados para o banco de dados. Foram geradas imagens sintéticas referentes à composição colorida, realçada pela técnica de Ampliação Linear de Contraste, visando a melhorar a qualidade visual e destacar as classes de interesse, de modo a facilitar a coleta de amostras de treinamento na etapa de classificação de imagens.

Para fazer a classificação digital da imagem, optou-se pela classificação digital supervisionada e por parâmetros estatísticos de Máxima Verossimilhança com classificação "*pixel a pixel*". Nesta classificação, inicialmente se coletam amostras sobre a imagem a ser classificada, sendo que as mesmas servem de base para que o programa computacional realize a classificação.

Foram estabelecidas sete classes de uso da terra para a classificação digital, sendo: lâmina d'água, arenização, solo exposto, floresta implantada, floresta nativa, campo e culturas. A partir da legenda pré-estabelecida, foram adquiridas amostras de treinamento e teste na imagem, as quais foram submetidas a uma avaliação do desempenho. Este procedimento ocorreu através da análise individual de cada classe e suas respectivas amostras utilizando limiar de aceitação de 99,9%.

### 3.6 Mapa de Áreas de Preservação Permanente (APPs)

A elaboração do mapa de APPs teve como base o Código Florestal Brasileiro - CFB (BRASIL, 1965), regulamentado pela Resolução CONAMA n° 303 (2002), que delimita as áreas de APPs como as marginais de rios, nascentes, topos de morros, linha de cumeada e declividades superiores a 45° (100%). Para gerar o mapa, foi executada a delimitação das áreas de preservação permanente. Referente à rede hidrográfica, elaborou-se “mapa de distância” na operação Temática do *Spring*, a qual permite a extração de zonas com larguras especificadas (distâncias) em torno de um ou mais elementos do mapa, neste caso as nascentes d’água e a rede de drenagem. O processamento inicia-se com a rede hidrográfica ativa; posteriormente na operação temática, é selecionada a opção mapa de distância. A partir deste, faz-se a seleção do elemento e da entidade definida como linha. Em tela, selecionam-se os canais para posteriormente determinar a distância de preservação. Na sequência, definiu-se o plano de informação para armazenar o mapa de preservação permanente. Com os dados da drenagem, foram estabelecidos 30 metros de preservação permanente para as faixas marginais ao longo das drenagens dos rios e riachos foram gerados uma zona de largura *buffer* correspondente a 30 m. Nas áreas de nascentes e açudes, o *buffer* utilizado foi 50 m. Em topos de morros, foi utilizado um *buffer* com raio de 50 m (CONAMA, 2002).

### 3.7 Mapa de Aptidão Agrícola das Terras

Com os dados obtidos pelo mapa de solos (FLORES, 2009) e pelas informações obtidas no campo e laboratório foi elaborado o mapa de Aptidão Agrícola das Terras. Optou-se pela geração desse mapa, por ser mais adequada à escala de trabalho e nível de detalhamento do levantamento (RAMALHO FILHO & BEEK, 1995).

### 3.8 Mapa de Adequação do Uso das Terras

Na identificação e análise da adequação do uso das terras foram utilizadas informações dos mapas de aptidão agrícola das terras e das categorias de APPs. Inicialmente, realizou-se a sobreposição desses mapas por meio dos procedimentos disponíveis no *módulo de análise* da *caixa de ferramentas* do “software” ArcGIS 9.3. Para realizar essa sobreposição ou cruzamentos dos mapas foi utilizado o comando *sobreposição/unir*, onde as características dos dois mapas em questão são atualizadas e a geometria devidamente calculada, resultando em um novo polígono. Através do comando *calcular valores*, nos *atributos de tabelas* do novo mapa, obteve-se o valor em hectares para todas as classes.

### 3.9 Mapa dos Conflitos de Uso das Terras

Para se conhecer a problemática da utilização das terras, foram cruzados os mapas de uso das terras em cada época estudada com o de adequação de uso das terras. Depois do processamento digital das imagens de satélite (*PDI*) das três datas, foram gerados polígonos de cada umas das classes de uso da terra encontradas. A partir desse ponto, foram realizados os cruzamentos seguindo os mesmos comandos do módulo de análise já descritos anteriormente. Para uma melhor comparação e posterior classificação das áreas de uso correto, incorreto ou subutilizadas, realizou-se um procedimento de conversão dos mapas de adequação de uso das terras e dos mapas de uso (1989, 1999 e 2009) para arquivos de imagem ou RASTER (*RST*). Esse procedimento permite realizar o trabalho de avaliação dos conflitos somente com duas variáveis, o que facilita em muito o trabalho. Para isso, utilizou-se o módulo de conversão e o comando *para raster/polígono para raster*. A partir daí, foi efetuado um cruzamento desses dois mapas utilizando o *módulo de análise espacial* através do comando *local/combinar*.

### 3.10 Análises Estatísticas

Os dados de conflito de uso das terras nas três datas avaliadas foram analisados através do teste t bicaudal para dados pareados ao nível de significância de 5%. A normalidade foi avaliada através do teste de Shapiro-Wilk ao nível de significância de 5%. A transformação dos dados para normalidade foi realizada utilizando a função logarítmica com base 10.

### 3.11 Cadastro dos Poços Escavados e Tubulares

As informações referentes aos poços escavados e tubulares foram obtidas no sítio da Companhia de Pesquisas e Recursos Minerais (CPRM): [www.cprm.gov.br/bases/siagas](http://www.cprm.gov.br/bases/siagas); cadastro de usuários dos poços subterrâneos SIAGAS (Sistema de Informações de Águas Subterrâneas) e também diretamente na área de estudo. Com as informações obtidas na CPRM/SIAGAS e no campo, elaborou-se um banco de dados com as seguintes informações: código do poço, latitude e longitude (coordenadas UTM), profundidade do nível estático (NE), Formação Geológica e tipo de poço (E= escavado, T= tubular). Esses dados encontram-se no anexo 1.

A localização dos poços utilizados nesse estudo encontra-se na Figura 5. Os poços escavados (em vermelho) apresentam em geral diâmetro superior a 1m e profundidades geralmente inferiores a 25 metros, sendo normalmente revestidos com cimento, tijolos ou rochas. Os poços tubulares (em azul) apresentam pequeno diâmetro e profundidades que variam de dezenas a centenas de metros, muitas vezes revestidos com tubos intercalados com filtros, perfurados com máquinas.

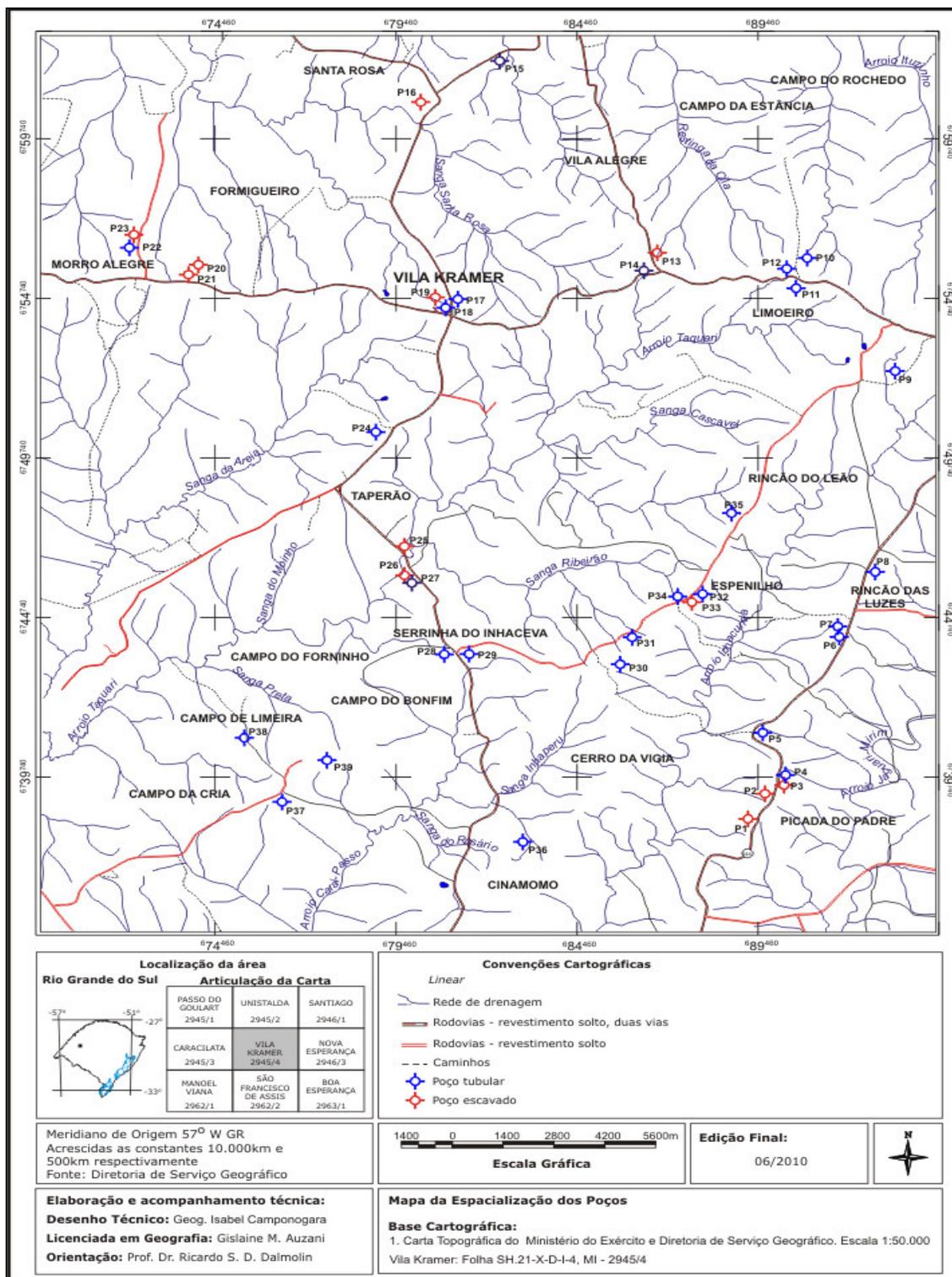


Figura 5 – Mapa da Espacialização dos 39 poços da área de abrangência da carta topográfica Vila Kramer.

### **3.12 Mapa da Variação do Nível Estático dos Poços Escavados e Tubulares**

O mapa da variação do nível estático (NE) foi elaborado a partir de informações obtidas através do cadastramento dos poços no sítio da CPRM: [www.cprm.gov.br/bases/siagas](http://www.cprm.gov.br/bases/siagas) e trabalho de campo (para os poços que não tinham o valor da profundidade do nível estático). No campo, utilizou-se o medidor denominado Jaciri (freatímetro) para estabelecer o nível estático. A partir das informações obtidas fez-se a espacialização da variação do nível estático dos poços, com o programa *Surfer 8.0*, com o interpolador *Krigagem*, em forma de cartogramas. O cartograma foi gerado e exportado para o programa Corel DRAW 13 para a edição final.

### **3.13 Mapa da Vulnerabilidade do aquífero à Contaminação**

#### **3.13.1 Metodologia DRASTIC**

A metodologia empregada para avaliar a vulnerabilidade foi o modelo DRASTIC, desenvolvido por Aller et al. (1987). De acordo com o modelo, tem-se a média ponderada de sete valores correspondentes aos parâmetros ou indicadores hidrogeológicos, aos quais são atribuídos valores numa escala de 1 a 10, dependendo da faixa de valores e com base no índice de contaminação da água subterrânea. Estes são multiplicados pelo Peso (p), os quais variam de 1 a 5, sendo que o fator mais significativo recebe o peso 5 e o menos significativo 1. Cada letra corresponde ao nome do método DRASTIC (Quadro 3).

Fatores DRASTIC	PESO (p)
<b>D</b> - (Depth of water) = Profundidade da zona não-saturada do solo	5
<b>R</b> - (Recharge net) = Recarga profunda de aquíferos	4
<b>A</b> - (Aquifer media) = Material do aquífero	3
<b>S</b> - (Soil media) = Tipo de solo	2
<b>T</b> - (Topography) = Topografia	1
<b>I</b> - (Impact of the vadose zone) = Impacto da zona não-saturada	5
<b>C</b> - (Hydraulic Conductivity) = Condutividade hidráulica	3

Quadro 3 – Fatores e pesos referentes ao modelo DRASTIC

Fonte: [abe.www.ecn.purdue.edu](http://abe.www.ecn.purdue.edu) (2002).

O fator **D** foi obtido no campo e também através das informações do CPRM/SIAGAS. O Quadro 4 apresenta as faixas de profundidade do nível estático e seus respectivos valores para serem utilizados no modelo. Assim quanto mais raso for o nível da água no poço maior a possibilidade de ser atingido por um contaminante gerado na superfície do terreno.

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 4 – Faixas de profundidade do nível de água e seus respectivos valores (Dc). (Peso: Dp = 5).

Fonte: [abe.www.ecn.purdue.edu](http://abe.www.ecn.purdue.edu) (2002).

O fator **R** refere-se à água que está se infiltrando no solo e/ou rochas, anualmente de acordo com a precipitação anual. Foram utilizadas nesse estudo as informações de Hausman (1995), que considera a precipitação total anual na área de São Francisco de Assis entre 1.400 e 1.600 mm. O Quadro 5 apresenta as cargas para os diferentes intervalos de recarga.

Intervalo de recarga em mm/ano	Carga (Ac)
0 – 51,85	1
51,85 – 103,7	3
103,7 – 181,48	6
181,48 – 259,26	8
> 259,26	9

Quadro 5 – Recarga total anual (Peso: Rp = 4)

Fonte: [abe.www.ecn.purdue.edu](http://abe.www.ecn.purdue.edu) (2002).

O fator **A** é definido a partir das Formações Geológicas, podendo se associar aos tipos de aquíferos (livres, confinados e semiconfinados). As informações utilizadas nesse estudo foram obtidas através do CPRM/SIAGAS, do mapa geológico e também através de informações obtidas no campo. O Quadro 6 refere-se aos tipos de meios aquíferos e suas respectivas cargas.

Tipo de aquífero	Faixa de variação (carga)	Cargas (Ac)
Folhelho maciço (rocha argilosa)	1 - 3	2
Metamórficas/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 6 – Tipos de meio aquíferos e suas respectivas cargas (Ac). (Peso: Ap = 3).

Fonte: [abe.www.ecn.purdue.edu](http://abe.www.ecn.purdue.edu) (2002).

O fator **S** foi obtido pelas informações do mapa de solos da área de estudos (Figura 3) e pelas de campo. As informações sobre os solos foram adaptadas às classes padrões da metodologia DRASTIC, conforme o Quadro 7.

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

Quadro 7 – Informações sobre solos e suas respectivas cargas (Sc). (Peso: Sp = 2)  
 Fonte: [abe.www.ecn.purdue.edu](http://abe.www.ecn.purdue.edu) (2002).

O fator **T** foi obtido a partir das classes de declividade (Figura 9). O Quadro 8 apresenta essas diferentes classes.

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

Quadro 8 – Classes de declividade e suas respectivas cargas (Tc). (Peso: Tp = 1).  
 Fonte: [abe.www.ecn.purdue.edu](http://abe.www.ecn.purdue.edu) (2002).

O fator **I** foi obtido através da identificação das Formações Geológicas da área de estudos, atribuindo as cargas conforme a faixa de variação (carga). No Quadro 9, observa-se o tipo de material constituinte da zona vadosa e suas respectivas cargas.

<b>Tipo do material</b>	<b>Faixa (carga)</b>	<b>Cargas típicas (Ic)</b>
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 interacamadados	4 - 8	6
Areia e cascalho com significativa matriz siltica 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 9 – Impacto da zona Vadosa e suas respectivas cargas (Ic). (Peso: Ip = 5)  
 Fonte: [abe.www.ecn.purdue.edu](http://abe.www.ecn.purdue.edu) (2002).

O fator **C** foi levado em consideração nos dados obtidos por Camponogara (2006), que utilizou informações de testes de bombeamento para a obtenção da condutividade hidráulica. Realizou cálculos de transmissividade e permeabilidade pelos métodos de Jacob e Theis; assim, foi obtida uma condutividade hidráulica inferior a 4m/d. Sua área de estudos em Quaraí/RS e Artigas/Ur mostra o mesmo condicionamento geológico encontrado em São Francisco de Assis, na área de estudo, exceto aos afloramentos da Formação Guará. No Quadro 10, apresenta-se a condutividade hidráulica e suas respectivas cargas.

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

Quadro 10 – Condutividade hidráulica, e suas respectivas cargas (Cc). (Peso: Cp=3).  
 Fonte: [abe.www.ecn.purdue.edu](http://abe.www.ecn.purdue.edu) (2002).

Para calcular o índice DRASTIC, utiliza-se a seguinte equação (ALLER et al., 1987):

$$DRASTIC = D_p D_c + R_p R_c + A_p A_c + S_p S_c + T_p T_c + I_p I_c + C_p C_c$$

Onde:  $D_p$ ,  $R_p$ ,  $A_p$ ,  $S_p$ ,  $T_p$ ,  $I_p$ ,  $C_p$  correspondem pesos dos fatores DRASTIC e  $D_c$ ,  $R_c$ ,  $A_c$ ,  $S_c$ ,  $T_c$ ,  $I_c$ ,  $C_c$  correspondem aos fatores de carga variáveis nos seus respectivos intervalos de ocorrência.

O Quadro 11 apresenta o grau de vulnerabilidade conforme os intervalos estabelecidos no modelo DRASTIC.

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 11 – Classes de vulnerabilidade e seus respectivos intervalos.  
Fonte: [abe.www.ecn.purdue.edu](http://abe.www.ecn.purdue.edu) (2002).

### 3.13.2 DRASTIC - Análise dos dados

A relação das cargas dos fatores do modelo DRASTIC com os valores desse índice foi avaliada através da análise de correlação linear de Pearson ( $\alpha = 0,01$ ). Os fatores que melhor se correlacionaram com o índice DRASTIC foram utilizados na análise de regressão linear.

A partir dessa análise, foi desenvolvida uma equação de regressão para estimativa do valor do índice DRASTIC. Os valores obtidos através da metodologia original e estimados pela equação de regressão proposta foram comparados utilizando o teste t para dados emparelhados.

A classificação dos poços foi também realizada através da estatística multivariada. Para isso, foi aplicada a análise de agrupamento (CLUSTER) utilizando

o método de Ward e a Distância Euclidiana Quadrática. A classificação de vulnerabilidade dos poços, obtida através da metodologia original e pela análise de agrupamento, foi comparadas utilizando o teste t para dados emparelhados.

Em ambas as metodologias testadas (regressão e agrupamento) foram identificados os poços em que houve disparidade na classificação da vulnerabilidade em relação à metodologia original. Esses poços foram avaliados quanto às características ambientais que levaram a esse resultado.

### 3.13.3 Metodologia GOD

A metodologia GOD (FOSTER et al., 2002 e 2006) refere-se a apenas três parâmetros para avaliar a vulnerabilidade natural dos aquíferos à contaminação. Assim como no índice DRASTIC, cada letra corresponde a um parâmetro a ser investigado.

O índice **G** (Grau de confinamento da água subterrânea) apresenta uma escala de 0 - 1,0. O índice **O** (Ocorrência dos estratos de cobertura) varia de 0,4 - 1,0 e o índice **D** (Distância até o nível freático ou teto do aquífero confinado) apresenta a escala de 0,6 - 1,0 (Figura 6).

Para o índice GOD, os parâmetros são multiplicados entre si (**G x O x D**) e todos apresentam a mesma relevância. Portanto, a multiplicação dos índices fornece o índice de vulnerabilidade final do aquífero. O Quadro 12 apresenta a relação entre o índice e a classe de vulnerabilidade do aquífero à contaminação (Foster et al. 2006).

<b>Intervalos dos índices GOD</b>	<b>Grau de Vulnerabilidade</b>
0 – 0,1	Insignificante
0,1 – 0,3	Baixa
0,3 – 0,5	Média
0,5 – 0,7	Alta
0,7 – 1,0	Extrema

Quadro 12 – Classes de vulnerabilidade do GOD.

Fonte: Foster et al., 2006.

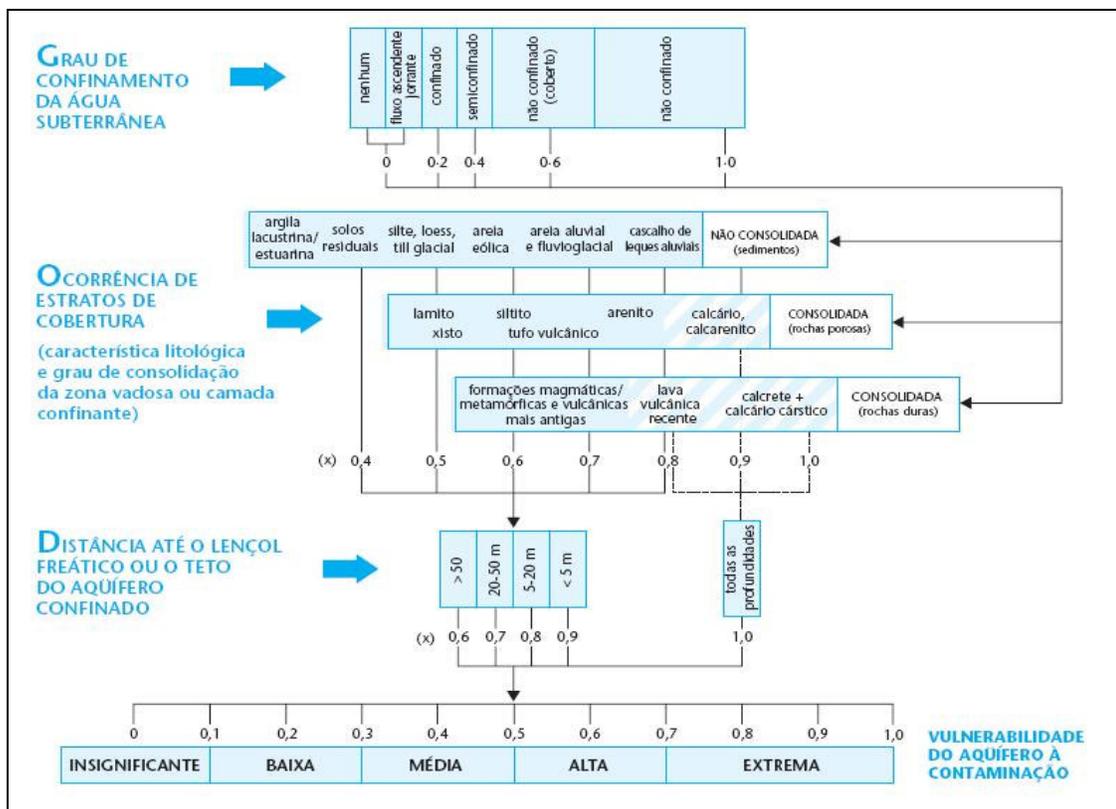


Figura 6 – Sistema GOD para avaliação da vulnerabilidade do aquífero à contaminação.

Fonte: (FOSTER et al., 2006).

### 3.14 Análise de parâmetros físico-químicos das águas subterrâneas

Para essa análise, selecionaram-se 22 pontos para a coleta de amostras (poços escavados e tubulares). Os pontos de coleta podem ser visualizados na Figura 7.

No Laboratório de Análise de Águas Rurais - LAAR – UFSM foram realizadas análises das amostras, obtendo-se os seguintes parâmetros: pH, condutividade elétrica, teores de Cálcio ( $\text{Ca}^{+2}$ ), Magnésio ( $\text{Mg}^{+2}$ ), Sódio ( $\text{Na}^{+}$ ), Potássio ( $\text{K}^{+}$ ),  $\text{N-NH}_4$ ,  $\text{N-NO}_3$ , dureza, alcalinidade, Sólidos Totais Dissolvidos (STD), turbidez e cor conforme metodologia do *Standard Methods APHA*.

Os resultados foram confrontados com: 1) Portaria Nº. 518, de março de 2004, do Ministério da Saúde, que estabelece os procedimentos e as

responsabilidades relativos ao controle e vigilância da qualidade da água para consumo humano e seu padrão de potabilidade e, 2) Resolução Nº. 357, de março de 2005, do Ministério do Meio Ambiente - CONAMA, que dispõem sobre a classificação dos corpos de água e diretrizes ambientais para o seu enquadramento, bem como estabelece as condições e padrões de lançamento de efluentes.

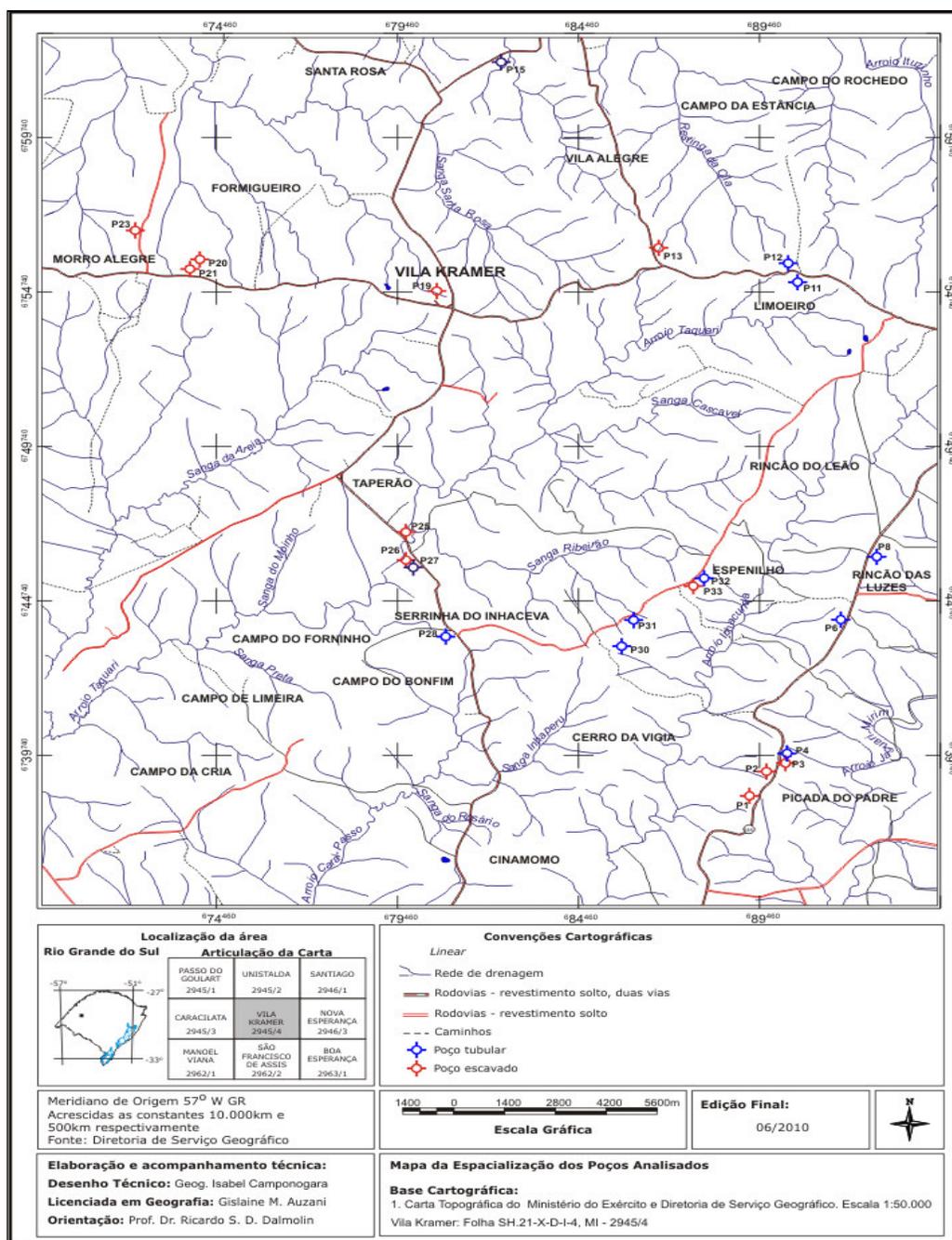


Figura 7 – Mapa da Espacialização dos 22 poços analisados quimicamente da área de abrangência da carta topográfica Vila Kramer.

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 4.1 Mapa Hipsométrico e Clinográfico

O mapa hipsométrico informa a altimetria do terreno, a partir da digitalização das curvas de nível, dividida em classes de 100 em 100 metros. As classes encontradas na área de estudo estão representadas na Tabela 1 e na Figura 8.

Tabela 1 – Classes hipsométricas, área ocupada em (ha) e porcentagem (%) relativa de área em cada classe.

<b>Classes Hipsométricas</b>	<b>Área (ha)</b>	<b>Proporção (%)</b>
0 – 100m	163,88	0,24
101 – 200m	23.204,78	34,44
201 – 300m	28.373,19	42,12
301 – 400m	14.468,17	21,49
401 – 500m	1.152,53	1,71
Total	67.362,55	100

Tendo em vista as classes hipsométricas, observa-se que o intervalo de 0 - 100 metros apresenta uma menor porcentagem de terras (0,24% da área). Nessa classe, encontram-se áreas planas, como as planícies aluviais ao longo dos rios e arroios. Na classe de 101 - 200 metros (34,44% da área), encontram-se áreas com relevo plano a suave ondulado, onde predominam campos com pecuária.

Nas cotas altimétricas entre 201 - 300 metros, encontram-se a maior porcentagem de terras (42,12% da área) onde predominam áreas de campo (pastagens) com pecuária e agricultura. Na classe hipsométrica de 301 - 400 metros, encontram-se áreas de encostas da Formação Serra Geral e uma janela da Formação Botucatu no ponto do poço nº 9 com altitude de 400m. A classe de maior

altitude da área, entre 401 - 500 metros, corresponde a apenas 1,71% da área total onde encontram-se as rochas vulcânicas básicas e ácidas da Formação Serra Geral.

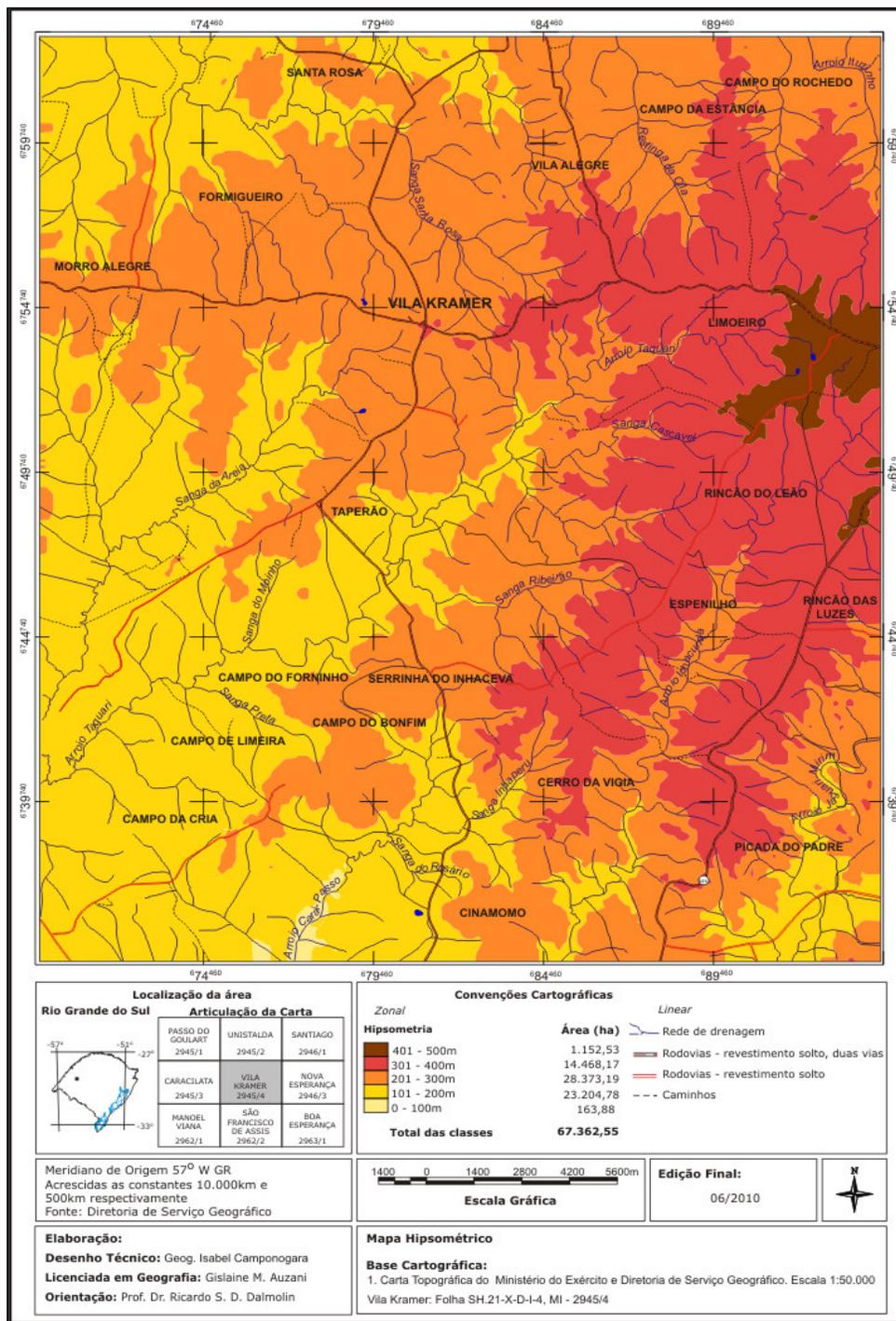


Figura 8 – Mapa Hipsométrico da área de abrangência da carta topográfica Vila Kramer.

A declividade do terreno, representada na Tabela 2 e na Figura 9, ajustada de acordo com as seguintes classes: 0 - 2%; 2 - 6%; 6 - 12%; 12 - 18% e maior que 18%. As classes de declividade seguiram a definição baseada nos parâmetros propostos por Aller et al. (1987). As áreas cuja declividade encontram-se entre 0 - 2% correspondem ao menor percentual da área (5,40%), constituídas de áreas de campo (pastagens) para a criação de gado, a agricultura (soja com uso de agroquímicos) e ainda os cursos de água associados aos depósitos Aluviais Cenozóicos. Nestes o nível da água subterrânea é raso. A classe de declividade referente ao intervalo de 2 - 6% ocupa a maior extensão da área de estudo (44,50%), evidenciada por um relevo suave ondulado que pode ser representado por áreas para a atividade agrícola. A classe de 6 - 12% corresponde a 35,17% da área. Este intervalo está demonstrado por um relevo moderadamente ondulado, com a presença de áreas de colinas e encostas de morro. A área representada pela classe de 12 - 18% equivalem a 7,78%. Esta classe tem um relevo ondulado que pode ser demonstrado por áreas de encostas de morros com presença de floresta nativa, a qual favorece a infiltração de águas de chuvas, portanto de recarga direta. A classe maior que 18% representada por 7,15% da área e, correspondem a um relevo forte ondulado; há áreas com presença de florestas e inadequadas ao uso e ocupação das terras. Nestas há uma ausência de captações de águas através de poços.

Tabela 2 – Classes clinográficas, área ocupada em (ha) e percentagem (%) relativa de área em cada classe.

<b>Classes clinográficas</b>	<b>Área (ha)</b>	<b>Proporção (%)</b>
0 – 2%	3.636,24	5,40
2 – 6%	29.977,16	44,50
6 – 12%	23.690,21	35,17
12 – 18%	5.241,72	7,78
401 – 500m	1.152,53	1,71
> 18%	4.817,22	7,15
<b>Total</b>	<b>67.362,55</b>	<b>100</b>

A elaboração dos mapas hipsométrico e clinográfico possibilitou a identificação dos principais compartimentos geomorfológicos encontrados na área de estudo. A análise revelou dados e informações a respeito das aptidões da terra, mostrando limites determinados pelo relevo para os diferentes usos da terra. O aumento das limitações de uma terra resulta em menor potencial para a utilização dentro da atividade escolhida, diminuindo a intensidade do uso ou até mesmo eliminando a possibilidade daquela utilização (NASCIMENTO et al., 2004).

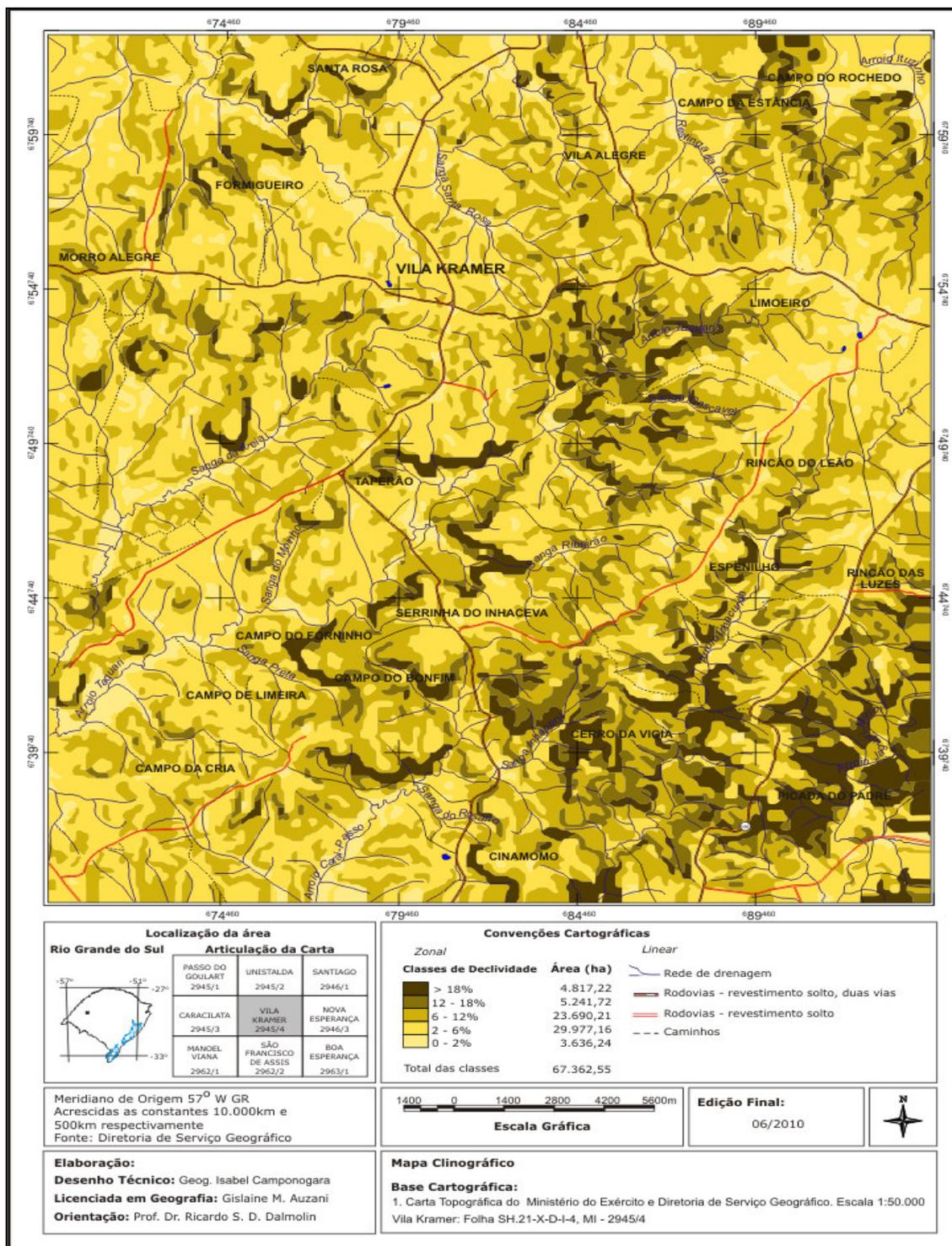


Figura 9 – Mapa da declividade do terreno da área de abrangência da carta topográfica Vila Kramer.

## 4.2 Evolução do Uso das Terras

A evolução do uso das terras, considerando os períodos de 1989, 1999 e 2009, pode ser visualizada na Tabela 3 e nas Figuras 10, 11 e 12.

Os resultados mostraram que a classe *Floresta Nativa* apresentou um decréscimo relativo entre 1989 a 2009, atualmente correspondendo a 26,32% da área estudada. Essa classe aparece associada principalmente aos locais mais íngremes da Formação Serra Geral; áreas restritas à produção e à criação extensiva de animais, áreas de encostas de morros; áreas que margeiam os rios (matas ciliares ou galeria) e áreas de nascentes. O aumento da classe *Floresta Implantada* (190% em relação a 1999) pode estar relacionado ao incentivo à plantação de eucalipto na região com a chegada de grandes empresas florestais que ocorreu na metade sul do Estado do Rio Grande do Sul.

Tabela 3 – Uso e evolução das terras em diferentes classes, para os anos de 1989, 1999 e 2009.

Uso das Terras	1989		1999		2009	
	ha	%	ha	%	ha	%
Floresta Nativa	19.917,16	29,57	20.692,52	30,72	17.730,61	26,32
Floresta Implantada	482,59	0,72	454,91	0,68	1.338,99	1,99
Campos	25.640,32	38,06	24.652,39	36,59	31.494,08	46,75
Culturas	15.288,72	22,70	17.830,94	26,47	13.664,66	20,29
Solo Exposto	3.674,96	5,45	2.561,10	3,81	1.882,32	2,80
Arenização	2.351,18	3,49	1.162,68	1,72	1.243,17	1,85
Lâmina d'água	7,62	0,01	8,01	0,01	8,72	0,01

A classe de uso *Campos* compreende as áreas cobertas por vegetação rasteira e pastagens, e as de afloramento de arenitos, portanto áreas de recarga direta. Não há muita diferença entre os anos 1989 e 1999 nessa classe de uso, sendo que em 2009 houve um aumento de 10,16% em relação à década passada. Isso está relacionado principalmente à diminuição nas áreas utilizadas com culturas e florestas nesse período, cujo decréscimo em relação a 1999 foi de 4166 ha.

Na classe denominada *Culturas* ocorre a predominância de culturas típicas de pequenas propriedades rurais, como milho, mandioca, trigo e hortifrutigranjeiros. A Sudeste da área de estudo, encontram-se lavouras de fumo com a presença de agricultura de subsistência; a Oeste e a Sudoeste ocorrem pequenas e médias propriedades com presença de lavouras de soja. Estes cultivos utilizam agroquímicos, porém não foram avaliados na pesquisa.

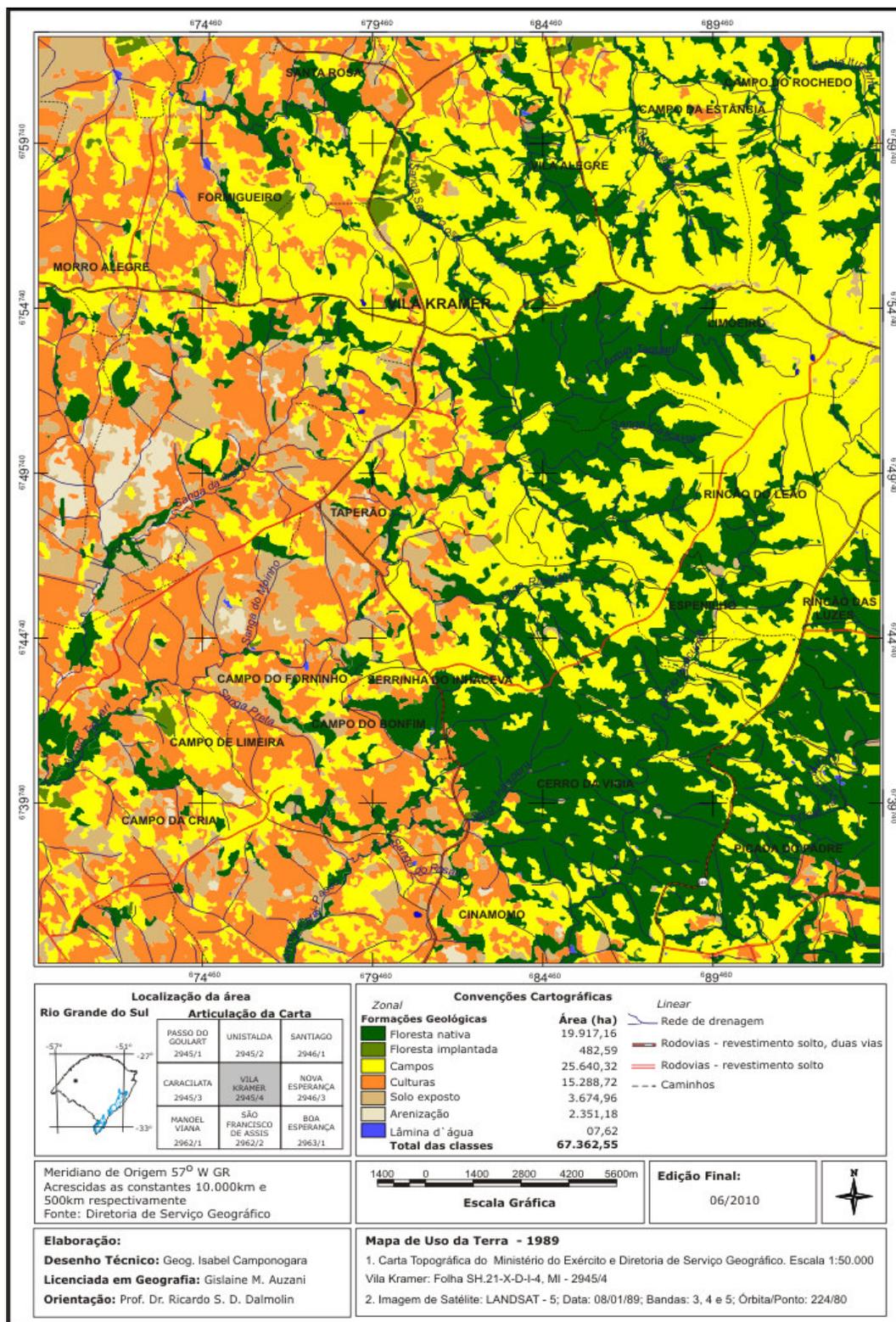


Figura 10 – Mapa de uso da terra, em 1989, da área de abrangência da carta topográfica Vila Kramer.

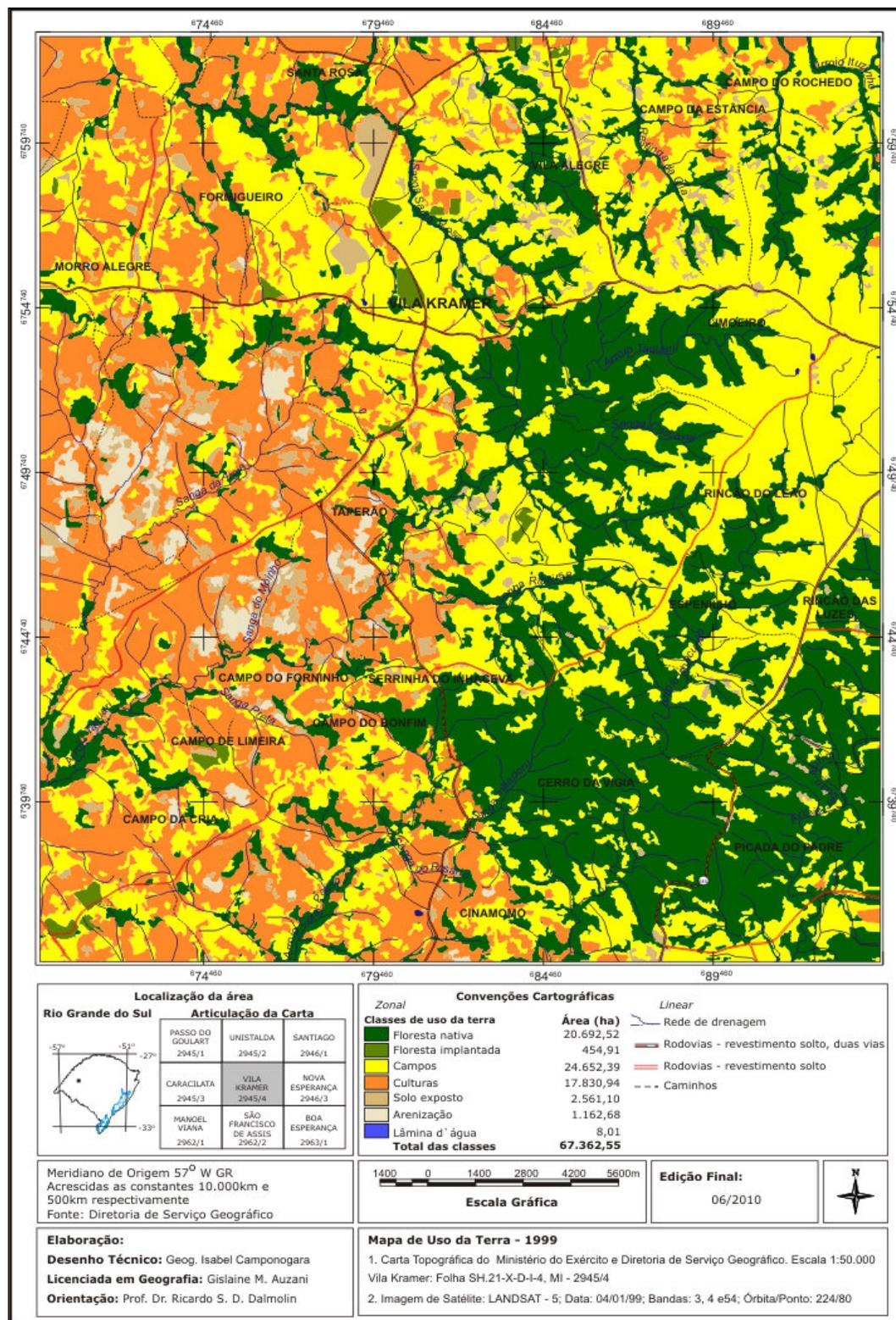


Figura 11 – Mapa de uso da terra, em 1999, da área de abrangência da carta topográfica Vila Kramer.

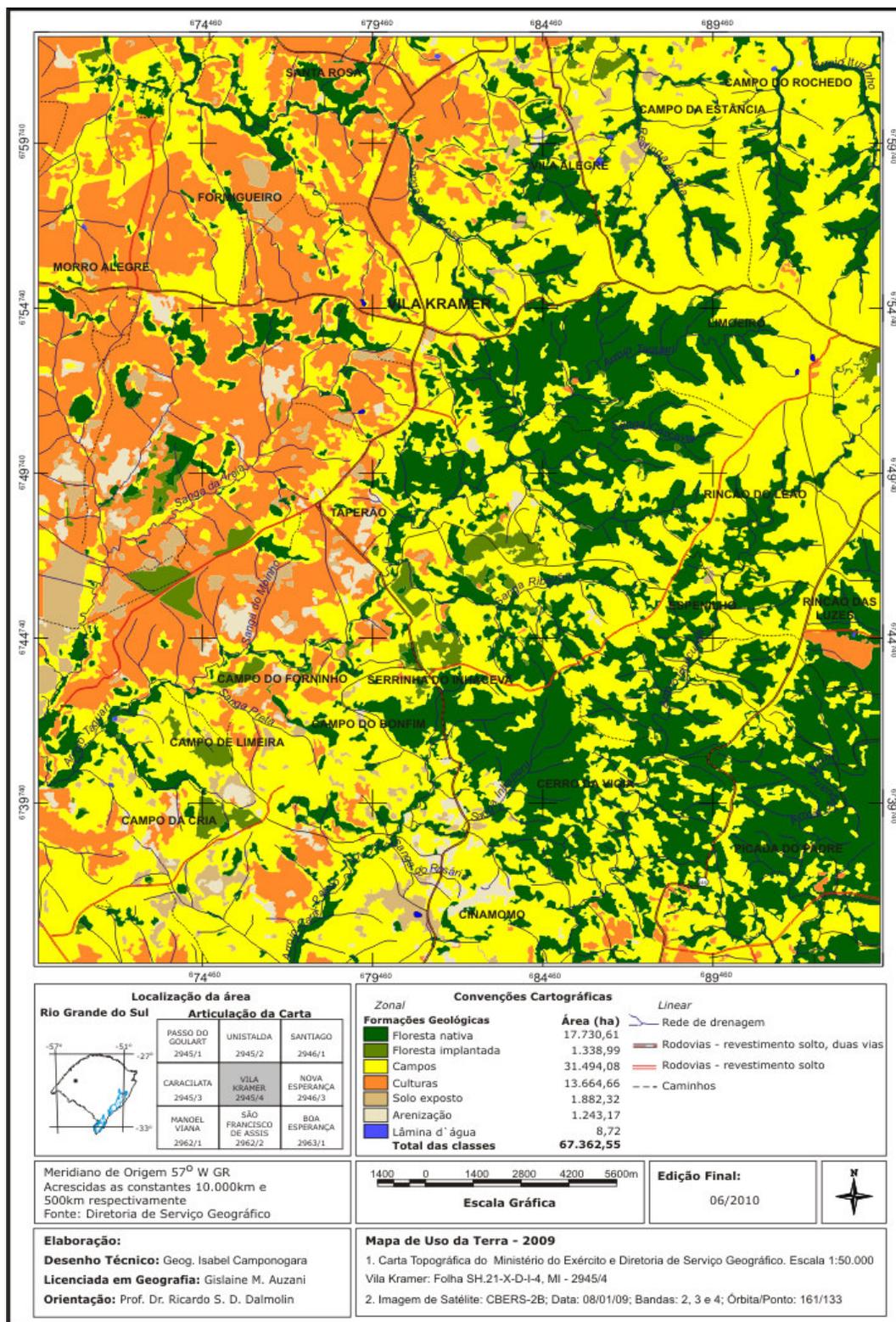


Figura 12 – Mapa de uso da terra, em 2009, da área de abrangência da carta topográfica Vila Kramer.

A classe de uso denominado *Solo exposto* apresentou um decréscimo no período de 20 anos analisados, passando de 3.675 ha em 1989 para 1.882 ha em 2009, equivalente a 2,79% da área total. Essa diminuição pode estar associada à condição de manejo do solo nessa área. Observou-se que, na região Sudeste da área, onde predomina pequenas propriedades rurais, o solo é trabalhado por meio de técnicas convencionais de revolvimento, sendo que a Oeste e Sudoeste tem-se a presença da cultura da soja, empregando técnicas de plantio direto. Poelking (2007), trabalhando no município de Itaara, relata que esse comportamento está relacionado às mudanças do sistema de manejo do solo com a adoção do plantio direto.

Na classe referente à *Arenização*, que inclui os campos de areias, ravinas e voçorocas, houve um decréscimo relativo entre 1989 e 1999 (53%) e uma aparente estabilização considerando o período 1999 - 2009. O processo de arenização tem sido amenizado através de práticas de controle da erosão e do plantio de eucaliptos. No entanto, ao longo da área de estudo, notam-se vários locais com presença de campos de areia que precisam ser melhor conduzidos para conter o avanço da expansão. A arenização é decorrente da fragilidade do sistema (rocha-solo), sendo que o mesmo pode ser acelerado pelo uso e manejo incorreto das terras, tanto para a agricultura como a pecuária extensiva. Poelking (2007) coloca que, com a expansão das fronteiras agrícolas, buscando suprir a demanda de alimento para população, muitas áreas de vegetação natural acabam por ser suprimidas abrindo espaço para atividades agropastoris. A exploração das terras é bastante intensa em função das atividades antrópicas.

Em estudo referente à degradação do solo no Sudoeste do Rio Grande do Sul, Suertegaray (1996) coloca que a degradação do solo em formas de manchas de areia (areais) é entendida como o retrabalhamento de depósitos areníticos (pouco consolidados) ou arenosos (não consolidados), que promove, nessas áreas, dificuldade de fixar a vegetação, devido à constante mobilidade dos sedimentos. Como tentativa de recuperação das áreas degradadas tem-se a introdução de novas formas de uso e ocupação da terra, destacando-se a implantação de florestas de eucaliptos e acácia negra, com objetivos econômicos e industriais. Esta prática poderá favorecer a recarga dos aquíferos livres (SAG e Depósitos Cenozóicos).

Na superfície da área ocupada por Lâmina d'água, que inclui as águas superficiais como os rios, riachos, córregos e açudes, houve um pequeno aumento da área no período 1989 - 2009. Isso decorre do aumento do número de pequenos

açudes implantados na área, oriundos da busca de captação de água especialmente para a criação do gado.

Através da utilização das geotecnologias, pode-se chegar a uma compreensão e entendimento das feições encontradas no meio físico-natural e suas relações com a ação antrópica. Os mapas temáticos elaborados serviram de base para a análise e compreensão de todo o espaço geográfico analisado e será utilizado como base para tomada de decisões e o uso correto das terras. Rocha e Seer (2008) colocam em seus estudos que a análise do espaço geográfico, através do uso de geotecnologias, tem se tornado uma prática comum em várias partes do mundo, devido à rapidez com que os resultados são obtidos, aliado ao alto grau de confiabilidade.

As imagens proporcionam, num espaço curto de tempo, informações importantes de áreas que precisam de recuperação, devido ao uso e manejo desordenado de terras, podendo assim, efetuar um planejamento correto e eficaz do espaço agrário. A classificação por regiões mostra-se uma interessante ferramenta no auxílio ao monitoramento do uso da terra, pois possibilita a separação de regiões com respostas espectrais homogêneas (POELKING, 2007). A partir do levantamento e classificação do uso das terras pode-se obter com rapidez dados e informações, em escala espaço-temporal.

#### **4.3 Áreas de Preservação Permanente (APPs)**

A delimitação automática das Áreas de Preservação Permanente (APPs) possibilitou identificar e quantificar as categorias de APPs, tendo como referência o Código Florestal Brasileiro (CFB) regulamentado pela Resolução N° 303/2002 CONAMA. Conforme o CFB das áreas de preservação não pode ser retirada a cobertura vegetal original, deixando que ela exerça suas funções naturais de proteção dos recursos naturais e assegurando o bem-estar da população e o equilíbrio ambiental. Na área de estudo, as APPs totalizaram 5.995,87ha, correspondendo a aproximadamente 8,91% da área total. Conforme Ribeiro et al. (2005), embora haja consenso, em nível mundial, de que não se pode permitir a destruição do que ainda resta das florestas nativas, o ritmo atual de desmatamento

aponta na direção oposta. A Figura 13 mostra que as maiores áreas de APPs estão localizadas junto às faixas marginais das drenagens, riachos e rios abrangendo 4.611,77ha. As áreas de APPs em nascentes e açudes corresponderam a 247,16ha, enquanto que, em áreas de APPs em topos de morro e linha de cumeada totalizaram 1.134,03ha. As áreas com declividades acima de 45° (100%) totalizaram apenas 2,91ha.



#### 4.4 Aptidão Agrícola das Terras

Na área de estudo, predominam os Neossolos Litólicos situados na Formação Serra Geral (ácida e básica), que possuem aptidão restrita, sendo indicados apenas para preservação da fauna e da flora e silvicultura e/ou pastagem natural [4p, 5N, 5n, 5(n) e 6] (Tabela 4). No restante da área, predominam os Latossolos e Argissolos situados na Formação Botucatu e Guará, os solos são mais desenvolvidos e a aptidão pode ser boa, restrita e regular [2(a)bC, 2(a)BC, 2AbC, 2abc e 3(a)BC].

Tabela 4 – Classes de solo e aptidão agrícola de uso das terras e área ocupada em cada classe (FLORES, 2009).

Classe de solo	Classe de aptidão <sup>1</sup>	Área ocupada (ha)	Proporção (%)
GXbd 1 - RLd 2 - RLd 3 - RLe 1 - RLe 6 - RLe 7 - RLe 8 - RLe 11 - RLe 12	5(n)	22.786,45	33,83
PVd 8 - PVd 9 - LVd 1	2(a)bC	12.407,08	18,42
PVd 2 - PVd 3 - PVd 11	3(a)bC	9.411,20	13,97
PVd 7 - LVd 2 - LVd 4	2(a)BC	7.670,51	11,39
RQg - RQo - AR	6	5.211,43	7,73
RLm 2 - RLm 4	4p	4.683,46	6,95
RLe 3	5n	4.231,26	6,28
CXve 1 - CXve 3	2abc	714,57	1,06
CXbe 1	2AbC	199,43	0,30
RLe 13	5N	47,16	0,07
	Total	67.362,55	100

<sup>1</sup>Aptidão agrícola das terras (Ramalho Filho & Beek, 1995): 2 - aptidão regular para lavouras; 3 - aptidão restrita para lavouras; 4 - aptidão para pastagem plantada; 5 - aptidão para silvicultura e/ou pastagem natural; 6 - terras sem aptidão agrícola, destinadas à preservação natural; (a) classe restrita de aptidão ao nível de manejo A; a - classe regular de aptidão ao nível de manejo A; b - classe regular ao nível de manejo B; (b) - classe restrita ao nível de manejo B; c - classe regular ao nível de manejo C; p - classe regular para pastagens plantadas ao nível de manejo B; N - classe boa para pastagem natural ao nível de manejo A; S - classe boa para silvicultura ao nível de manejo B.

A classe 2(a)bC identifica terras de aptidão boa para lavoura no nível de manejo C, regular no nível de manejo B e restrita no nível de manejo A. Essa classe corresponde a 18,42% da área e encontra-se no setor sul, oeste, sudoeste e

pequenas proporções a norte (Figura 14). A classe 2(a)BC abrange terras de aptidão boa para lavoura nos níveis de manejo B e C e restrita no nível de manejo A. Essa classe equivale a 11,39% da área. A classe 2AbC são terras pertencentes à aptidão boa para lavouras, nos níveis de manejo A e C e regular no nível de manejo B. Essa classe abrange pequena proporção (0,30%) da área. Já a classe 3(a)bC são terras pertencentes à classe de aptidão boa para lavoura no nível de manejo C, regular no de manejo B e restrita no nível de manejo A e é representada por 1,06% da área.

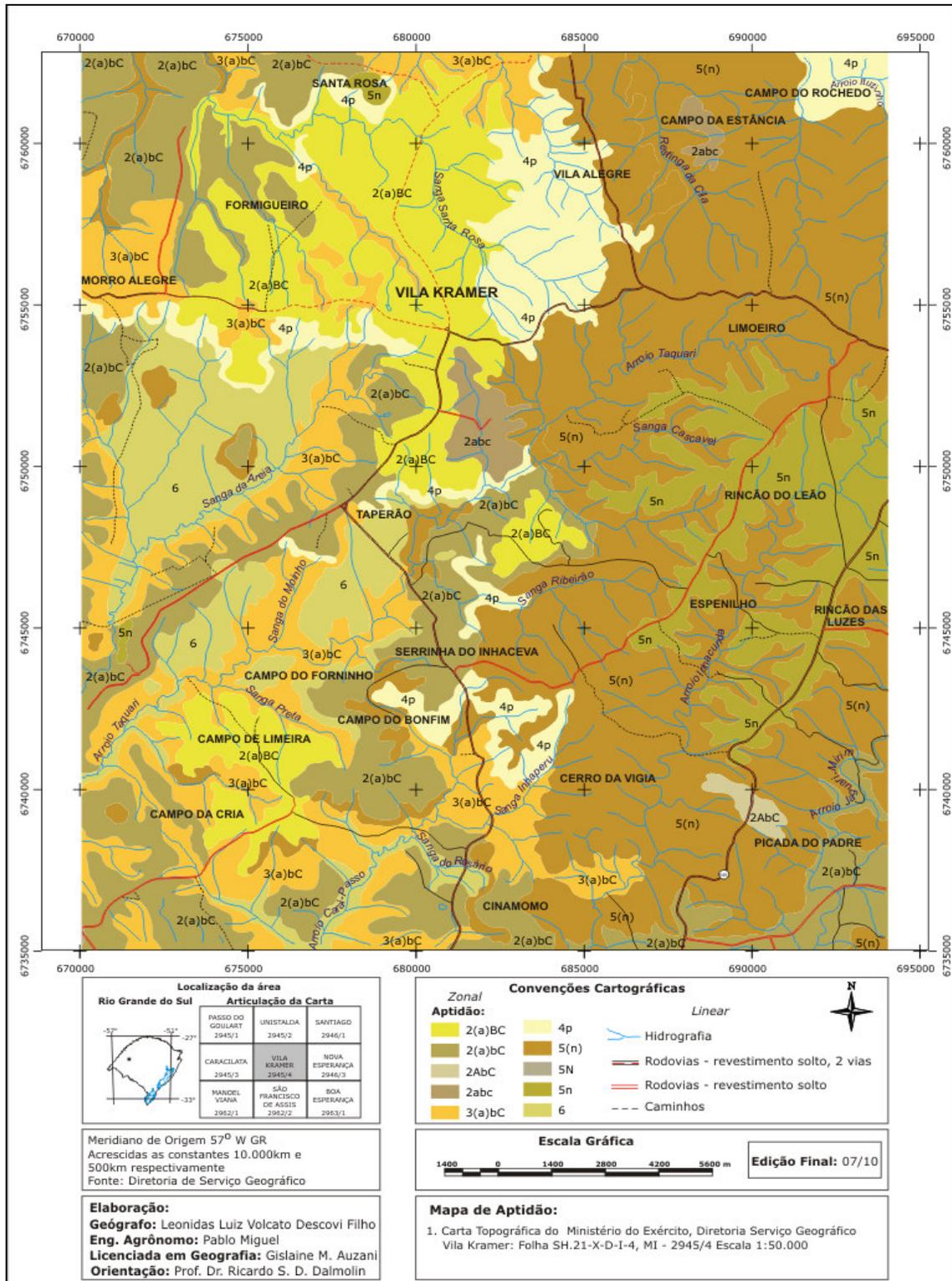


Figura 14 – Mapa aptidão agrícola das terras da área de abrangência da carta topográfica Vila Kramer.

A classe 4p são terras pertencentes à classe de aptidão regular para pastagem plantada. Essa classe encontra-se em pequenas proporções no centro e norte da área de estudo, constituídas de um relevo ondulado e forte ondulado, predominando os Neossolos Litólicos, solos rasos e pouco desenvolvidos. Segundo Streck et al. (2008) devido à pouca profundidade efetiva para o desenvolvimento das raízes e para o armazenamento de água e por ocorrerem em regiões de relevo forte ondulado e montanhoso, pedregosidade, apresentam fortes restrições para culturas anuais; em consequência disso, devem ser mantidos sob preservação permanente.

A classe 5N apresenta terras com boa aptidão para pastagem natural e inapta para silvicultura, abrangendo apenas 0,07% da área de estudo. As classes, quando apresentam um traço interrompido, indicam que pode haver classe em menor expressão, com aptidão inferior à indicada pelo símbolo. E a classe 5 (n) são terras pertencentes à classe de aptidão restrita para pastagem natural e inapta para silvicultura. Essa classe corresponde a 33,83% da área e encontra-se no setor sul, leste e norte.

A classe 6 reúne terras sem aptidão agrícola, não apresenta outra alternativa senão a preservação da natureza (RAMALHO FILHO & BEEK, 1995). Essa classe corresponde a 7,73% da área e está situada na porção oeste em direção ao centro e sul da área. Áreas em que predominam os Neossolos Quartzarênicos constituem ambientes muito frágeis, altamente suscetíveis à erosão hídrica e eólica, razão pela qual devem ser manejados com cautela (STRECK et al., 2008). Nessa classe, observa-se a presença de áreas com arenização e criação de gado. Elas são bastante vulneráveis, devido o material arenoso do solo exposto, favorecendo o avanço das areias e os processos de erosão. Conforme Streck et al. (2008) a arenização é, portanto, um processo natural nas áreas ocupadas por Neossolos Quartzarênicos, mas que foi acelerado pela excessiva lotação animal no pastejo dos campos e pela intensificação do uso de culturas anuais e práticas de manejo inadequado do solo em épocas recentes. Estas áreas são consideradas de recarga natural dos aquíferos livres (SAG e/ou Sedimentos Cenozóicos Aluviais).

#### 4.5 Adequação do Uso das Terras

O cruzamento dos mapas de uso da terra e das Áreas de Preservação Permanente (APPs) gerou o mapa de adequação de uso das terras (Figura 15). Como resultado desse produto, tem-se o aumento da área da classe 6 do mapa de aptidão agrícola das terras, onde esta classe passou a receber as APPs como classe sem aptidão para o uso agrícola. Conforme os dados da Tabela 5, a classe 6 teve um aumento de 78%, passando de 5.211,43 para 9.290,28 ha, passando a representar 13,79% da área total. A maioria das terras (41,88%) da área apresenta aptidão regular ou restrita para agricultura nos três níveis de manejo, sendo: 2(a)bC (17,82%); 2(a)BC (10,94%); 2ABC (0,30%); 2abc (0,99%); 3(a)bC (12,20%). Apenas 7,0% das terras da área apresentam aptidão regular para pastagem plantada (4p). Os níveis de manejo 5(n) (30,31%); ~~5N~~ (0,07%); 5n (6,58%) fazem uso menos nobre das terras, sendo de aptidão boa e/ou restrita para pastagem natural e inapta para silvicultura.

Tabela 5 – Classes de adequação de uso das terras, área ocupada em (ha) e percentagem (%) relativa de área em cada classe.

Classe de aptidão	Área ocupada (ha)	Proporção (%)
2(a)bC	12.005,45	17,82
2(a)BC	7.364,51	10,94
2ABC	198,43	0,30
2abc	670,52	0,99
3(a)bC	8.214,21	12,20
4p	4.718,23	7,0
5(n)	20.421,61	30,31
<del>5N</del>	47,16	0,07
5n	4.432,15	6,58
6	9.290,28	13,79
Total	67.362,55	100

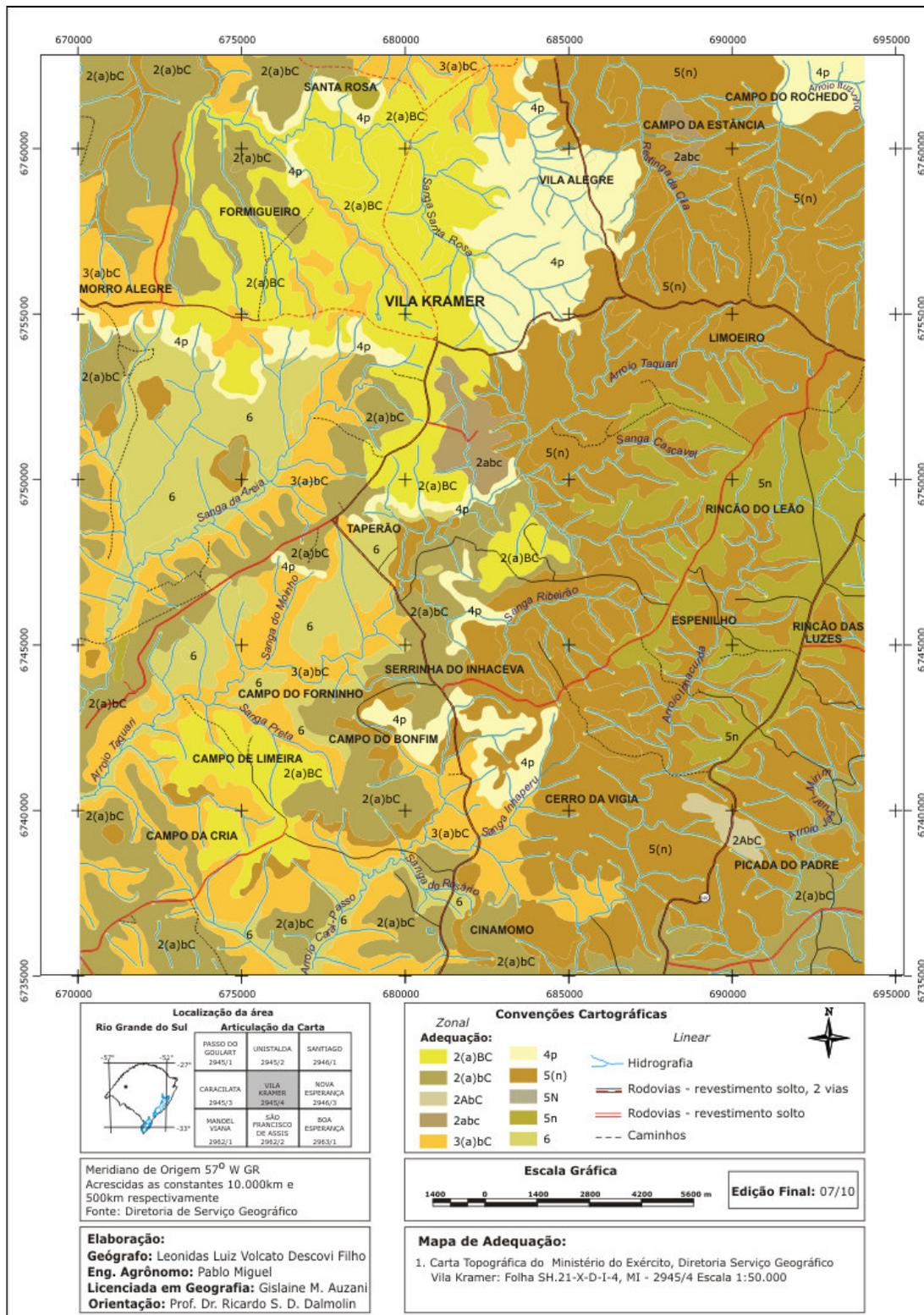


Figura 15 – Mapa de adequação de uso das terras da área de abrangência da carta topográfica Vila Kramer.

#### 4.6 Conflitos de Uso das Terras

Analisando a Tabela 6 e as Figuras 16, 17 e 18, observa-se que, para o período avaliado de 20 anos, mais da metade da área está sendo aproveitada de maneira correta. Já as terras exploradas incorretamente mantiveram seu índice, enquanto que as áreas subutilizadas tiveram um aumento no decorrer do período analisado, ou seja, com usos acima de sua capacidade de uso.

No uso correto não houve diferença significativa entre 1989 a 1999, sendo que para 2009 houve uma diminuição de 5,56 pontos percentuais em relação à década passada. As áreas que representam o uso correto das terras estão localizadas nas porções sul, sudeste, norte e nordeste da área de estudo e são constituídas de relevo acidentado da Formação Serra Geral e com o predomínio dos Neossolos Litólicos, solos rasos, com presença de florestas, campos e agricultura familiar.

Tabela 6 – Conflitos de uso das terras em 1989, 1999 e 2009 na área de abrangência da carta topográfica Vila Kramer.

Uso da terra	----- 1989 -----		----- 1999 -----		----- 2009 -----	
	ha	%	ha	%	ha	%
Uso correto	41.632	61,8	42.533	63,1	38.781	57,6
Subutilizado	17.558	26,1	16.367	24,3	20.529	30,5
Uso Incorreto	8.165	12,1	8.457	12,6	8.045	11,9
Lâmina de água	7	0,01	6	0,01	8	0,01

As áreas subutilizadas tiveram um aumento de 1989 a 2009 de 6,17 pontos percentuais, e correspondem ao setor Sul, Norte e Centro da área. Elas constituem setores das Formações Serra Geral, Botucatu e Guará, onde predominam os Neossolos Litólicos, Latossolos Vermelhos e Argissolos. Observa-se nas áreas de Formação Botucatu que o uso da terra (Figura 2) é constituído de agricultura e pecuária. Já na Formação Guará, o uso da terra é constituído de agricultura, pecuária, florestas plantadas e campos. Os solos apresentam teores médios de argila, dificultando a infiltração de água ao mesmo tempo em que pode ocorrer a

retenção de poluentes na zona vadosa, fazendo com que os contaminantes sejam retidos e não se movimentem para zonas mais profundas, as dos aquíferos.

Nas áreas consideradas de uso incorreto não houve diferença significativa nos vinte anos analisados. Observa-se que as áreas de conflitos de uso incorreto estão relacionadas com atividades agrícolas de ocupação em áreas de APPs e, que correspondem ao setor Oeste em direção ao centro delas. Predominam os Neossolos Quartzarênicos, que apresentam o horizonte A assentado sobre sedimentos muito arenosos (STRECK et al., 2008). O fato de serem áreas muito arenosas as torna mais vulneráveis e suscetíveis à erosão. Ambientes de grande fragilidade no sistema (rocha-solo) devem ser preservadas para que não aumentem os focos de arenização, devido à erosão hídrica e eólica. Segundo Streck et al. (2008), uma alternativa de uso desses solos é a silvicultura, com adoção de práticas de manejo adequadas, tais como: plantio em sulcos ou covas, e mobilização parcial da superfície.

A análise estatística mostra que não houve modificação na estrutura do uso da terra no período avaliado (Tabela 7). As alterações (aumentos e diminuições) observadas nas classes de uso não são significativas.

Tabela 7 – Teste t dos dados pareados de conflito de uso das terras entre os anos de 1989, 1999 e 2009 ( $\alpha = 0,05$ ).

Par	Média*	DP <sup>1</sup>	Erro padrão	t <sup>2</sup>	Sig. <sup>3</sup>
1989 - 1999	0,001	0,021	0,011	0,104	0,924
1999 - 2009	-0,009	0,062	0,031	-0,275	0,801
1989 - 2009	-0,007	0,042	0,021	-0,354	0,747

\* Médias dos valores percentuais transformados através da função logarítmica com base 10.

<sup>1</sup> DP: desvio padrão; <sup>2</sup> t: estatística do teste; <sup>3</sup> significância do teste bicaudal.

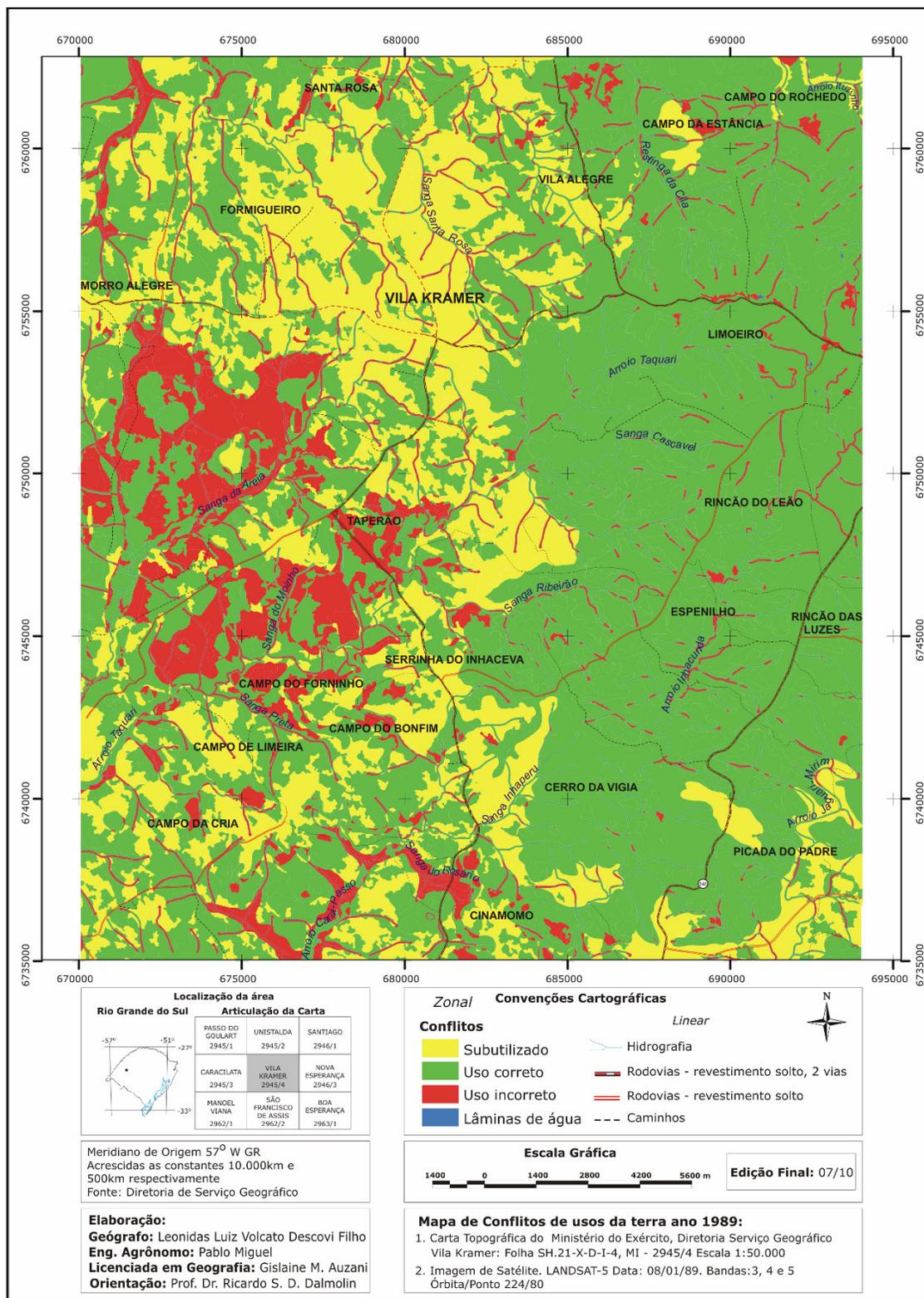


Figura 16 – Mapa de conflito de uso da terra, 1989, da área de abrangência da carta topográfica Vila Kramer.

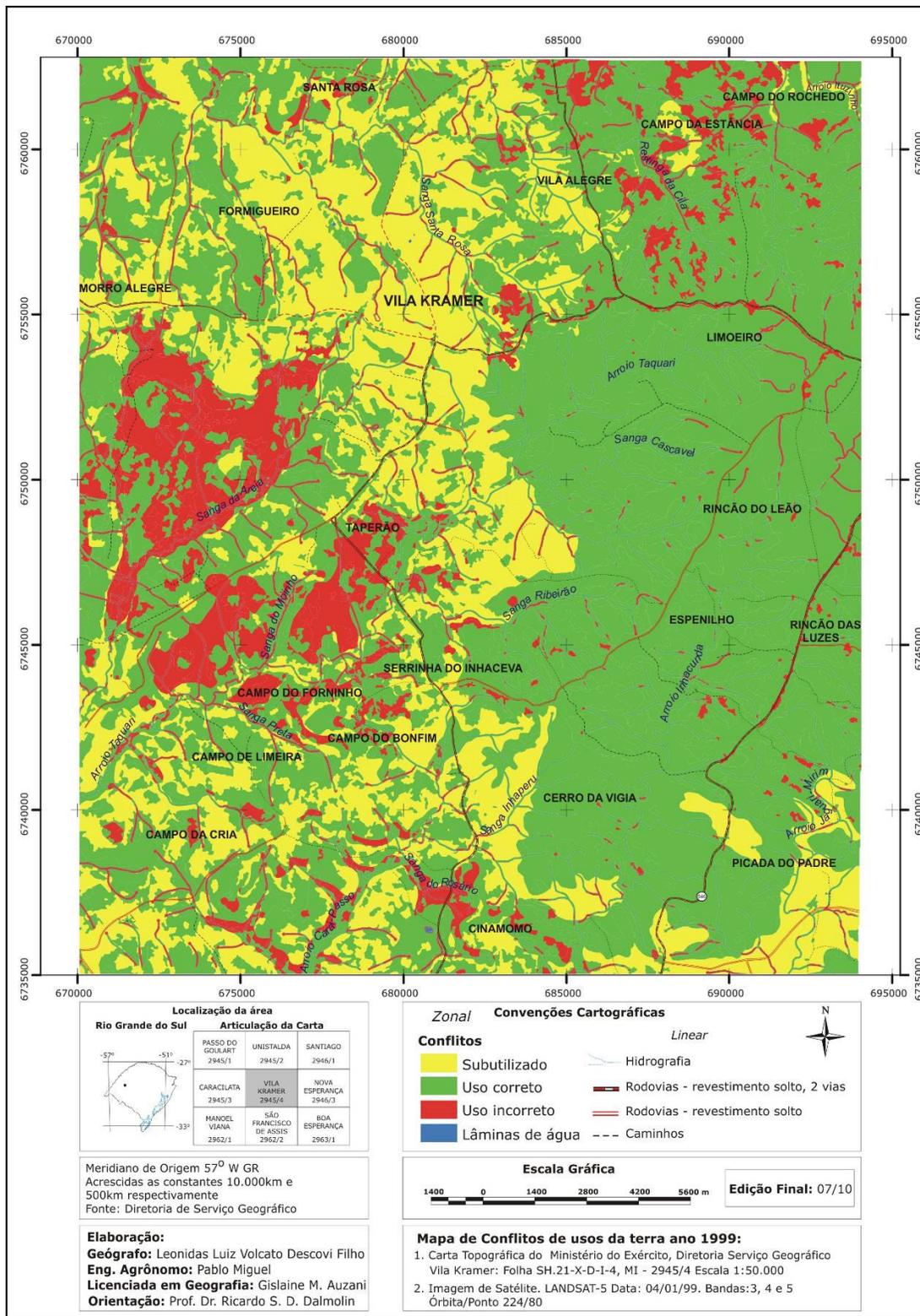


Figura 17 – Mapa de conflito de uso da terra, 1999, da área de abrangência da carta topográfica Vila Kramer.

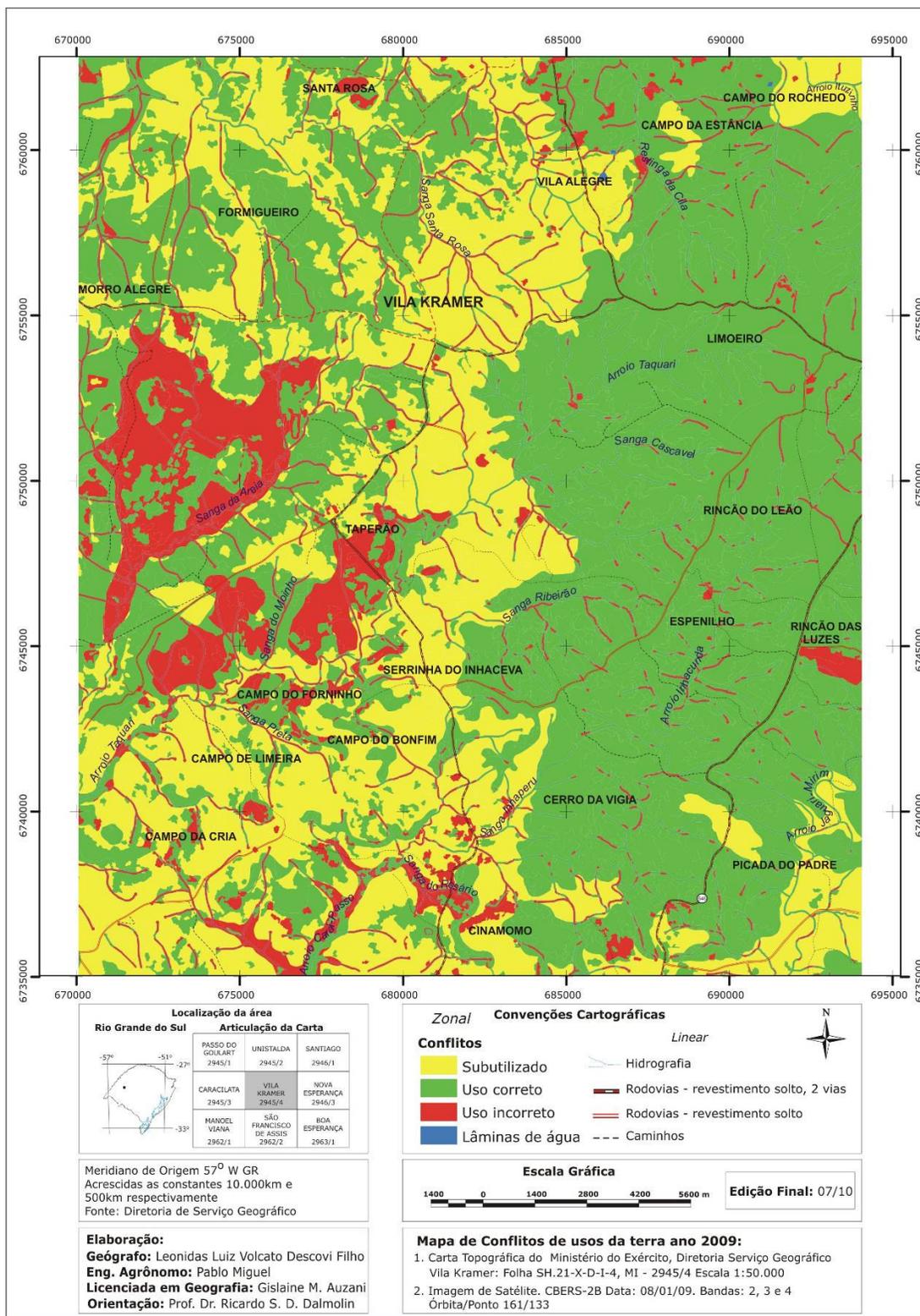


Figura 18 – Mapa de conflito de uso da terra, 2009, da área de abrangência da carta topográfica Vila Kramer.

#### 4.7 Estudo da Vulnerabilidade Natural dos Aquíferos à contaminação (DRASTIC)

Na área de estudo, as águas subterrâneas estão localizadas em dois sistemas aquíferos: fraturado/fissural (Formação Serra Geral - ácida e básica) e sedimentos arenosos porosos intergranulares (Formação Botucatu, Guará e Areias Quaternárias Aluviais). Informações mais detalhadas sobre os poços analisados nesse estudo estão descritos no Anexo 1.

A *Profundidade do Nível Estático* (D) em trinta e nove poços variou entre 0,2 e 80 metros (poços escavados e tubulares). A partir desses valores, foi realizado o cálculo referente ao índice de profundidade, no qual foram obtidos índices entre 5, 10, 15, 25, 35, 45, 50, a partir da multiplicação dos índices Dp e Dc. No Quadro 13, podem-se verificar os intervalos do nível estático de cada poço e o respectivo valor da carga no seu intervalo e os índices de profundidade. Nota-se que essa variação está expressa conforme o parâmetro avaliado com intervalos menores dos níveis estáticos. Os poços mais vulneráveis estão nos níveis estáticos menos profundos, sujeitos à contaminação proveniente do uso da terra, principalmente pela agricultura e pecuária. Nos índices mais profundos, a vulnerabilidade se torna menos expressiva, pois a infiltração ocorre de forma indireta até atingir o sistema aquífero no qual possíveis contaminantes podem ser atenuados.

Intervalos do Nível Estático (m)	Poços	Peso (Dp)	Valor Atribuído (Dc)	Índices de Profundidade
0 - 1,5	P5; P13; P14; P19; P21; P25.	5	10	50
1,5 - 4,6	P1; P2; P3; P9; P16; P17; P23; P29; P33.	5	9	45
4,6 - 9,1	P6; P18; P26; P27; P28.	5	7	35
9,1 - 15,2	P7; P8; P20; P39.	5	5	25
15,2 - 22,9	P11; P24; P30; P35; P36.	5	3	15
22,9 - 30,5	P10; P12.	5	2	10
> 30,5	P4; P15; P22; P31; P32; P34; P37; P38	5	1	5

Quadro 13 – Nível Estático dos poços nos intervalos e seus respectivos valores do peso (Dp) e dos valores atribuídos (Dc) com o índice da profundidade (Dp x Dc).

De acordo com o mapa elaborado do nível estático dos poços (Figura 19), há um intervalo do nível de (0) até (> 40) metros de profundidade. Nota-se que o maior número de poços encontra-se no intervalo (0 - 10m), áreas com níveis estáticos pouco profundos e com maior vulnerabilidade devido à proximidade do nível com a superfície do terreno.

Observa-se que as áreas que apresentam maiores índices de variação do nível estático (>40m) estão localizadas geograficamente a Sudoeste (Careipaco), Oeste (Localidade de Monte Alegre), Leste (Localidade do Espinilho), Sudeste (Picada do Padre) e ao Norte (Localidade Santa Rosa). O tipo de substrato e unidade geológica variam nessa profundidade. Conforme o mapa geológico (Figura 2), as unidades geológicas presentes nessa profundidade são: Formação Serra Geral (Fácies Caxias e Gramado), Formação Botucatu e Formação Guará.

As unidades geológicas caracterizam-se por uma expressiva variação litológica com intercalações de níveis mais ou menos permeáveis, o que lhe confere parâmetros hidrogeológicos distintos, de acordo com a realidade de cada local. A recarga dos aquíferos acontece através da precipitação pluviométrica e provavelmente da contribuição do escoamento de base dos rios em períodos de estiagem.

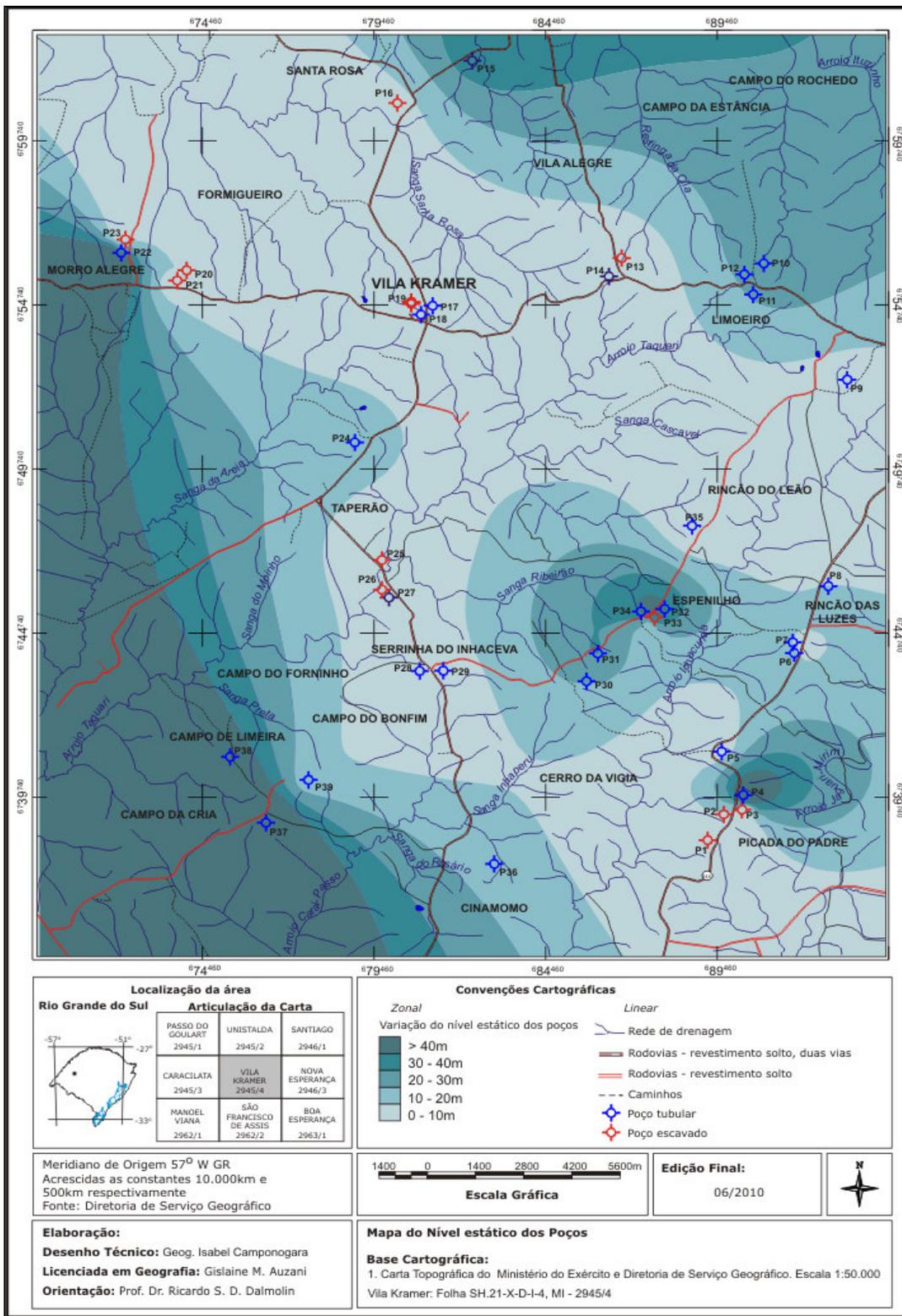


Figura 19 – Mapa do Nível Estático dos poços da área de abrangência da carta topográfica Vila Kramer.

Em relação à *Recarga* (R), o resultado indicado no Quadro 14 refere-se ao intervalo em mm/ano. Na área de estudo, a precipitação média anual é bem distribuída, com índices pluviométricos variando de 1.400 mm a 1.600 mm/ano. Observa-se que na área ocorre um intervalo de recarga entre 51,85 -103,7 mm/ano, cujo peso desse parâmetro é 4 e o valor atribuído da carga é 3, estabelecendo-se um índice da recarga igual a 12. Nota-se que esse índice é considerado alto, pois quanto maior for a recarga, maior será o volume de água a atingir o aquífero e maior o transporte de poluentes, dependendo das atividades poluidoras da superfície. Portanto, a água, ao infiltrar no solo/rocha, irá percolar pelas zonas na subsuperfície, passando pela zona vadosa até atingir a zona saturada, podendo nesse momento, contribuir para o transporte de contaminantes provenientes das atividades antrópicas, tais como o cultivo de fumo e soja.

<b>Intervalo de recarga em polegadas</b>	<b>Intervalo de recarga em mm/ano</b>	<b>Peso (Rp)</b>	<b>Valor Atribuído (Rc)</b>	<b>Índices da recarga</b>
4 – 7	51,85 -103,7	4	3	12

Quadro 14 – Recarga total anual e seus respectivos valores do peso (Rp) e dos valores atribuídos (Rc) com o índice da profundidade (Rp x Rc).

O *Meio Aquífero* (A) foi classificado segundo as formações geológicas e hidrogeológicas formadoras do aquífero, que remete às condições do meio físico-natural, ou pode-se associar aos tipos de aquíferos (confinado ou não confinado/livre). No Quadro 15, podem ser visualizados os valores obtidos para o meio aquífero com seus respectivos valores. Os dados revelam, na área de estudo, a presença de aquíferos confinados, Formação Serra Geral (Sequência Superior, Fácies Caxias e Sequência Inferior, Fácies Gramado), e não-confinados/livre, Formação Botucatu e Formação Guará.

Esta última recebeu valor atribuído de carga 4, ou seja, o menor valor em relação às demais formações devido à presença de arenito maciço muito fino ou siltito, e é constituída de rochas sedimentares de origem fluvial. Conforme Maciel Filho (1990), em relação ao comportamento hidrogeológico essa formação possui permeabilidade moderada e baixa com aquíferos de baixa produção exploráveis

apenas por poços escavados. Nessa formação foram considerados 3 poços tubulares e 2 poços escavados.

<b>Tipo de aquífero</b>	<b>Faixa de variação (carga)</b>	<b>Poços</b>	<b>Peso (Ap)</b>	<b>Valor atribuído (Ac)</b>	<b>Índice do Aquífero</b>
Arenito maciço (Guará)	4 - 9	P25; P26; P27; P36; P39.	3	4	12
Arenito maciço (Botucatu)	4 - 9	P9; P15; P16; P20; P21; P23; P24; P28.	3	6	18
Basalto fraturado (Serra Geral)	2 - 10	P1; P2; P3; P4; P5; P6; P7; P8; P10; P11; P12; P13; P14; P17; P18; P19; P22; P29; P30; P31; P32; P33; P34; P35; P37; P38.	3	5	15

Quadro 15 – Valores obtidos para o Meio Aquífero com os seus respectivos valores do peso (Ap) e dos valores atribuídos (Ac) com o índice da profundidade (Ap x Ac).

A Formação Botucatu recebeu nota 6 (carga). Essa unidade apresenta alta permeabilidade e porosidade, constituída de arenitos finos a médios, de origem eólica, apresentando facilidade em transportar contaminantes para a subsuperfície. A vulnerabilidade é considerada alta devido à permeabilidade e há porosidade da unidade geológica. Nessa formação, encontram-se 8 poços (4 tubulares e 4 escavados).

A Formação Serra Geral recebeu valor atribuído de carga 5. Essa unidade é constituída de rochas vulcânicas básicas e ácidas, com presença de basaltos fraturados formando aquíferos fissurais. A maioria dos poços da área encontra-se nessa unidade geológica, sendo 26 poços (20 tubulares e 6 escavados). Para este parâmetro, o valor atribuído levou em consideração toda a formação geológica no qual estava inserido o poço. Segundo Maciel Filho (1990), a permeabilidade desta unidade é fissural. Nestas condições, a água pode se deslocar com relativa facilidade através das fraturas. Este aquífero, porém, tem pouca capacidade de armazenamento, a qual fica limitada ao espaço fraturado entre os blocos de rocha.

Percebe-se que a maioria dos poços encontra-se num aquífero do tipo confinado, da Formação Serra Geral. Portanto, esse aquífero apresenta capacidade

mínima de infiltração e armazenamento de água para a subsuperfície, quando forma Litossolos (ex. poço nº 5, nº. 18) Anexo 1 e Figura 20.

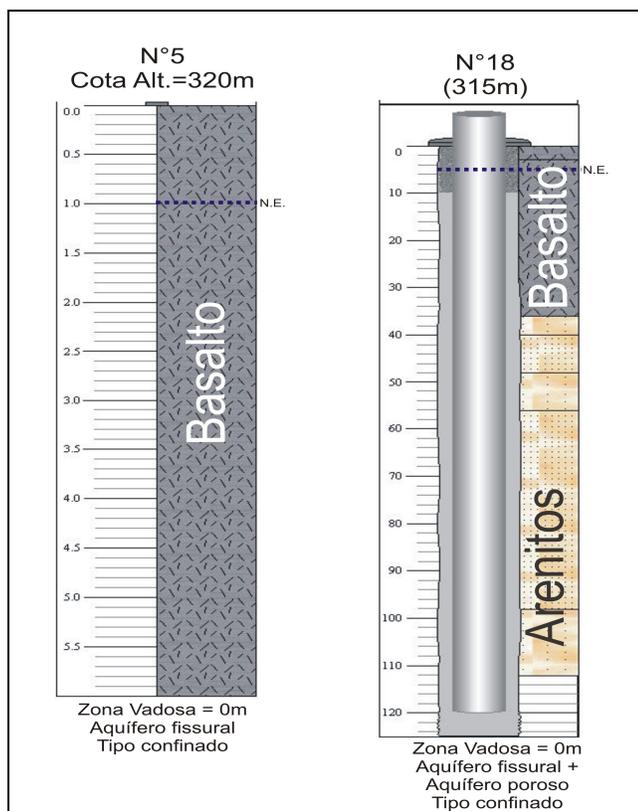


Figura 20 – Exemplos de poços num aquífero do tipo confinado, da Formação Serra Geral.

Fonte: CPRM/SIAGAS (2010) adaptados por Auzani (2010).

Para o fator *Solos* (S), levou-se em consideração o mapa confeccionado por Flores (2009). Foram atribuídas cargas às diferentes classes de solos, levando em consideração atributos como a caracterização granulométrica das rochas e/ou produtos de alteração, frações de areia, silte e argila.

No Quadro 16, encontram-se as classes de solos da área de estudo, na escala de 1:50.000 e os respectivos valores: peso ( $S_p$ ), carga atribuída ( $S_c$ ) e o índice para os solos ( $S_p \times S_c$ ).

A classe dos Argissolos apresenta parâmetros distintos conforme o seu substrato. A classe Argissolo Vermelho Distrófico abrupto A moderado textura

arenosa/média (PVd3) recebeu carga igual a 5. Esse solo apresenta uma textura arenosa no horizonte A e média no horizonte B, apresentando boa infiltração de água. Nessa classe encontra-se apenas um poço, o P15 (Localidade de Santa Rosa). A classe Argissolo Vermelho Distrófico abrupto A proeminente com textura média/argilosa (PVd2) recebeu carga igual a 4, pois apresenta um maior teor de argila, sendo média no A e argilosa no B. Dois poços estudados encontram-se nessa classe de solo: o P22 (tubular) e P23 (escavado), na Localidade de Monte Alegre. Esses poços apresentam um nível da água bem distinto, sendo que o P22 encontra-se na unidade geológica de Serra Geral/ Botucatu, enquanto que o P23 encontra-se numa altitude menor e na unidade geológica Botucatu. Esse fato condiciona o nível da água, sendo que em P22 o nível está na profundidade de 77m e P23 na de 3,25m. A classe Argissolo Vermelho Distrófico típico A proeminente textura argilosa (PVd7) recebeu a menor carga 3. Isso se deve ao fato de este solo apresentar um maior teor de argila (textura argilosa no A e no B) e conseqüentemente, baixa permeabilidade. Nessa classe de solo encontram-se os poços P17, P18, P19 e P24.

A unidade PVd11 é uma associação de solos (Figura 3) composta pelas classes Argissolo Vermelho Distrófico abrupto textura arenosa/média + Neossolo Quartzarênico Órtico típico, ambos com A moderado. Nessa unidade encontram-se 3 poços: P26, P27 (próximo do rio Taquari) e o P36 (Localidade do Cinamomo). Essa unidade recebeu carga igual a 6, devido à presença dos Neossolos Quartzarênicos que apresentam elevada infiltração e baixo poder de inertização, o que os torna muito suscetíveis a carregar contaminantes para o sistema aquífero.

A classe Cambissolo Háptico Tb Eutrófico típico A chernozêmico textura argilosa (CXbe1) recebeu uma carga igual a 3. Nessa classe encontram-se 2 poços, P2 e P3 (Localidade da Picada do Padre). Ambos são poços escavados e apresentam um nível de água próximo da superfície. Devido à textura argilosa desse solo, o mesmo teria a capacidade de atenuar o potencial tóxico de poluentes em caso de infiltração.

A classe Gleissolo Háptico Tb Distrófico típico textura média fase campo subtropical de várzea relevo plano (GXbd1) apresenta apenas 1 poço (P25, escavado) na Localidade de Taperão e recebeu carga igual a 4, por ser um solo medianamente profundo e apresentar textura média.

A classe Latossolo Vermelho Distrófico típico A moderado textura média fase campo subtropical relevo suave ondulado (LVd1) recebeu carga igual a 4. Estes

solos apesar de profundos e bem estruturados, apresentam textura média e baixa CTC. De acordo com Streck et al. (2008), esses solos são originados de arenito, portanto de textura mais arenosa e muito susceptíveis à erosão. Nessa classe ocorre apenas um poço, o P20 (Localidade de Formigueiro). O LVd1 foi, entre os Latossolos, o que recebeu a carga maior por ser mais arenoso que os demais e, conseqüentemente, com maior poder de permitir a passagem dos contaminantes para a subsuperfície e assim difundir. Os demais Latossolos da área (LVd2 e LVd4, Figura 3) receberam carga igual a 3, principalmente por apresentarem textura argilosa. Na área do LVd2 encontra-se um poço (P21, na Localidade de Formigueiro) e na área do LVd 4, 3 poços (P16, na localidade de Esquina Santa Rosa e o P37 e P38 na localidade de Careipaco).

Os Neossolos Litólicos ocorrem na área, em unidades de mapeamento simples (RLe1 e RLd2, Figura 3), e também as associações Neossolos Litólicos + Cambissolos Háplicos (RLe6 e Rle11). Os Neossolos litólicos RLe1, RLe6 e RLe11 receberam carga 8 (textura média) e o RLd2, 7 (textura argilosa). Essa carga elevada foi atribuída a esses solos tendo como parâmetro a presença de Neossolos Litólicos que são solos rasos e, conseqüentemente, com poder de filtro (inertização) muito baixo. Na área do RLd2 encontram-se 5 poços (P10, P11, P12, P13 e P14, na Localidade do Limoeiro), na do RLe1 encontram-se 6 poços (P5, na Localidade da Picada do Padre; P6, P7, P9, na Localidade de Rincão das Luzes; e P32 e P33, no Espinilho). Na área do RLe6 encontra-se um poço (P30, na Localidade do Espinilho) e na área do RLe11 encontram-se 6 poços (P1, P4, na Localidade da Picada do Padre; P8, na Localidade de Rincão das Luzes; P31, P34, P35, na Localidade de Espinilho).

Em relação ao fator *Solos* (S), o mapa de escala 1:1.000.000 abrangeu três classes de solos, sendo: Latossolos, Nitossolos e Neossolos Litólicos (RLd e RLe). No Quadro 17 encontram-se as classes de solos da área de estudo, na escala de 1:1.000.000 e os respectivos valores: peso (Sp), carga atribuída (Sc) e o índice para os solos (Sp x Sc).

Classes de solos	Poços	Peso (Sp)	Valor atribuído (Sc)	Índice dos solos
PVd2	P22; P23	2	4	8
PVd3	P15	2	5	10
PVd7	P17; P18; P19; P24	2	3	6
PVd9	P28; P29; P39	2	4	8
PVd11	P26; P27; P36	2	6	12
CXbe1	P2; P3	2	3	6
GXbd1	P25	2	4	8
LVd1	P20	2	4	8
LVd2	P21	2	3	6
LVd4	P16; P37; P38	2	3	6
RLd2	P10; P11; P12; P13; P14	2	7	14
RLe1	P5; P6; P7; P9; P32; P33	2	8	16
RLe6	P30	2	8	16
RLe 11	P1; P4; P8; P31; P34; P35	2	8	16

Quadro 16 – Classes de solo, na escala 1:50.000, poços e respectivos valores do peso (Sp) e dos valores atribuídos (Sc) com o índice para os solos (Sp x Sc).

O maior número de poços (19) se enquadraram nos Neossolos Litólicos Distrófico típico (RLd) e recebeu carga igual a 7. Essa carga foi atribuída tendo como parâmetro a presença de Neossolos Litólicos, que são solos rasos de formação recente e com baixo poder de filtro. Nos Neossolos Litólicos Eutrófico típico (RLe) encontram-se 2 poços: P1 (escavado, Localidade de Picada do Padre) e P29 (tubular, Localidade de Serrinha do Inhaceva) receberam uma carga 8, devido a apresentar uma textura média. Nos Latossolos Vermelho Distrófico típico (LVd) encontram-se 15 poços e receberam carga igual a 4. Na classe dos Nitossolos Vermelho Eutrófico Chernossólico (NVe) encontram-se 3 poços: P17, P18 e P19 receberam uma carga de 4. Essa carga foi atribuída tendo como parâmetro as características físicas mencionadas por Streck et al. (2008): solos profundos, bem drenados, muito porosos, friáveis, bem estruturados. Este solo apresenta boa permeabilidade, caracterizando-se por deixar a água infiltrar e percolar facilmente pela subsuperfície até atingir o aquífero. Entretanto, a carga contaminante pode infiltrar junto com a água e contaminar o aquífero.

Classes de solos	Poços	Peso (Sp)	Valor atribuído (Sc)	Índice dos solos
LVd	P15; P16; P20; P21; P22; P23; P24; P25; P26; P27; P28; P36; P37; P38; P39.	2	4	8
NVe	P17; P18; P19.	2	4	8
RLd	P2; P3; P4; P5; P6; P7; P8; P9; P10, P11; P12, P13; P14; P30, P31, P32, P33, P34, P35	2	7	14
RLe	P1; P29.	2	8	16

Quadro 17 – Classes de solo, na escala 1:1.000.000, poços e respectivos valores do peso (Sp) e dos valores atribuídos (Sc) com o índice para os solos (Sp x Sc).

O fator *Topografia* (T) foi obtido através do mapa de declividade (Figura 9). Esse fator é importante devido à recarga de água para a subsuperfície: quanto menor a declividade, maior a probabilidade de infiltração de água, como também dos contaminantes no solo. Quanto mais acentuado for o relevo, menor será a infiltração e maior o escoamento superficial.

No Quadro 18 encontram-se os valores obtidos para as classes de declividade com os seus respectivos valores: peso (Tp), carga (Tc) e o índice da topografia (Tp x Tc). A classe de declividade de 0 - 2%, que representa 5,40% da área de estudo, recebeu uma carga igual a 10. Nesse intervalo encontram-se apenas 3 poços, estando localizados nas proximidades de cursos d'água. Portanto, a probabilidade de contaminação desses poços pode ser maior em função de a declividade ser baixa. A declividade é um fator importante para a recarga dos aquíferos, pois em declividades menores o processo de infiltração ocorre com maior intensidade. Em contrapartida, nas declividades maiores há maior escoamento superficial e, conseqüentemente, menor a infiltração (CAMPONOGARA, 2006). No intervalo de 2 - 6% encontra-se o maior número de poços, 22, e a carga atribuída foi igual a 9. Esse intervalo apresenta 44,50% da área estudada e é representado por um relevo suave ondulado, com predomínio de atividades agrícolas e criação de gado. Nessas declividades moderadas, a água da chuva infiltra rapidamente, podendo carregar contaminantes para a subsuperfície até atingir os aquíferos. O intervalo de 6 - 12% apresenta uma área de 35,17% onde encontram-se 14 poços,

cuja carga atribuída corresponde a 5. Esse intervalo está representado por um relevo ondulado.

Nos intervalos de declividades 12 - 18% e acima de 18%, não ocorrem poços. Isso deve-se ao fato de que essas áreas apresentam relevo forte ondulado a montanhoso.

<b>Declividade (Topografia)</b>	<b>Poços</b>	<b>Peso (Tp)</b>	<b>Valor atribuído (Tc)</b>	<b>Índice da topografia</b>
0 - 2%	P12; P15; P25.	1	10	10
2 - 6%	P2; P3; P5; P7; P9; P10; P11; P16; P17; P18; P19; P20; P21; P28; P29; P30; P32; P33; P35; P37; P38; P39.	1	9	9
6 - 12%	P1; P4; P6; P8; P13; P14; P22; P23; P24; P26; P27; P31; P34; P36.	1	5	5

Quadro 18 – Valores obtidos para as classes de declividade com os seus respectivos valores do peso (Tp) e dos valores atribuídos de carga (Tc) e o índice da topografia (Tp x Tc).

O *Impacto da Zona Vadosa (I)* constitui-se na zona não saturada, que é encontrada abaixo da porção inferior do solo, rocha sedimentar ou rocha intemperizada. Esse parâmetro foi classificado segundo as Formações Geológicas da área de estudo, atribuindo as cargas conforme a faixa de variação (carga).

No Quadro 19 encontram-se os valores obtidos para o impacto da zona vadosa com os seus respectivos valores: peso (Ip), carga atribuída (Ic) e o índice do aquífero (Ip x Ic). Os resultados mostram que o tipo de material presente nessa zona vai condicionar a infiltração da água para as zonas mais inferiores até atingir o aquífero.

A Formação Botucatu corresponde à área com presença de arenitos e recebeu uma carga igual a 6. Essa unidade apresenta rochas permeáveis e porosas; portanto, está mais sujeita ao carregamento e movimentação de contaminantes para o sistema aquífero. Nessa formação foram cadastrados e analisados 8 poços (4 tubulares e 4 escavados). Os poços escavados apresentaram uma variação do nível

estático entre 1,34 a 11,14 metros de profundidade, enquanto que nos poços tubulares a variação foi de 3,35 a 15,6.

A Formação Guará foi enquadrada no tipo de material constituído de areia e silte com significante matriz sílica ou argilosa; apresenta infiltração de água para a subsuperfície baixa e a carga atribuída foi de 4. Nessa unidade geológica ocorre um número baixo de poços (3 tubulares e 2 escavados).

No caso das rochas vulcânicas da Formação Serra Geral, o basalto apresenta fraturas, vesículas e amígdalas. Nota-se que nessa unidade encontram-se o maior número de poços (20 tubulares e 6 escavados), e que recebeu uma carga igual a 5. Os basaltos são rochas bastante coesas e cimentadas. Portanto, formam os aquíferos confinados onde dificilmente ocorrerá a infiltração de contaminantes para a subsuperfície. Na área de estudo ocorre a presença de rochas fraturadas com amígdalas e vesículas, sendo que isso favorece a infiltração de água para a subsuperfície. Deve-se lembrar que em algumas áreas ocorrem diferentes graus de intemperização das rochas podendo formar aquíferos livres.

<b>Tipo do material</b>	<b>Faixa de variação (carga)</b>	<b>Poços</b>	<b>Peso (lp)</b>	<b>Valor atribuído (lc)</b>	<b>Índice do Aquífero</b>
Areia e silte com significante matriz sílica ou argilosa (Guará)	4 - 8	P25; P26; P27; P36; P39.	5	4	20
Arenito (Botucatu)	2 - 7	P9; P15; P16; P20; P21; P23; P24; P28.	5	6	30
Basalto (fraturas, amígdalas, vesículas).	2 - 10	P1; P2; P3; P4; P5; P6; P7; P8; P10; P11; P12; P13; P14; P17; P18; P19; P22; P29; P30; P31; P32; P33; P34; P35; P37; P38.	5	5	25

Quadro 19 – Valores obtidos para o Impacto da Zona Vadosa com os seus respectivos valores do peso (lp) e dos valores atribuídos (lc) com o índice do aquífero (lp x lc).

A *Condutividade Hidráulica* (C) foi levada em consideração, estudos já realizados, como os de Camponogara (2006), dizem que, nos arenitos da Formação Botucatu e nos sedimentos Cenozóicos (aluviões), a condutividade hidráulica é

maior 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.

No Quadro 20, observam-se os valores obtidos para condutividade hidráulica com os seus respectivos valores: peso ( $C_p$ ), valores atribuídos de carga ( $C_c$ ) e o índice da condutividade hidráulica ( $C_p \times C_c$ ). Os resultados mostram que a carga atribuída para os intervalos de coeficiente de infiltração m/dia foi 0-4m/dia recebeu uma carga igual a 1.

Coeficiente de infiltração m/dia	Peso ( $C_p$ )	Valor atribuído ( $C_c$ )	Índice da Condutividade Hidráulica
0 – 4	3	1	3

Quadro 20 – Valores obtidos para Condutividade Hidráulica com os seus respectivos valores do peso ( $C_p$ ) e dos valores atribuídos ( $C_c$ ) com o índice da condutividade hidráulica ( $C_p \times C_c$ ).

A partir dos resultados obtidos através dos sete parâmetros analisados na aplicação da metodologia DRASTIC, levando-se em consideração o fator S na escala de 1:50.000, pode-se elaborar o mapa da vulnerabilidade natural dos aquíferos da área de estudo (Figura 21). Com base na análise e nas informações das classes de vulnerabilidade expressas no Quadro 21, notaram-se três classes de vulnerabilidade para área, sendo elas: área vulnerável, área muito vulnerável e área extremamente vulnerável. As informações relacionadas à aplicação da Metodologia DRASTIC encontra-se nos Anexos 2 e 3.

Grau de vulnerabilidade	Intervalos dos índices DRASTIC	Poços
Área vulnerável	65 – 95	P4; P10; P11; P12; P15; P22; P24; P30; P31; P32; P34; P35; P36; P37; P38; P39.
Área muito vulnerável	95 – 120	P2; P3; P6; P7; P8; P17; P18; P19; P20; P25; P26; P27; P28; P29.
Área de proteção obrigatória (Extremamente vulnerável)	> 120	P1; P5; P9; P13; P14; P16; P21; P23; P33.

Quadro 21 – Classes de vulnerabilidade, onde o Fator S foi representado pela escala 1:50.000 e seus respectivos intervalos.

A classe referida como *área vulnerável* encontra-se na faixa de 65 - 95. Nessa classe de vulnerabilidade encontra-se a maioria dos poços, 16. Nesse intervalo, todos os poços são tubulares e encontram-se localizados na Formação Serra Geral (12), Botucatu (3) e Guará (1). Eles geralmente têm o nível de água mais profundo e o material pode ser constituído de areia, silte e argila e rochas fraturadas; portanto, sua espessura e os tipos de materiais são os que condicionam a pouca infiltração de água para a subsuperfície, dificultando a movimentação de poluentes.

A classe considerada *área muito vulnerável* corresponde ao intervalo de 95 - 120. Quanto à distribuição dos poços, encontram-se 14 poços. As condições de infiltração da água acontecem de maneira mais rápida, devido aos solos serem constituídos de textura mais arenosa e com a presença de rochas fraturadas (vesículas e amígdalas), favorecendo a percolação da água e o carregamento de contaminantes.

As áreas consideradas *extremamente vulneráveis* (> 120) são caracterizadas por níveis d'água pouco profundos e encontram-se 9 poços. Essa faixa apresenta condições de forte infiltração, devido à textura dos solos que têm origem arenosa e/ou presença de solos rasos e/ou a presença de rochas fraturadas, ocasionando a infiltração. A partir da aplicação da metodologia DRASTIC, pode-se ter uma espacialização dos poços quanto à sua vulnerabilidade natural dos aquíferos à contaminação, constatando, assim, a existência de áreas vulneráveis, muito vulneráveis e extremamente vulneráveis. Estas classes devem ser consideradas em todos os processos de uso e ocupação da terra.

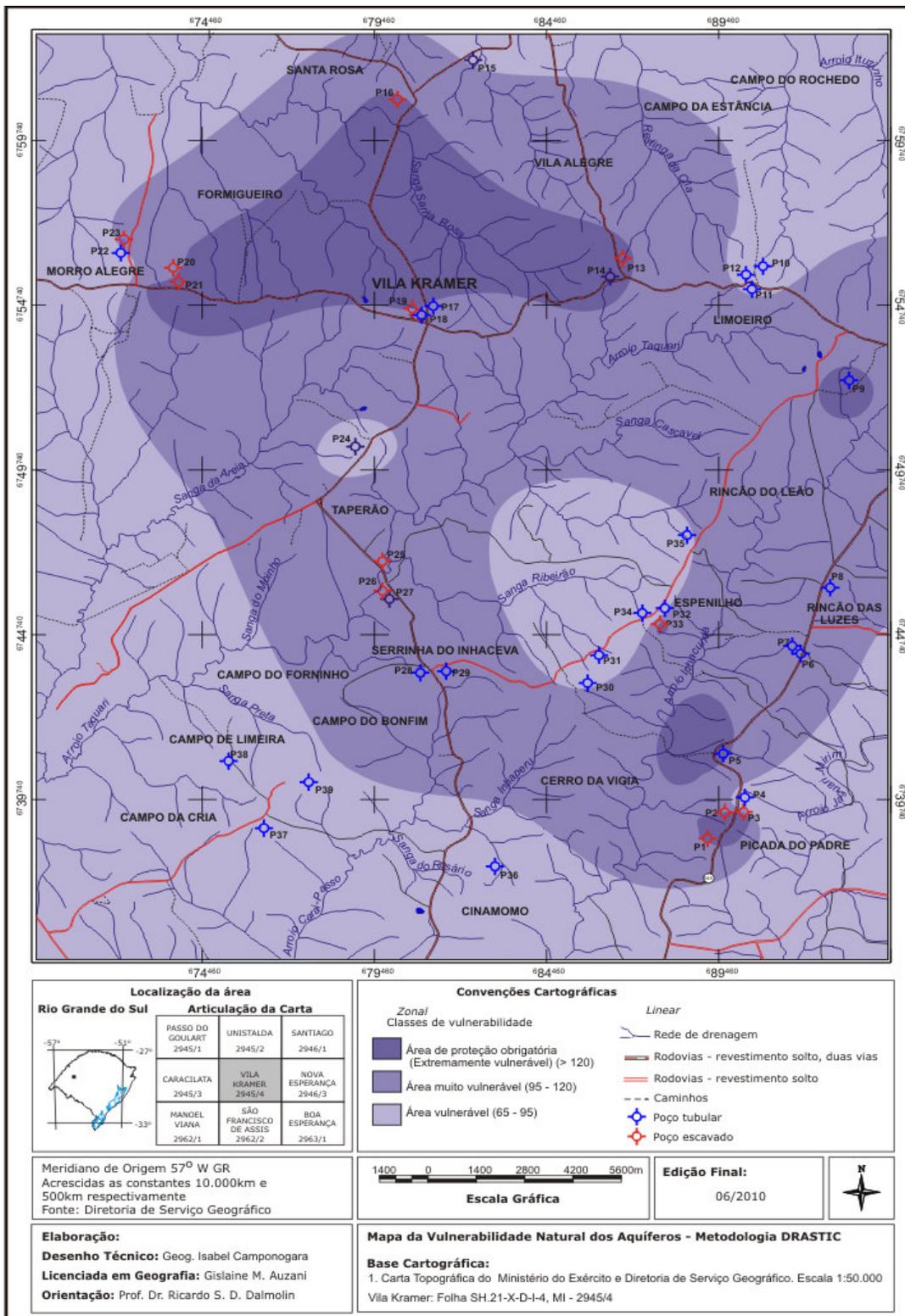


Figura 21 – Mapa da Vulnerabilidade Natural dos aquíferos, onde o Fator S foi representado pela escala 1:50.000 - Metodologia DRASTIC.

Com os resultados obtidos através dos sete parâmetros analisados na aplicação da metodologia DRASTIC, levando-se em consideração o fator S na escala de 1:1.000.000, pode-se elaborar o mapa da vulnerabilidade natural dos aquíferos da área de estudo (Figura 22). Na metodologia DRASTIC, o fator S, escala 1:50.000, obteve os seguintes poços e classes de vulnerabilidade: classe de área vulnerável (16 poços), classe muito vulnerável (14 poços) e classe extremamente vulnerável (9 poços). O fator S na escala de 1:1.000.000 obteve os seguintes poços e classes de vulnerabilidade: classe de área vulnerável (18 poços), classe muito vulnerável (8 poços) e classe extremamente vulnerável (13 poços).

Os resultados (Tabela 8) mostraram que, através do uso de diferentes escalas, pode-se ter resultados diferentes em relação à avaliação da vulnerabilidade. Observa-se que 4 poços que estavam enquadrados na classe muito vulnerável (escala 1:50.000) passaram para extremamente vulnerável (escala 1:1.000.000) e 2 poços da classe muito vulnerável (escala 1:50.000) passaram para classe vulnerável (escala 1:1.000.000). Da mesma forma, não há diferença significativa na classificação de vulnerabilidade na área de estudo utilizando diferentes escalas.

Tabela 8 – Comparação entre a classificação da vulnerabilidade dos poços através das diferentes escalas.

Poço	1:50.000		1:1000.000	
	DRASTIC	Classe	DRASTIC	Classe
2	115	Área muito vulnerável	123	Área de proteção
3	115	Área muito vulnerável	123	Área de proteção
19	120	Área muito vulnerável	122	Área de proteção
26	99	Área muito vulnerável	95	Área vulnerável
27	99	Área muito vulnerável	95	Área vulnerável
29	117	Área muito vulnerável	125	Área de proteção

Os poços P26 e P27, de área muito vulnerável (índice = 99) reduziu para classe vulnerável (índice = 95). Observa-se que esses poços, numa escala de maior detalhamento, encontram-se na unidade PVd11 e são uma associação de solos (Figura 3) composta pelas classes Argissolo Vermelho Distrófico abrupto textura arenosa/média + Neossolo Quartzarênico Órtico típico, ambos com A moderado,

recebeu carga igual a 6. Os Neossolos Quartzarênicos apresentam alta capacidade de infiltração e baixo poder de inertização, isso os torna mais suscetíveis ao carregamento e à movimentação de contaminantes para o sistema aquífero. Nesses poços, numa escala de menor detalhamento, encontra-se a unidade LVd - Latossolos Vermelho Distrófico Típico (Figura 4), que recebeu carga igual a 4, Apresentando boa permeabilidade e capacidade de movimentação de água para grandes profundidades, tornando-se mais vulnerável e suscetível ao carregamento de contaminantes para a subsuperfície.

Os poços P2, P3, P19 e P29 passaram de área muito vulnerável para extremamente vulnerável. Na escala de maior detalhamento, P2 e P3 se enquadraram na classe Cambissolos Háptico Tb Eutrófico típico A chernozêmico textura argilosa (CXbe1) e receberam carga igual a 3. Esses poços apresentam o nível da água próximo da superfície, mas, devido a apresentar uma textura argilosa, os mesmos têm capacidade de atenuar os contaminantes em caso de infiltração. Já na escala de menor detalhamento, esses poços se enquadram na classe dos Neossolos Litólicos Distrófico e receberam carga igual a 7. Na escala 1:50.000, o poço P19 recebeu carga igual a 3, enquadrando-se na classe dos Argissolos Vermelho distrófico típico A proeminente textura argilosa (PVd7) e com baixa permeabilidade; o índice final de vulnerabilidade foi igual a 120 (área muito vulnerável). Enquanto que, na escala 1:1.000.000, o P19 se enquadrou na classe dos Nitossolos Vermelho Distrófico típico e recebeu carga igual a 4, o índice final de vulnerabilidade foi igual a 122 (área extremamente vulnerável). No poço P29, o índice se elevou em relação à escala. Na escala de 1:50.000, o índice de vulnerabilidade igual a 117 considera a área muito vulnerável, e, na escala de 1:1.000.000, o índice de vulnerabilidade passou a 125 (extremamente vulnerável).

No Quadro 22, estão expressas as classes de vulnerabilidade, onde o fator S, foi representado na escala de 1:1.000.000.

<b>Grau de vulnerabilidade</b>	<b>Intervalos dos índices DRASTIC</b>	<b>Poços</b>
Área vulnerável	65 – 95	P4; P10; P11; P12; P15; P22; P24; P26; P27; P30; P31; P32; P34; P35; P36; P37; P38; P39.
Área muito vulnerável	96 – 120	P6; P7; P8; P17; P18; P20; P25; P28.
Área de proteção obrigatória (Extremamente vulnerável)	> 120	P1; P2; P3; P5; P9; P13; P14; P16; P19; P21; P23; P29; P33.

Quadro 22 – Classes de vulnerabilidade, onde o Fator S foi representado pela escala 1:1.000.000 e seus respectivos intervalos.

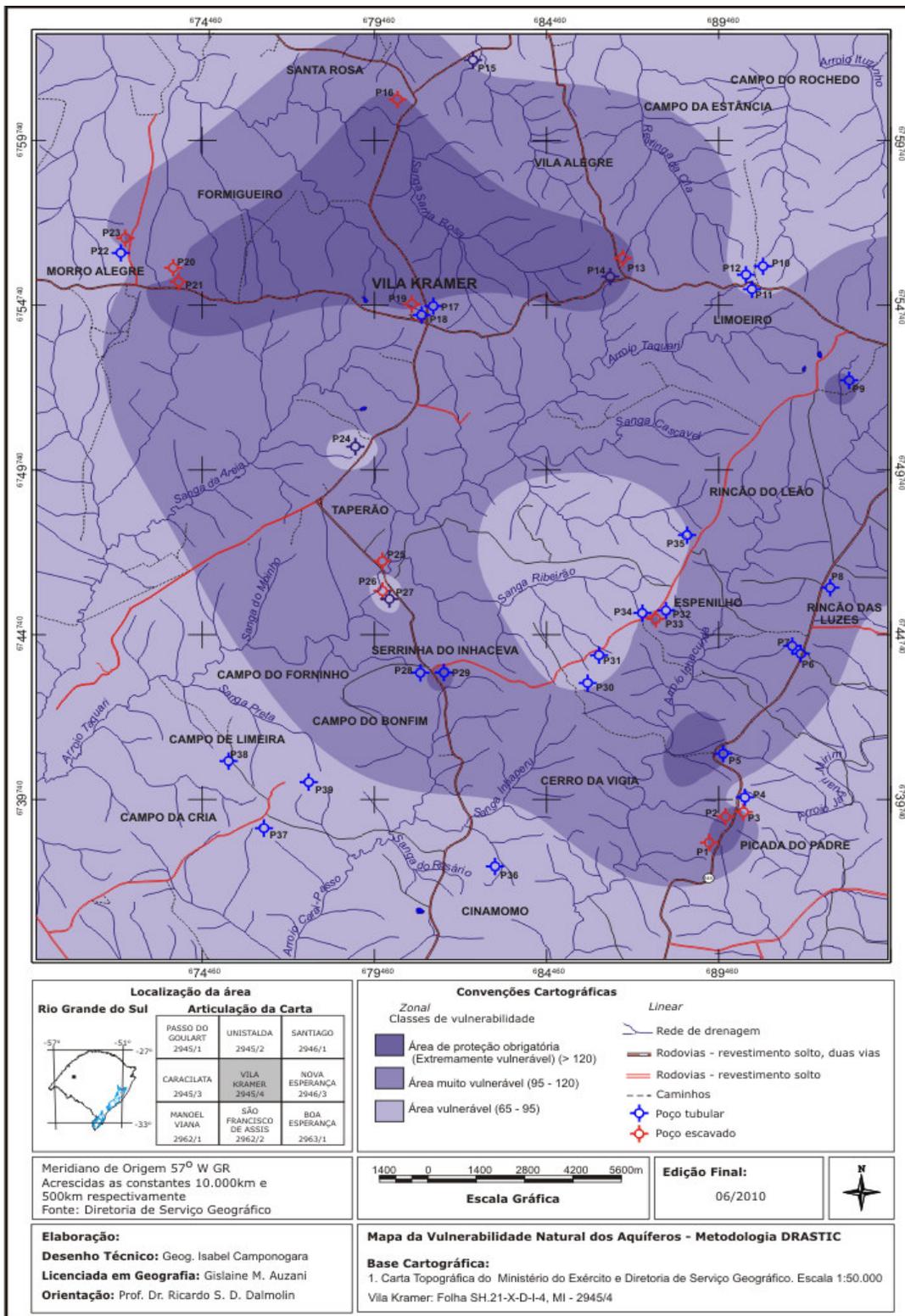


Figura 22 – Mapa da Vulnerabilidade Natural dos aquíferos, onde o Fator S foi representado pela escala 1:1.000.000 - Metodologia DRASTIC.

#### 4.8 Análise estatística dos dados analisados pela metodologia DRASTIC

A análise estatística objetivou realizar a correlação linear entre as cargas dos fatores do modelo DRASTIC que apresentavam valores diferentes (Tabela 9). Portanto, os fatores R (recarga) e C (condutividade hidráulica) foram removidos da análise por apresentarem valores constantes para as cargas. Os dados mostram que o fator D (profundidade do nível estático) é aquele com maior impacto sobre o índice DRASTIC, o que concorda com o método genérico proposto por Aller et al. (1987). Os demais fatores não apresentam correlação significativa com o índice DRASTIC.

Tabela 9 – Correlação linear entre as cargas dos fatores<sup>1</sup> do modelo DRASTIC.

	D(c)	A(c)	S(c)	T(c)	I(c)	DRASTIC
D(c)	1					
A(c)	0,008	1				
S(c)	-0,221	-0,250	1			
T(c)	0,075	0,156	-0,301	1		
I(c)	0,008	1,000**	-0,250	0,156	1	
DRASTIC	0,950**	0,221	-0,076	0,157	0,221	1

<sup>1</sup> Os fatores R e C foram removidos da análise por apresentarem valores constantes para as cargas.

\*\* A correlação é significativa ao nível de 1% (bi-caudal).

Analisando a Figura 23, nota-se a correlação da carga dos fatores D e S com o valor do índice DRASTIC. Percebe-se que o fator D teve valor crescente e apresentou significância para o modelo, enquanto que, o fator S não apresentou significância. O fator D tem extrema importância, devido ao fato de representar a distância que um contaminante deve infiltrar e percolar antes de atingir o aquífero. Na área de estudo, esse fator teve extrema importância, pelo fato de os poços apresentarem o nível estático próximo da superfície e por terem índices de alta vulnerabilidade.

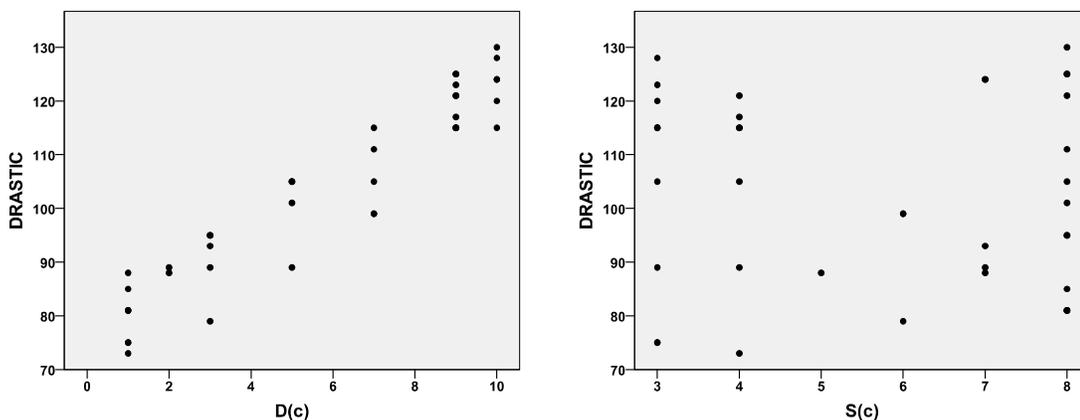


Figura 23 – Correlação da carga dos fatores D e S com o valor do índice DRASTIC.

#### 4.9 Análise de regressão linear

Os dados da Tabela 10 mostram que a carga do fator D tem um alto poder de predição do valor do índice DRASTIC. Esse poder (ou capacidade) é da ordem de 90% ( $R^2 = 0,903$ ;  $R^2_{\text{ajustado}} = 0,900$ ), ou seja, um erro considerado baixo (Erro padrão da estimativa = 5,52442). A análise de variância mostra que uma parcela muito pequena da soma de quadrados está concentrada nos resíduos.

Tabela 10 – Análise de variância do modelo de regressão linear para estimativa do índice DRASTIC a partir da carga do fator D.

Modelo	Soma de quadrados	Graus de liberdade	Quadrado médio	F	Significância
Regressão	10.525,558	1	10.525,558	344,883	0,000
Resíduos	1.129,212	37	30,519		
Total	11.654,770	38			

A correlação do fator D e a variabilidade dos dados criaram uma equação. Portanto, pode-se utilizar o modelo abaixo para estimativa do valor do índice DRASTIC na área de estudo:

$$\text{DRASTIC} = 75,568 + 4,784 \text{ D(c)}$$

A correlação é dependente do fator D também pelo fato do D ter sido utilizado para estimar o valor DRASTIC. Os valores do índice DRASTIC, obtidos através da metodologia original e da equação proposta acima, foram comparados através do teste t pareado (Tabela 11).

Tabela 11 – Teste t de dados pareadas entre os valores do índice DRASTIC obtidos através da metodologia original e estimados a partir da carga do fator D.

Média	Desvio padrão	Erro padrão da média	Intervalo de confiança da diferença (95%)		t	Graus de liberdade	Significância (bi-caudal)
			Inferior	Superior			
0,10256	5,44250	0,87150	-1,66169	1,86682	0,118	38	0,907

A análise estatística mostra que não há diferença significativa entre os valores do índice DRASTIC obtidos através das duas metodologias. A Tabela 12 mostra as diferenças pontuais observadas. Observa-se que, pelo DRASTIC original, 5 poços [P1, P16, P23, P33 (escavados) e P9 (tubular)] apresentaram classe de proteção obrigatória e, com a aplicação da equação, reduziram de 2 a 6 pontos no índice, correspondendo a uma classe muito vulnerável e considerando a localização da área dos poços, o nível estático pouco profundo (1,5 - 4,6m), formações geológicas com presença de arenito Botucatu (poroso e permeável), basalto (fraturas, amígdalas, vesículas) e solos com poder de filtro. Portanto, essas áreas dos poços podem ser considerados tanto como área de proteção como área muito vulnerável. Já a área dos poços P19 e P25 (ambos escavados) passaram de área muito vulnerável à área de proteção. Esses poços possuem características expressivas, como: os solos, as formações geológicas, a profundidade do nível estático e uso da terra, que revelam a alta vulnerabilidade dessa área. O poço P39 passou de uma área vulnerável a muito vulnerável com aumento de 10 pontos no índice. Com base nessas informações obtidas pela comparação dos métodos, pode-se levar em consideração a aplicação dessa equação na substituição dos índices DRASTIC na área estudada.

Tabela 12 – Comparação entre os valores do índice DRASTIC obtidos através da metodologia original e estimados (DRASTIC\*) a partir da carga do fator D.

Poço	DRASTIC	Classe	DRASTIC*	Classe
1	121	Área de proteção	119	Área muito vulnerável
9	125	Área de proteção	119	Área muito vulnerável
16	123	Área de proteção	119	Área muito vulnerável
19	120	Área muito vulnerável	123	Área de proteção
23	121	Área de proteção	119	Área muito vulnerável
25	115	Área muito vulnerável	123	Área de proteção
33	125	Área de proteção	119	Área muito vulnerável
39	89	Área vulnerável	99	Área muito vulnerável

#### 4.10 Análise de agrupamento

Os resultados obtidos através do teste t de dados pareados mostra que a classificação dos poços, através das duas metodologias, não difere significativamente (Tabela 13). Contudo, na metodologia original, 16 poços foram enquadrados na classe de área vulnerável, 14 poços na classe muito vulnerável e 9 poços na classe de área de proteção obrigatória (extremamente vulnerável). Na metodologia utilizando a análise de agrupamento, 16 poços foram enquadrados na classe de área vulnerável e 23 poços na área muito vulnerável (Figura 24).

Tabela 13 – Teste t de dados pareadas entre a classificação dos poços através da metodologia original (DRASTIC) e pela análise de agrupamento (CLUSTER).

Média	Desvio padrão	Erro padrão da média	Intervalo de confiança da diferença (95%)		t	Graus de liberdade	Significância (bi-caudal)
			Inferior	Superior			
0,17949	0,55592	0,08902	-0,00072	0,35969	2,016	38	0,051

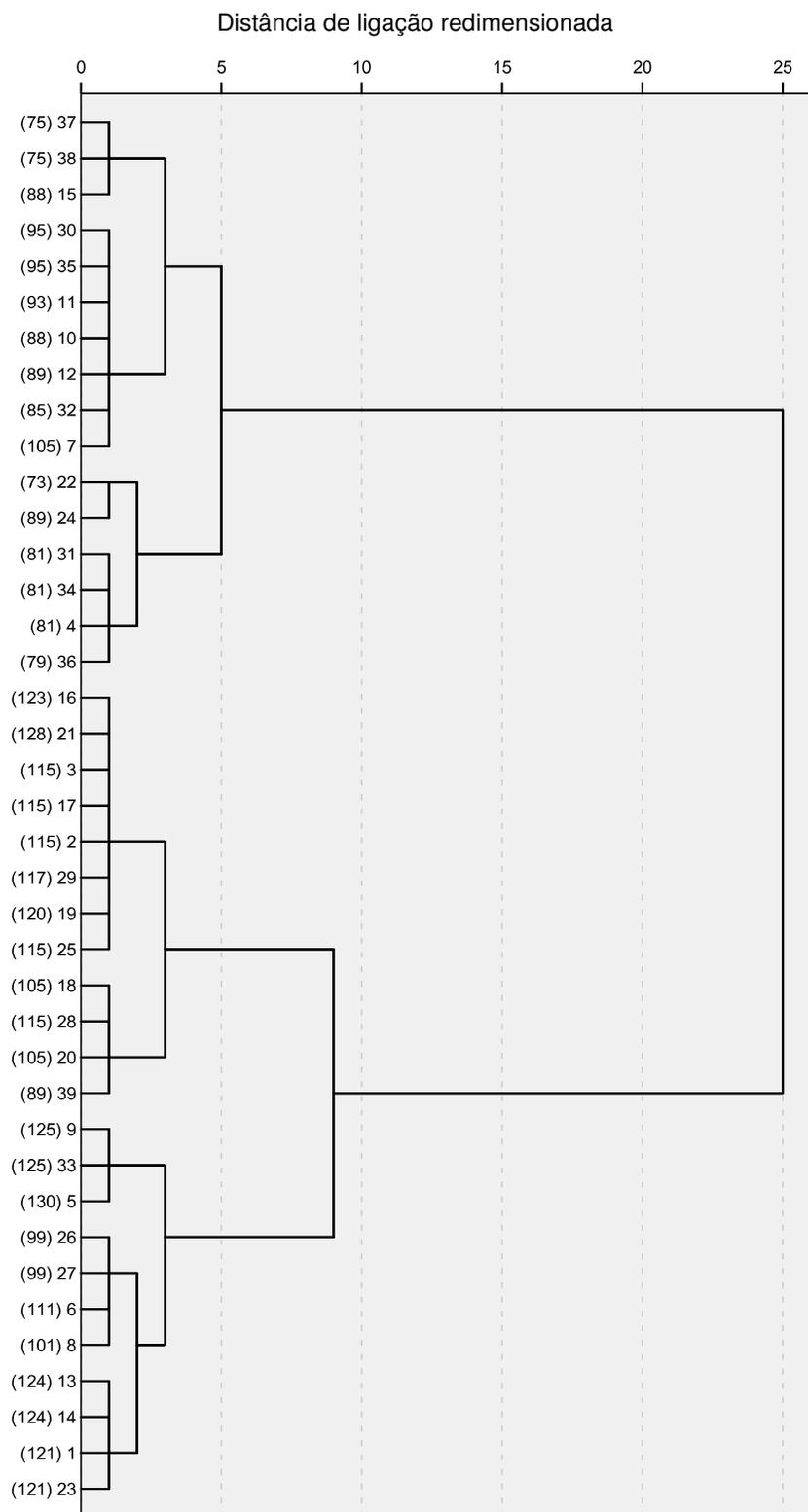


Figura 24 – Dendrograma de ligação dos poços avaliados, utilizando os valores dos sete fatores componentes do modelo DRASTIC.

OBS.: os valores entre parênteses, ao lado do número do poço, representam o valor do índice DRASTIC obtido através da metodologia original.

Analisando a Tabela 14, observam-se as diferenças pontuais das classes de vulnerabilidade observadas entre as duas metodologias aplicadas: DRASTIC original e análise de agrupamento. A partir dos dados, verifica-se o agrupamento de duas classes de vulnerabilidade, áreas de proteção e área muito vulnerável. A área dos poços P1, P5, P9, P13, P14, P16, P21, P23, P33 estavam enquadrados na classe de proteção obrigatória no DRASTIC original e, na análise de agrupamento, enquadraram-se na área muito vulnerável. Já a área do P7 passou de uma classe de muito vulnerável à vulnerável e pode ser enquadrado nessa classe devido a formação geológica Serra Geral e por apresentar solos do tipo Neossolo Litólico. Essas características tornam a área do poço menos vulnerável por corresponder aos aquíferos confinados, que dificultam a infiltração de água no solo. Conseqüentemente, a movimentação de contaminantes não ocorre facilmente, a menos que os basaltos encontrem-se com fraturas ou fissuras abertas além de vesículas ou amígdalas, formando uma porosidade secundária. A área do poço P39 passou de classe vulnerável para muito vulnerável. Nessa área, a presença de poços do tipo tubular, com nível estático profundo, aquífero do tipo poroso, da Formação Botucatu.

Tabela 14 – Comparação entre a classificação dos poços através da metodologia original (DRASTIC) e pela análise de agrupamento (CLUSTER).

Poço	DRASTIC	CLUSTER
1	Área de proteção	Área muito vulnerável
5	Área de proteção	Área muito vulnerável
7	Área muito vulnerável	Área vulnerável
9	Área de proteção	Área muito vulnerável
13	Área de proteção	Área muito vulnerável
14	Área de proteção	Área muito vulnerável
16	Área de proteção	Área muito vulnerável
21	Área de proteção	Área muito vulnerável
23	Área de proteção	Área muito vulnerável
33	Área de proteção	Área muito vulnerável
39	Área vulnerável	Área muito vulnerável

#### 4.11 Estudo da Vulnerabilidade Natural dos Aquíferos à Contaminação (GOD)

Para o estudo da vulnerabilidade natural dos aquíferos pelo método GOD desenvolvido por Foster et al. (2006), foi feito o levantamento das informações referentes a cada parâmetro do método, em 39 poços (tubulares e escavados): o **G**rau de confinamento da água subterrânea, a **O**corrência dos estratos de cobertura e a **D**istância até o nível freático ou teto do aquífero confinado.

No Quadro 23, verifica-se que, na multiplicação dos parâmetros que originou o índice vulnerabilidade natural do aquífero (GOD), no qual os valores variaram de 0,09 (classe insignificante) a 0,72 (classe extrema), obtiveram-se cinco classes de vulnerabilidade.

Os poços que apresentaram vulnerabilidade *insignificante* encontram-se localizados na Formação Serra Geral e Serra Geral/Botucatu. Nessa classe verificaram-se apenas 8 poços, abrangendo pontos do sudeste e nordeste e parte do sudoeste da área estudada. Esses poços encontram-se, muitas vezes, confinados e apresentam em seu substrato rochas vulcânicas básicas e ácidas, coesas e impermeáveis, onde predominam os Neossolos litólicos, dificultando a infiltração da água no solo. Mas, quando apresentam fraturas, fissuras abertas, além de diáclases, essas rochas favorecem a infiltração e a movimentação de poluentes e contaminantes para a subsuperfície.

A classe de vulnerabilidade *baixa* apresenta o maior número de poços. Esta classe ocupa a maior extensão da área de estudo (locação de 18 poços) e abrange os setores sudeste e centro da área de estudo. Esses poços encontram-se na Formação Serra Geral e apenas o P18 (Localidade Vila Kramer) está numa interface de Formação Serra Geral/Botucatu, onde predominam os Neossolos litólicos que são solos rasos e pouco espessos e, conseqüentemente, com poder de infiltração muito baixo.

Na classe de vulnerabilidade *média*, encontra-se a locação de apenas um poço (P23), o qual se encontra na Formação Botucatu e predominam os Argissolos Vermelho de textura média/argilosa. Segundo Streck et al. (2008), nesses solos há uma rápida infiltração de água, que diminui no horizonte B textural devido à sua menor permeabilidade, o que é mais acentuado quando há uma mudança textural abrupta.

Na área considerada com vulnerabilidade *alta*, verificou-se a locação de 9 poços. Nesta classe, as condições de infiltração da água no solo são boas, favorecendo a infiltração e a percolação dos poluentes. Observa-se que os poços encontram-se nas Formações Botucatu e Guará. A Formação Botucatu é constituída de arenitos, que são rochas permeáveis e têm facilidade de infiltração de água para a subsuperfície e com isso o carregamento de poluentes. A Formação Guará um pouco mais impermeável, retém parte da água, diminuindo a movimentação dos poluentes para a subsuperfície. Portanto, são áreas de grande preocupação, sendo necessário o cuidado do uso e da ocupação dessas áreas, caso apresente algum tipo de risco de contaminação à qualidade da água subterrânea.

Para a área de vulnerabilidade *extrema*, verificaram-se apenas 3 poços (P9; P16; P21). Abrange áreas isoladas nos setores norte e noroeste da área. Esses poços são do tipo escavado com o nível da água subterrânea próximo da superfície em torno de 3m de profundidade. Na área dos poços, predomina a Formação Botucatu e os Latossolos Vermelhos de textura argilosa. A vulnerabilidade da área desses poços se torna extrema, devido ao nível da água subterrânea estar próximo da superfície do terreno, deixando a área do poço mais suscetível ao carregamento e infiltração de poluentes e contaminantes procedentes do uso e da ocupação da terra. Cabe salientar que essas áreas são de grande preocupação e fragilidade no substrato; deve-se ter um cuidado maior quanto ao uso e ocupação dessas terras, sendo áreas de proteção obrigatória.

Poço	UTM (Norte/Sul)	UTM (Leste/Oeste)	G	O	D	Índice de Vulnerabilidade	Classificação
1	6738728	689643	0,2	0,7	0,9	0,126	baixa
2	6739238	689886	0,2	0,7	0,9	0,126	baixa
3	6739370	690016	0,2	0,7	0,9	0,126	baixa
4	6739554	690082	0,2	0,7	0,6	0,084	insignificante
5	6741174	689401	0,2	0,7	0,9	0,126	baixa
6	6744076	691758	0,2	0,7	0,9	0,126	baixa
7	6744112	691593	0,2	0,6	0,8	0,126	baixa
8	6744756	692097	0,2	0,7	0,8	0,112	baixa
9	6752350	693203	1,0	0,8	0,9	0,72	extrema
10	6755779	690725	0,2	0,7	0,7	0,098	insignificante
11	6755280	690678	0,2	0,7	0,7	0,098	insignificante
12	6755591	690683	0,2	0,7	0,7	0,098	insignificante
13	6756236	686747	0,2	0,7	0,9	0,126	baixa
14	6755392	686211	0,2	0,7	0,9	0,126	baixa
15	6762573	683423	1,0	0,8	0,7	0,56	alta
16	6760856	680066	1,0	0,8	0,9	0,72	extrema
17	6754551	681097	0,2	0,7	0,9	0,126	baixa
18	6754315	680875	0,2	0,7	0,9	0,126	baixa
19	6754653	680659	0,2	0,7	0,9	0,126	baixa
20	6755525	673221	1,0	0,8	0,8	0,64	alta
21	6755412	673227	1,0	0,8	0,9	0,72	extrema
22	6756340	672144	0,2	0,6	0,6	0,072	insignificante
23	6756600	672354	0,6	0,8	0,9	0,432	média
24	6750337	678845	1,0	0,7	0,8	0,56	alta
25	6747134	679489	1,0	0,7	0,9	0,63	alta
26	6746379	679871	1,0	0,7	0,8	0,56	alta
27	6746396	679818	1,0	0,7	0,8	0,56	alta
28	6743824	681022	1,0	0,8	0,8	0,64	alta
29	6743461	681405	0,2	0,7	0,9	0,126	baixa
30	6743278	685749	0,6	0,55	0,7	0,231	baixa
31	6744274	686058	0,4	0,7	0,7	0,196	baixa
32	6745306	687373	0,4	0,7	0,7	0,196	baixa
33	6745257	687385	0,2	0,7	0,9	0,126	baixa
34	6745214	687268	0,2	0,7	0,7	0,098	insignificante
35	6747656	688512	0,2	0,7	0,9	0,126	baixa
36	6737586	682874	1,0	0,8	0,8	0,64	alta
37	6738856	676173	0,2	0,75	0,6	0,09	insignificante
38	6740842	675249	0,2	0,75	0,6	0,09	insignificante
39	6740136	677471	1,0	0,8	0,8	0,64	alta

Quadro 23 – Índice de Vulnerabilidade Natural do Aquífero (GOD).

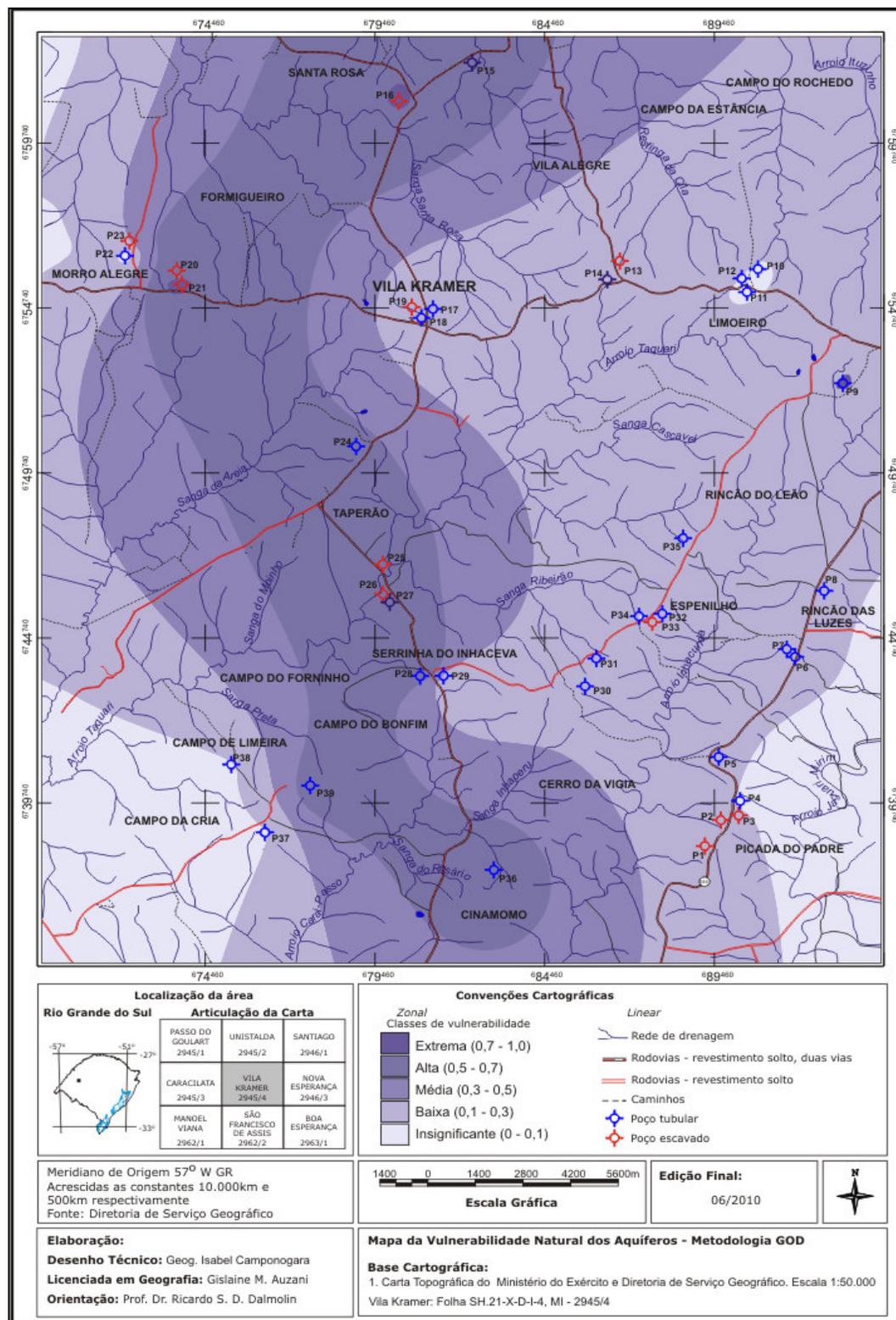


Figura 25 – Mapa da Vulnerabilidade Natural dos aquíferos – Metodologia GOD.

#### 4.12 Comparação entre as metodologias DRASTIC e GOD

As metodologias DRASTIC e GOD proporcionaram avaliar e determinar a vulnerabilidade dos sistemas aquíferos à contaminação. O método GOD (FOSTER et al., 2006) apresenta três parâmetros e podem ser facilmente identificados através das informações extraídas do CPRM/SIAGAS e do trabalho de campo. A metodologia DRASTIC (ALLER et al., 1987) utiliza sete fatores. Devido ao número de fatores e sua complexidade, houve dificuldades para se obter dados referentes às características hidrogeológicas da área de estudos, no que se refere aos fatores: Solos (S), Impacto da Zona Vadosa (I) e Condutividade hidráulica (C). Eles sofreram adaptações quanto à metodologia. Os estudos de Camponogara (2006), Leite e Möbus (1998), Hamza (2007) citam que essa metodologia pode sofrer alterações, ou seja, podem ser feitas adaptações conforme as características específicas da área de estudo e a disponibilidade de informações.

A metodologia DRASTIC utiliza uma equação, onde ocorre a multiplicação do Peso (p) e da Carga (c), e a soma dos sete fatores obtém índices de vulnerabilidade natural dos aquíferos. Por outro lado, a metodologia GOD somente multiplica os três parâmetros, a fim de obter valores finais quanto à vulnerabilidade. Dessa forma, torna-se complexo determinar a vulnerabilidade de um aquífero com maior precisão, se a metodologia empregada apresenta um número elevado de fatores a ser investigados. A metodologia GOD apresenta um número menor de fatores e estes podem ser facilmente identificados.

Na obtenção do índice de vulnerabilidade pela metodologia DRASTIC, tem-se diversos valores que, quando relacionados entre si, apontarão as áreas mais vulneráveis na área estudada. No entanto, diferentemente da metodologia GOD, não são inseridos conceitos de maior e menor valor para a vulnerabilidade natural do sistema aquífero. Nesse sentido, a metodologia DRASTIC faz necessária a comparação com outros ambientes hidrogeológicos semelhantes aos da área que está sendo estudada. Desta forma, é possível determinar os valores de vulnerabilidade.

Em relação à vulnerabilidade natural dos aquíferos da área, a metodologia DRASTIC variou de área vulnerável, muito vulnerável e extremamente vulnerável, enquanto que na metodologia GOD variou de insignificante, baixa, média, alta e

extrema. As metodologias DRASTIC e GOD proporcionaram a identificação das classes de vulnerabilidade e também as condições naturais dos sistemas aquíferos. Com a aplicação das metodologias, pode-se ter a utilização dos SIGs, através da elaboração de mapas de vulnerabilidade que podem ser utilizados para o planejamento de modo sustentável dos sistemas aquíferos naturais.

#### **4.13 Avaliação dos parâmetros físico-químicos das águas subterrâneas**

As amostras de águas subterrâneas foram avaliadas em relação aos parâmetros físico-químicos no Laboratório de Análise de Águas Rurais (LAAR) da UFSM. Foram coletadas amostras de águas em 22 poços (escavados e tubulares) (Figura 7).

De acordo com os resultados, o pH que variou de 5,32 a 8,93 (Quadro 24). O menor valor de pH foi encontrado no poço P2 (pH 5,32), caracterizando água levemente ácida. O maior valor de pH foi encontrado no poço P32 (pH 8,93), caracterizando água mais alcalina e básica. Ambos os poços encontram-se na unidade geológica da Serra Geral/ácida.

A Condutividade Elétrica, segundo Libânio (2005), indica a capacidade da água natural de transmitir corrente elétrica em função da presença de substâncias dissolvidas que se dissociam em ânions e cátions. Os valores referentes à condutividade elétrica das águas subterrâneas ocorrem entre 9 (P25) a 182,8  $\mu\text{Scm}^{-1}$  (P12). Conforme Feitosa e Manoel Filho (1997), a condutividade elétrica (CE) é a medida da facilidade de uma água conduzir a corrente elétrica, estando diretamente ligada com o teor de sais dissolvidos sob a forma de íons. Desta forma, nota-se que o poço P25 (Localidade Taperão) apresenta um índice abaixo das normas indicadas, que varia de 10 a 1.000  $\mu\text{S.cm}^{-1}$  (Feitosa e Manoel Filho, 1997). Portanto, a água do poço P25 apresenta pouca concentração de sais dissolvidos sob a forma de íons. A área onde está localizado o poço apresenta uma vulnerabilidade alta constatada pela metodologia GOD e extremamente vulnerável pela metodologia DRASTIC. Outro fator importante é o nível estático estar bem próximo da superfície (apenas 30 cm de profundidade) e, por vezes, aflorando.

No que se refere ao parâmetro  $\text{Ca}^{2+}$ , houve uma variação de 0,40 (P4) a 36,13  $\text{mg L}^{-1}$  (P19). Percebe-se que todos os poços, com exceção do P19, estão com teores de cálcio abaixo do valor indicado (FEITOSA e MANOEL FILHO, 1997). Conforme esses autores, nas águas subterrâneas os teores de cálcio variam, em geral, entre 10 e 100 $\text{mg/L}$ . O poço P19 está na Formação Geológica Serra Geral e o nível da água encontra-se próximo da superfície. Isso decorre muitas vezes de os poços serem perfurados no material de alteração da rocha (saprólito), onde a circulação da água acaba lixiviando os minerais constituintes das rochas, ocasionando a concentração de  $\text{Ca}^{2+}$ . Segundo Feitosa e Manoel Filho (1997), o mineral plagioclásio e a apatita são as maiores fontes de cálcio das rochas ígneas para as águas subterrâneas.

A concentração de  $\text{Mg}^{2+}$  variou de 0,03 (P25) a 14,98  $\text{mg.L}^{-1}$  (P1). O magnésio apresenta propriedades similares ao cálcio, porém é mais solúvel e mais difícil de precipitar (FEITOSA e MANOEL FILHO, 1997). Nos poços P1, P3, P4, P31, os valores encontrados são maiores que a concentração de  $\text{Ca}^{2+}$ . Esses poços encontram-se numa formação geológica Serra Geral básica (P1) e ácida (P3, P4, P31), constituída de rochas ígneas, com presença de minerais fornecedores de magnésio para a água subterrânea, como: biotita, olivina, anfibólios (horblenda), piroxênios (augita). Mas, segundo Camponogara (2006), devido aos minerais fornecedores de magnésio serem mais estáveis diante do intemperismo químico do que os minerais fornecedores de cálcio, o seu teor nas águas subterrâneas é geralmente menor que o cálcio. A partir dos dados (Quadro 24), verifica-se que em vários poços o  $\text{Mg}^{2+}$  apresenta teores abaixo de 1 $\text{mg L}^{-1}$ . Segundo Feitosa e Manoel Filho (1997), as águas subterrâneas apresentam teores mais frequentes de magnésio no intervalo de 1 e 40 $\text{mg/L}$ . Várias amostras de água apresentaram baixa concentração de  $\text{Mg}^{2+}$ . O magnésio é um elemento cujo comportamento geoquímico é muito parecido com o do cálcio e, em linhas gerais, acompanha este elemento. O magnésio, depois do cálcio, é o principal responsável pela dureza das águas.

Quanto à dureza, as águas subterrâneas variaram de 1,31 (P25) a 94,42  $\text{mg.CaCO}_3\text{L}^{-1}$  (P19), o que permite dizer que está dentro do padrão de aceitação do consumo humano, segundo a Portaria Nº 518/2004, do Ministério da Saúde, onde o Valor Máximo Permitido (VMP) é de 500  $\text{mg L}^{-1}$ . A dureza é a excessiva riqueza de cálcio e magnésio e constitui um inconveniente para vários usos domésticos ou industriais (LOPES et al., 2008).

Quanto à alcalinidade, as águas subterrâneas apresentaram valores de 3,73 (P23) a 113,12 mg CaCO<sub>3</sub> L<sup>-1</sup> (P12). A alcalinidade é definida como a capacidade de uma água neutralizar ácidos, sendo uma consequência direta da presença e/ou ausência de carbonatos e bicarbonatos (FEITOSA e MANOEL FILHO, 1997).

Nº	Tipo de poço	N.E. <sup>1</sup> (m)	Formação Geológica	pH	Cond. Elétr.	Ca <sup>2+</sup>	Mg <sup>2+</sup>	Dureza	Alcalinidade	STD <sup>2</sup>
					µSm cm <sup>-1</sup>	mg. L <sup>-1</sup>		mg CaCO <sub>3</sub> L <sup>-1</sup>	mg CaCO <sub>3</sub> L <sup>-1</sup>	mg. L <sup>-1</sup>
P1	Escavado	2,85	Serra Geral/básica	6,65	121,2	5,46	14,98	75,34	27,61	142,86
P2	Escavado	2,47	Serra Geral/básica	5,32	34,9	0,88	0,40	3,87	3,96	85,71
P3	Escavado	1,56	Serra Geral/ácida	5,62	35,2	3,73	11,00	54,59	6,99	100,00
P4	Tubular	71,1	Serra Geral/ácida	7,98	174,1	0,40	7,07	30,11	108,81	142,86
P6	Tubular	8	Serra Geral/ácida	7,25	123,6	4,84	3,31	25,72	85,51	442,86
P8	Tubular	12	Serra Geral/ácida	7,98	149,8	5,61	0,66	16,73	99,03	157,14
P11	Tubular	22,64	Serra Geral/ácida	7,23	159,7	1,70	1,34	9,79	97,86	228,57
P12	Tubular	24,08	Serra Geral/ácida	7,81	182,8	5,19	0,65	15,65	113,12	200,00
P13	Escavado	40 cm	Serra Geral/ácida	7,13	62,1	5,14	0,20	13,65	28,66	100,00
P15	Tubular	40	Botucatu	6,88	63,9	5,67	0,73	17,19	20,50	30,00
P19	Escavado	1,37	Serra Geral/básica	6,13	56,7	36,13	1,01	94,42	17,24	30,00
P20	Escavado	11,14	Botucatu	6,04	30,3	2,39	0,33	7,32	13,63	0,00
P21	Escavado	1,34	Botucatu	6,25	27,5	2,92	0,15	7,92	14,80	10,00
P23	Escavado	3,25	Botucatu	6,00	31,9	2,63	0,18	7,31	13,51	0,00
P25	Escavado	30 cm	Guará	5,68	9,0	0,47	0,03	1,31	4,19	0,00
P26	Escavado	5,27	Guará	5,59	56,4	2,39	1,01	10,15	3,73	80,00
P27	Tubular	5,3	Guará	6,08	36,4	2,35	1,00	9,99	19,46	10,00
P28	Tubular	6	Botucatu	6,21	15,0	1,24	0,26	4,16	6,06	0,00
P30	Tubular	21,29	Serra Geral/ácida	7,25	100,3	5,29	1,04	17,47	55,34	0,00
P31	Tubular	31,36	Serra Geral/ácida	8,85	137,9	1,53	1,75	11,04	76,42	150,00
P32	Tubular	42,63	Serra Geral/ácida	8,93	145,4	8,37	0,84	24,37	104,62	30,00
P33	Escavado	2,43	Serra Geral/ácida	7,95	18,2	1,00	0,29	3,68	7,34	60,00

Quadro 24 – Laudo de análise laboratorial dos parâmetros físico-químicos da área de estudo, em abril de 2009.

Fonte: Laboratório de Análise de Águas Rurais (LAAR) – Centro de Ciências Rurais – Departamento de Solos - Universidade Federal de Santa Maria – UFSM.

<sup>1</sup> N.E. = Nível estático

<sup>2</sup> STD = Sólidos Totais Dissolvidos

Em relação ao parâmetro STD (sólidos totais dissolvidos), houve variação de 0 a 442,86 mg L<sup>-1</sup>. Segundo a Resolução CONAMA 357/2005, são considerados água doce os parâmetros STD abaixo de 500 mg L<sup>-1</sup>. Os resultados mostram que as águas subterrâneas analisadas, em relação a esse parâmetro, são consideradas água doce e potável para o consumo humano. Os sólidos totais dissolvidos

correspondem à carga sólida em suspensão e que pode ser separada por simples filtração ou mesmo decantação (CAMPONOGARA, 2006).

A turbidez é a dificuldade da água para transmitir a luz, provocada pelos sólidos em suspensão (silte, argila, matéria orgânica) que “sujam” a água, dificultando a passagem de luz (FEITOSA e MANOEL FILHO, 1997). Esse parâmetro apresentou em dois poços P2 e P33 (escavados) valores acima do que é recomendado pela Portaria N<sup>o</sup> 357/2005, turbidez até 40 unidades nefelométrica de turbidez (UNT). Isso se deve ao fato de os poços serem pouco profundos e o nível da água estar próximo da superfície. A cor é outro parâmetro que merece atenção; conforme a Portaria N<sup>o</sup> 518/2004, o Valor Máximo Permitido (VMP) é de 15 uH, e, na área encontram-se vários poços com valores superiores as normas.

Segundo a Portaria N<sup>o</sup> 518/2004, o padrão de aceitação da água quanto à cor refere-se à Unidade Hazen (uH) ( $\text{mgPt-Co L}^{-1}$ ) e é de 15 uH. A partir dos dados (Quadro 25), verifica-se que os poços P3 (escavado), P11 (tubular), P13 (escavado), P19 (escavado), P20 (escavado), P33 (escavado) estão acima VMP pela resolução. A cor é resultado das substâncias dissolvidas na água, provenientes principalmente da lixiviação da matéria orgânica (FEITOSA e MANOEL FILHO, 1997).

Os teores de sódio ( $\text{Na}^+$ ) variaram de 0 (P21, P23 e P25) a 18,24  $\text{mg L}^{-1}$  (P31). O sódio ocorre principalmente sob a forma de cloretos nas águas subterrâneas e seus minerais fontes em rochas ígneas são essencialmente os feldspatos, plagioclásios, feldspatóides (nefelina e sodalita), anfibólios e piroxênios (FEITOSA e MANOEL FILHO, 1997). A maior concentração de sódio encontra-se no poço P31, na formação geológica Serra Geral/ácida, com presença de minerais de alteração feldspatos como fontes de sódio para água subterrânea. Segundo Feitosa e Manoel Filho (1997), a concentração de sódio varia, em geral, entre 0,1 e 100mg/L nas águas subterrâneas. Portanto, na área de estudo, os poços (P21, P23 e P25) não apresentaram nenhuma concentração de sódio; isso se deve ao fato de esses poços estarem nas formações geológicas Botucatu e Guará. A presença de sódio na água de irrigação pode ser adsorvida pelas argilas, ocasionando seu endurecimento e impermeabilização. A concentração de sódio é obtida em função dos teores de Cálcio e Magnésio. Estes elementos agem no sentido de deslocar o sódio contido no solo, no processo conhecido como troca catiônica. A partir das análises realizadas de  $\text{Na}^+$ ,  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ , calculou-se a Relação de Adsorção de Sódio (RAS). RAS é a relação de adsorção de sódio da água de irrigação, que é um índice que caracteriza

o risco de salinização do solo (CAUDURO e DORFMAN, 1986). O resultado obtido foi RAS <10, considerado um risco baixo. A água de salinidade baixa pode ser utilizada para a irrigação da maior parte das culturas em qualquer tipo de solo, com muito pouca probabilidade de provocar salinização. É necessária alguma lavagem do solo, mas isto é conseguido em condições normais de irrigação, com exceção de alguns solos que apresentam condutividade hidráulica muito baixa (CAUDURO e DORFMAN, 1986). Mesmo que a relação de adsorção de sódio seja baixa, pode-se ter águas com alto conteúdo de sais, que são prejudiciais e podem causar danos ao solo.

Nº	Identificação da Amostra	Turbidez	Cor <sup>1</sup>	Na <sup>+</sup>	K <sup>+</sup>	N-NH <sub>4</sub> <sup>+</sup>	N-NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	RAS <sup>2</sup>
		UNT	mg Pt-Co L <sup>-1</sup>	mg. L <sup>-1</sup>		mg. L <sup>-1</sup>		meq/L
P1	Escavado	0,82	5,0	1,95	5,18	0,00	2,77	0,10
P2	Escavado	553	10,0	1,04	0,38	0,00	nd	0,23
P3	Escavado (comunidade)	11,20	60,0	1,77	0,58	0,16	0,41	0,10
P4	Tubular IW064 CPRM	0,34	5,0	12,93	0,00	0,00	0,00	1,03
P6	Tubular IW065 CPRM	2,54	5,0	14,95	0,19	0,35	0,27	1,28
P8	Tubular	0,05	5,0	11,83	0,19	0,00	0,41	1,26
P11	Tubular	16,70	70,0	10,92	0,96	0,00	0,03	1,51
P12	Tubular	7,86	5,0	15,68	1,15	0,27	0,00	1,72
P13	Escavado	22,70	50,0	0,49	0,58	0,00	0,49	0,06
P15	Tubular	0,81	5,0	0,67	0,00	0,00	0,00	0,07
P19	Escavado	6,32	30,0	0,85	0,00	0,00	0,35	0,04
P20	Escavado	26,40	>205	0,12	0,00	0,00	0,00	0,02
P21	Escavado	1,29	10,0	0,00	0,00	0,00	0,00	0
P23	Escavado	4,59	5,0	0,00	0,00	0,00	0,00	0
P25	Escavado	0,35	10,0	0,00	0,00	0,00	0,00	0
P26	Escavado	0,00	5,0	0,67	1,54	0,00	0,00	0,09
P27	Tubular	4,24	15,0	1,04	0,38	0,00	0,00	0,14
P28	Tubular	2,37	5,0	0,12	2,30	0,03	0,03	0,03
P30	Tubular IW083 CPRM	0,10	5,0	3,42	2,69	0,00	0,00	0,36
P31	Tubular	0,09	5,0	18,24	0,00	0,00	0,00	2,39
P32	Tubular	0,00	5,0	10,55	0,19	0,00	0,00	0,93
P33	Escavado	56,90	>250	0,31	0,38	0,00	0,00	0,07

Quadro 25 – Laudo de análise laboratorial dos parâmetros físico-químicos da área de estudo, em abril de 2009.

Fonte: Laboratório de Análise de Águas Rurais (LAAR) – Centro de Ciências Rurais – Departamento de Solos - Universidade Federal de Santa Maria – UFSM.

<sup>1</sup> Cor - mgPt-Co L<sup>-1</sup> = Platina/cobalto

<sup>2</sup> RAS = Relação de Adsorção de sódio

O Potássio ( $K^+$ ) variou de 0 a 5,18  $mg L^{-1}$ . O menor valor foi detectado nos poços P4, P23, P20, P21, P19, P15, P25 e P31 e o maior valor foi no P1. Os teores de potássio nas águas subterrâneas são inferiores a 10  $mg L^{-1}$ , sendo mais frequentes valores entre 1 e 5  $mg L^{-1}$  (FEITOSA e MANOEL FILHO, 1997). Conforme Camponogara (2006), o potássio ( $K^+$ ) ocorre em pequenas quantidades nas águas subterrâneas, devido à participação intensa em processos de troca iônica, além da facilidade de ser absorvido pelos minerais de argila e, ainda, de seus sais serem bastante utilizados pelos vegetais.

Quanto ao parâmetro Nitrato ( $N-NO_3^-$ ), a variação foi de 0 a 2,77  $mg L^{-1}$ . Os poços da área de estudo encontram-se abaixo do valor permitido pela Portaria N° 357/2005, sendo o valor máximo de 10,0  $mg L^{-1}$ , padrões estes para o consumo humano. No poço P1 (escavado), a concentração chegou a 2,77  $mg L^{-1}$  de  $N-NO_3^-$ . Assim, não se identificou excesso de uso de fertilizantes nitrogenados nos usos agrícolas. Em áreas urbanas e industriais, Lopes et al. (2008) diz que a contaminação por nitrato provavelmente é oriunda da infiltração de esgotos e fossas e de resíduos de animais, e é facilmente disseminada através das fissuras das rochas, nas épocas de chuvas.

Na área de estudo, ocorre a presença de rochas vulcânicas ácidas e básicas da Formação Serra Geral e o aquífero é do tipo fissural. Essas rochas apresentam uma variedade mineralógica, fornecendo minerais fontes para a água subterrânea. A constituição geológica de um aquífero determinará a qualidade da água, a capacidade de armazenamento e movimentação da água ao meio. Segundo Feitosa e Manoel Filho (1997), a água subterrânea, ao lixiviar os solos e as rochas, enriquece em sais minerais em solução, provenientes da dissolução dos seus minerais. Portanto, as análises realizadas mostraram baixa concentração de elementos como: potássio, cálcio, sódio e magnésio. De acordo com as normas estabelecidas, encontram-se águas com boa qualidade com um padrão de potabilidade para o consumo humano da maioria das águas.

## 5 CONCLUSÃO

Os mapas gerados serviram de base para a análise e compreensão de todo o espaço geográfico analisado e para futuros planejamentos e tomadas de decisões. Em especial, cabe ressaltar a importância do mapeamento e classificação do uso e ocupação da terra, que permitiu obter dados, quantificar e calcular áreas, avaliando o meio físico-natural e aptidão de uso das terras.

Com o mapeamento da vulnerabilidade natural dos aquíferos à contaminação, obtido através da aplicação da metodologia DRASTIC, pode-se identificar três classes de vulnerabilidade para a região da Vila Kramer (vulnerável, muito vulnerável e extremamente vulnerável). O método GOD possibilitou a identificação de cinco classes de vulnerabilidade (insignificante, baixa, média, alta e extrema).

Observou-se que tanto o uso de mapas de solos na escala de 1:1.000.000 (menor detalhamento) e 1:50.000 (maior detalhamento), houveram pequenas variações locais alterando-se apenas duas classes de vulnerabilidade.

A respeito da metodologia DRASTIC, há certa dificuldade de obter os setes fatores, como o caso da condutividade hidráulica, que é obtida através de testes de bombeamento em poços. A metodologia GOD se torna mais acessível, devido aos três parâmetros a serem investigados e uma maior praticidade no seu levantamento de dados. Recomendam-se, a futuros trabalhos, as duas metodologias aplicadas; ambas proporcionaram a identificação das classes de vulnerabilidade e também as condições naturais dos sistemas aquíferos.

A análise estatística realizada a partir dos dados analisados pela metodologia DRASTIC mostraram que o fator D é aquele com maior impacto sobre o índice DRASTIC concordando com o método proposto pela USEPA (Agência Americana de Proteção Ambiental) que atribui pesos. Os demais fatores avaliados não apresentaram correlação significativa com o índice DRASTIC.

Em relação aos parâmetros físico-químicos das águas, os resultados obtidos mostraram que a maioria das águas dos poços, em sua grande maioria, servem para o consumo humano de acordo com as normas de potabilidade, sendo uma água doce (baixa concentração de sais dissolvidos), de boa qualidade.

A partir do exposto, ressalta-se a importância da análise realizada, pois trouxe uma série de informações e dados referentes à vulnerabilidade natural dos aquíferos à contaminação, como a utilização dos programas computacionais na geração dos mapas da área e a sobreposição de vários planos de informações que poderão ser atualizados a partir de novas pesquisas. Enfim, contribuiu para a comunidade local, trazendo informações relacionadas a espacialização em SIG à vulnerabilidade dos recursos hídricos subterrâneos e às condições da água que estão utilizando para o consumo.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALLER, L. BENNET, T.; LEHR, J. H. ; PETTY; R. J. **Drastic**: a standardized system for evaluating groundwater pollution potential using hidrogeologic settings. U.S.EPA report 600/Z-85/018, 1987.

ARAUJO, G. H. de S.; ALMEIDA, J. R. de; GUERRA, A. J. T. **Gestão ambiental de áreas degradadas**. Rio de Janeiro: Bertrand Brasil, 2005.

AUZANI, G. M. **Sensoriamento Remoto aplicado ao estudo da arenização no 1º Distrito de São Francisco de Assis - RS**. 2003, 129f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) - Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, RS, 2003.

AZEVEDO, A. C. & DALMOLIN, R. S. D. **Solos e Ambiente**: uma introdução. 2ª ed. Editora Pallotti, Santa Maria - RS, 2006.

AZEVEDO, A. C.; PEDRON, F. de A.; DALMOLIN, R. S. D. A evolução da vida e as funções do solo no ambiente. In: CERETTA, C. A.; SILVA, L. S.; REICHERT, J. M. **Tópicos em Ciência do Solo**. v. 5. Viçosa: SBCS, 2007. p. 1 - 48.

BABIKER, I. S. et al. A GIS-based DRASTIC model for assessing aquifer vulnerability in Kakamigahara Heights, Gifu Prefecture, central Japan. **Science of the Total Environment**. 345, 2005. 127–140 p.

BARRETO, F. M. de S. **Contaminação da água subterrânea por pesticidas e nitrato no município de Tianguá, Ceará**. 2006, 182f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) - Fortaleza: Universidade Federal do Ceará, 2006.

BRASIL. Ministério da Agricultura. **Levantamento de reconhecimento dos solos do Rio Grande do Sul**. Recife, 1973. 431p. (Boletim técnico nº. 30).

BRASIL. Lei 4.771, de 15 de Setembro de 1965. **Dispõe sobre o Código Florestal Brasileiro**. Disponível em: <<http://www.senado.gov.br>>. Acesso em: 29 ago. 2009.

CAMPONOGARA, I. **Vulnerabilidade natural no sistema Aquífero Guarani e análise de parâmetros físico-químicos das águas subterrâneas em Quaraí, BR e Artigas, UY**. 2006, 110f. Dissertação (Mestrado em Geografia) - Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, RS, 2006.

CARLESSO, R.; ZIMMERMANN, F. L. **Água no solo**: Parâmetros para o dimensionamento de sistemas de irrigação. Santa Maria: UFSM/ Departamento de Engenharia Rural, 2000. 88p.

CAUDURO, F. A.; DORFMAN, R. **Manual de ensaios de laboratório e de campo para irrigação e drenagem**. Porto Alegre: PRONI-IPH-UFRGS, s.d, 1986. 216p.

COELHO NETTO, A. L. Hidrologia de encosta na interface com a geomorfologia. In: GUERRA, A. J. T.; CUNHA, S. B. da. (Orgs). **Geomorfologia**: uma atualização de bases e conceitos. 3ª ed. Rio de Janeiro: Editora Bertrand Brasil S. A. 1998.

COMPANHIA DE PESQUISAS E RECURSOS MINERAIS - CPRM. **Mapa Geológico do Estado do Rio Grande do Sul**. Escala 1:750.000. CPRM, 1 CD - ROM, 2008.

COMPANHIA DE PESQUISAS E RECURSOS MINERAIS – CPRM. Disponível em: **Poço 5** <http://siagasweb.cprm.gov.br/layout/detalhe.php?ponto=4300001117> e **Poço 18** <http://siagasweb.cprm.gov.br/layout/detalhe.php?ponto=4300008291>. Acesso em 09/09/2010.

CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE - CONAMA. Resolução nº. 303, de 20 de março de 2002. **Dispõe sobre parâmetros, definições e limites de áreas de preservação permanente**. Disponível em: <<http://www.mma.gov.br/conama/>>. Acesso em: 15 jan. 2009.

CONSELHO NACIONAL DE MEIO AMBIENTE - CONAMA. Resolução nº. 357, de 13 de março de 2005. **Dispõe sobre a classificação dos corpos de água e diretrizes ambientais**. Substitui a Resolução CONAMA nº. 20 de 18 de junho de 1986. Diário Oficial [da] República Federativa do Brasil, Poder Executivo Brasília, DF, 2005.

CONSELHO NACIONAL DE RECURSOS HÍDRICOS - CNRH (Brasil). Resolução nº. 15, de Janeiro de 2001, art. 1. Sistema Nacional de Gerenciamento de Recursos Hídricos - SINGREH, 2001.

DALMOLIN, R. S. D. PEDRON, F. de A.; AZEVEDO, A. C. de. Modificações do solo em áreas urbanas. In: **II FÓRUM SOLOS E AMBIENTE**, Santa Maria, Orium, 2006.

DREW, D. **Processos interativos homem - meio ambiente**. 5. ed. Rio de Janeiro: Bertrand Brasil, 2002.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA - EMBRAPA. Centro Nacional de Pesquisa de Solos. **Sistema Brasileiro de Classificação de solos**. Brasília: Embrapa Produção de Informação; Rio de Janeiro: EMBRAPA, 1999.

\_\_\_\_\_. Centro Nacional de Pesquisa de Solos. **Sistema Brasileiro de Classificação de Solos**. Brasília: EMBRAPA/CNPS; Rio de Janeiro, 2006.

FIORIN, T. T. **Estimativa da infiltração de água no solo a partir de pedofunções**. 2008, 116f. Tese (Doutorado em Ciência do Solo) - Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, RS, 2008.

FLORENZANO, T. G. **Imagens de satélite para estudos ambientais**. Edição única, São Paulo, 2002.

FLORES, C. A. **Mapa de solos e Legenda de identificação**: Carta Topográfica Vila Kramer, São Francisco de Assis, RS, 2009.

FOSTER, S. S. D.; HIRATA, R. C. A.; GOMES, D.; D'ELIA, M.; PARIS, M. **Groundwater quality protection**: a guide for water utilities, municipal authorities and agencies. Washinton: The Word Bank, 2002.

FOSTER, S. S. D.; HIRATA, R.; GOMES, D.; D'ELIA, M.; PARIS, M. **Proteção da qualidade da água subterrânea**: um guia para empresas de abastecimento de água, órgãos municipais e agências ambientais. GW. MATE: 104 p. (trad.) Servmar, São Paulo. 2006.

GUERRA, A. J. T. Processos erosivos nas encostas. In: GUERRA, A. J. T.; CUNHA, S. B. da. (Orgs). **Geomorfologia**: uma atualização de bases e conceitos. 3ª ed. Rio de Janeiro: Editora Bertrand Brasil S. A. 1998.

HAMZA, M. H. et al. A GIS-based DRASTIC vulnerability and net recharge reassessment in an aquifer of a semi-arid region (Metline-Ras Jebel-Raf Raf aquifer, Northern Tunisia). **Journal of Environmental Management** 84, 2007. p. 12–19.

HAUSMAN, A. **Províncias Hidrogeológicas do Rio Grande do Sul**. Acta Geológica Leopoldensia. Série Mapas. São Leopoldo, RS. 1995.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA - IBGE. **Mapa de Solos de Santiago, RS**. Escala 1:1.000.000. IBGE, 2003.

HEATH, R. C. United States Geological Survey Water Supply Paper 2220. **Hidrologia Básica de Água Subterrânea**. Tradução para o português Mario Wrege e Paul Potter. UFRGS/IPH, 1983.

LEITÃO, T. E.; FERREIRA, J. P. L.; OLIVEIRA, M. M.; MOINANTE, M. J. Poluição de águas subterrâneas: principais problemas, processos de prevenção e de reabilitação. In: **6º SIMPÓSIO DE HIDRÁULICA E RECURSOS HÍDRICOS DOS PAÍSES DE LINGUA OFICIAL PORTUGUESA**. Cabo Verde, 2003. p. 78-81.

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.

LEPSCH, I. F. et al; **Manual para levantamento utilitário do meio físico e classificação de terras no sistema de capacidade de uso**. Campinas, SP: SBCS, 1991. 175 p.

LIBÂNIO, M. **Fundamentos de qualidade e tratamento de água**. Campinas, SP: Editora Átomo, 2005.

LOPES, M. F. de O.; VASCONCELOS, S. M. S.; GOMES, D. F. Avaliação da qualidade das águas subterrâneas no município de Ocara – Ceará. **Revista de Geologia**, Vol. 21, nº. 1, 2008. p. 35 - 48.

MACIEL FILHO, C. L. **Carta Geotécnica de Santa Maria**. Santa Maria, Imprensa Universitária: 1990.

\_\_\_\_\_. **Introdução à Geologia de Engenharia**. 3 ed. Santa Maria: Ed. da UFSM, 2008.

MACIEL FILHO, C. L.; SARTORI, P. L. P. Aspectos estruturais da região de São Francisco de Assis, RS. **Ciência e Natura**, v.1, 1979. p. 53-65.

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.

MELO JUNIOR, H. R. de. **Mapeamento da Vulnerabilidade e Análise de risco de contaminação como instrumentos de proteção das Águas Subterrâneas em Áreas Industriais: caso de ALBRAS, Barcarena - PA.** 2002, 138f. Dissertação (Mestrado em Geologia e Geoquímica) - Belém: Universidade Federal do Pará, 2002.

MELO, J. G. de; STEIN, P.; VASCONCELOS, M.B.; SILVA, F. H. R. da. Recarga do aquífero Açú na borda sudoeste da bacia Potiguar Trecho Apodi-Upanema. **Revista de Geologia**, Vol. 19, nº. 1, 2006. p. 61 - 72.

MENESES, L. F. de; SILVA, T. C. da; GADELHA, C. L. M.; FIGUEIREDO, E. C. T. P. de. Elaboração de Mapa de Vulnerabilidade dos Aquíferos Superiores no Município de João Pessoa - PB, Através de Técnicas de Geoprocessamento. **Revista Tecnologia**. Fortaleza, v. 30, n.1. 2009. p. 123-132.

MIGUEL, P. **Caracterização Pedológica, Uso da Terra e Modelagem da Perda de Solo em Áreas de Encosta do Rebordo do Planalto do RS.** 2010, 116f. Dissertação (Mestrado em Ciência do Solo) - Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, RS, 2010.

MINISTÉRIO DA SAÚDE. **Portaria n. 518, de 25 de março de 2004.** Atualiza as disposições da Portaria nº. 1469 de 29 de dezembro de 2000. Brasília, 2004.

NASCIMENTO, P. C. do; GIASSON, E.; INDA JR., A. V. Aptidão de uso dos solos e meio ambiente. In: Azevedo, A. C. de; Dalmolin, R. S. D.; Pedron, F. de A. (editores) **Solos & Ambiente**. I Fórum. Santa Maria: Pallotti, 2004.

POELKING, E.L. **Aptidão, evolução e conflitos de uso das terras no município de Itaara, RS.** 2007, 67f. Dissertação (Mestrado em Ciência do Solo) - Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, RS, 2007.

PRESS, F. et al. **Para entender a terra.** 4. ed. Porto Alegre, RS : Bookman, 2006.

RAMALHO FILHO, A; BEEK, K. J. **Sistema de avaliação da aptidão agrícola das terras.** 3. ed. Rio de Janeiro: EMBRAPA-CNPS, 1995.

RAHMAN, A. A GIS based DRASTIC model for assessing groundwater vulnerability in shallow aquifer in Aligarh, India. **Applied Geography**, 2007.

RAUBER, A. C. C. **Diagnóstico urbano ambiental do município de Santa Maria - RS**. 2008, 94f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, RS, 2008.

RIBEIRO C. S. et al. O Desafio da delimitação de áreas de preservação permanente. **Revista Árvore**. Viçosa: Minas Gerais. v. 29, nº. 2, 2005. p. 203-212.

ROBINS, N.S.; CHILTON, P.J.; COBBING, J.E. Adapting existing experience with aquifer vulnerability and groundwater protection for Africa. **Journal of African Earth Sciences** 47, 2007. p. 30 - 38.

ROCHA, M. B. B.; SEER, H. J. Fisiografia e uso da terra no município de Araxá, Minas Gerais. Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais. Campus de Araxá - Laboratório de Geoprocessamento. **Revista Brasileira de Cartografia** Nº. 60/02, 2008.

SILVA, R. F. da; RIGHES, A. A. Técnicas de infiltração e conservação de água no solo. In: RIGHES, A. A.; BURIOL, G. A. B.; BOER, N. (orgs). **Água e Educação: princípios e estratégias de uso e conservação**. Santa Maria: Centro Universitário Franciscano, 2009.

SILVEIRA, A. L. L. da. Ciclo hidrológico e bacia hidrográfica. In: TUCCI, C. E. M. **Hidrologia: ciência e aplicação**. 3º ed. Porto Alegre, RS: Ed. da UFRGS, 2002.

SILVÉRIO DA SILVA, J. L.; MAZIERO, L.; SANTOS, E. F. dos. Impactos da atividade humana sobre o solo. In: Azevedo, A. C. de; Dalmolin, R. S. D.; Pedron, F. de A. (editores). **Solos & Ambiente**. I Fórum. Santa Maria: Pallotti, 2004.

SILVÉRIO DA SILVA, J. L.; BAUMHARDT, E.; DESCOVI FILHO, L. L. V.; CRUZ, J. C.; SALLES DA SILVA, A.; MAZIEIRO, E. **Avaliação preliminar da flutuação do nível freático em Microbacias Representativas**. XVIII Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, 2009.

SOUSA, R. F. de; BARBOSA, M. P.; SOUSA JÚNIOR, S. P. de; GUIMARÃES, C. L. **Estudo da degradação das terras do município de São Domingos do Cariri - Estado da Paraíba**. Caminhos de Geografia. Uberlândia. v. 8, nº. 22, 2007. p. 130 - 136.

STRECK, E. V. et al. **Solos do Rio Grande do Sul**. 2. ed. Porto Alegre: EMATER/RS-ASCAR, 2008. 222p.

STÜRMER, S. L. K. **Infiltração de água em Neossolos Regolíticos do rebordo do Planalto do Rio Grande do Sul.** 2008, 104f. Dissertação (Mestrado em Ciência do Solo) - Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, RS, 2008.

SUERTEGARAY, D. M. A. Desertificação: Recuperação e Desenvolvimento Sustentável. In: GUERRA, A. J. T.; CUNHA, S. B. da. (org.) **Geomorfologia e Meio Ambiente.** Rio de Janeiro: Bertrand Brasil, 1996.

TAVARES, P. R. L. et al. **Mapeamento da vulnerabilidade à contaminação das águas subterrâneas localizadas na Bacia Sedimentar do Araripe, Estado do Ceará, Brasil.** REM: R. Esc. Minas, Ouro Preto, 62(2): 2009. p. 227-236.

TEIXEIRA, W. TOLEDO, M. C. M.; FAIRCHILD, T. R. et al. (orgs). **Decifrando a Terra.** São Paulo: Oficina de textos, 2000.

THIRUMALAIVASAN, D.; KARMEGAM, M., VENUGOPAL, K. AHP-DRASTIC: software for specific aquifer vulnerability assessment using DRASTIC model and GIS. **Environmental Modelling & Software.** 18, 2003. p. 645 - 656.

TUNDISI, J. G. **Água no século XXI: enfrentando a escassez.** 2ª ed. São Carlos: RiMa, 2005.

VOGEL, M. M. **Avaliação da Vulnerabilidade Natural à contaminação dos recursos hídricos subterrâneos na Região Cultural da Quarta Colônia de Imigração Italiana, RS.** 2008, 138f. Dissertação (Mestrado em Geografia). Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, RS, 2008.

WENDLAND, E.; BARRETO, C.; GOMES, L. H.; PAIVA, J. B. D. Balanço hídrico em zona de afloramento do Sistema Aquífero Guarani a partir do monitoramento hidrogeológico em bacia representativa. **Aquífero Guarani.** Avanços no conhecimento para a sua gestão sustentável. Primeira edición, Montivideo, 2007. p. 139 – 155.

## **ANEXOS**

**ANEXO 1 – Banco de dados sobre os poços presentes na área de abrangência da carta topográfica Vila Kramer, São Francisco de Assis, RS.**

Poço	Código do poço	Nome	UTM (Norte/Sul)	UTM (Leste/Oeste)	Nível Estático (m)	Formação Geológica	Tipo	Localidade
1			6738728	689643	2,85	Serra Geral	Escavado	Picada do Padre
2			6739238	689886	2,47	Serra Geral	Escavado	Picada do Padre
3			6739370	690016	1,56	Serra Geral	Escavado	Picada do Padre
4	4300008276	IW064	6739554	690082	71,1	Serra Geral	Tubular	Picada do Padre
5	4300001117	17.12.SFA.50.RS	6741174	689401	1	Serra Geral	Tubular	Picada do Padre
6	4300008277	IW065	6744076	691758	8	Serra Geral	Tubular	Picada do Padre
7	4300008278	IW066	6744112	691593	10	Serra Geral	Tubular	Picada do Padre
8			6744756	692097	12	Serra Geral	Tubular	Picada do Padre
9	4300001112	17.07.SFA.45.RS	6752350	693203	3,8	Botucatu	Tubular	São Francisco de Assis
10	4300001111	17.06.SFA.44.RS	6755779	690725	29,4	Serra Geral	Tubular	São Francisco de Assis
11			6755280	690678	22,64	Serra Geral	Tubular	Limoeiro
12			6755591	690683	24,08	Serra Geral	Tubular	Limoeiro
13			6756236	686747	0,4	Serra Geral	Escavado	Esquina do Farinheiro
14	4300000984	17.05.SFA-43-RS	6755392	686211	1,25	Serra Geral	Tubular	Encruzilhada Farinheiro
15			6762573	683423	40	Botucatu	Tubular	Santa Rosa
16			6760856	680066	3,35	Botucatu	Escavado	Esquina Santa Rosa
17	4300000981	17.02.SFA-40-RS	6754551	681097	1,65	Serra Geral	Tubular	Vila Kramer
18	4300008291	IW079	6754315	680875	5	Serra Geral/ Botucatu	Tubular	Vila Kramer
19			6754653	680659	1,37	Serra Geral	Escavado	Vila Kramer
20			6755525	673221	11,14	Botucatu	Escavado	Formigueiro
21			6755412	673227	1,34	Botucatu	Escavado	Formigueiro
22	4300008290	IW078	6756340	672144	77	Serra Geral/Botucatu	Tubular	Morro Alegre (Est. Bom Retiro)
23			6756600	672354	3,25	Botucatu	Escavado	Morro Alegre (Est. Bom Retiro)
24	4300000982	17.03.SFA-41-	6750337	678845	15,6	Botucatu	Tubular	5º Distrito

		RS						
25			6747134	679489	0,3	Guará	Escavado	Taperão
26			6746379	679871	5,3	Guará	Escavado	Próximo Taquari
27			6746396	679818	5,27	Guará	Tubular	Próximo Taquari
28			6743824	681022	6	Botucatu	Tubular	Esquina Serrinha
29	4300001114	17.09.SFA.47.RS	6743461	681405	2,6	Serra Geral	Tubular	Entrada Espinilho
30	4300008295	IW083	6743278	685749	21,29	Serra Geral	Tubular	Associação de moradores de Espinilho
31			6744274	686058	31,36	Serra Geral	Tubular	Espinilho
32			6745306	687373	42,63	Serra Geral	Tubular	Espinilho
33			6745257	687385	2,43	Serra Geral	Escavado	Espinilho
34	4300008294	IW082	6745214	687268	41	Serra Geral	Tubular	Espinilho
35	4300001113	17.08.SFA.46.RS	6747656	688512	0,2	Serra Geral	Tubular	Entrada Espinilho
36	4300001115	17.10.SFA.48.RS	6737586	682874	15,5	Guará	Tubular	Cinamomo
37	4300008271	IW059	6738856	676173	80	Serra Geral/Botucatu	Tubular	Careipaco
38	4300008270	IW058	6740842	675249	55	Serra Geral/Botucatu	Tubular	Careipaco
39	4300001116	17.11.SFA.49.RS	6740136	677471	14,3	Guará	Tubular	São Francisco de Assis

**ANEXO 2 – Banco de dados do Modelo DRASTIC, fator S para a escala de 1:50.000, referente aos poços analisados na área de estudo (Carta Topográfica Vila Kramer).**

Poço	Código do poço	UTM (Norte/Sul)	UTM (Leste/Oeste)	DRASTIC																				Valor DRASTIC	
				D (C)	D (P)	D (I)	R (C)	R (P)	R (I)	A (C)	A (P)	A (I)	S (C)	S (P)	S (I)	T (C)	T (P)	T (I)	I (C)	I (P)	I (I)	C (C)	C (P)		C (I)
1		6738728	689643	9	5	45	3	4	12	5	3	15	8	2	16	5	1	5	5	5	25	1	3	3	121
2		6739238	689886	9	5	45	3	4	12	5	3	15	3	2	6	9	1	9	5	5	25	1	3	3	115
3		6739370	690016	9	5	45	3	4	12	5	3	15	3	2	6	9	1	9	5	5	25	1	3	3	115
4	4300008276	6739554	690082	1	5	5	3	4	12	5	3	15	8	2	16	5	1	5	5	5	25	1	3	3	81
5	4300001117	6741174	689401	10	5	50	3	4	12	5	3	15	8	2	16	9	1	9	5	5	25	1	3	3	130
6	4300008277	6744076	691758	7	5	35	3	4	12	5	3	15	8	2	16	5	1	5	5	5	25	1	3	3	111
7	4300008278	6744112	691593	5	5	25	3	4	12	5	3	15	8	2	16	9	1	9	5	5	25	1	3	3	105
8		6744756	692097	5	5	25	3	4	12	5	3	15	8	2	16	5	1	5	5	5	25	1	3	3	101
9	4300001112	6752350	693203	9	5	45	3	4	12	6	3	18	8	2	16	9	1	9	6	5	30	1	3	3	133
10	4300001111	6755779	690725	2	5	10	3	4	12	5	3	15	7	2	14	9	1	9	5	5	25	1	3	3	88
11		6755280	690678	3	5	15	3	4	12	5	3	15	7	2	14	9	1	9	5	5	25	1	3	3	93
12		6755591	690683	2	5	10	3	4	12	5	3	15	7	2	14	10	1	10	5	5	25	1	3	3	89
13		6756236	686747	10	5	50	3	4	12	5	3	15	7	2	14	5	1	5	5	5	25	1	3	3	124
14	4300000984	6755392	686211	10	5	50	3	4	12	5	3	15	7	2	14	5	1	5	5	5	25	1	3	3	124
15		6762573	683423	1	5	5	3	4	12	6	3	18	5	2	10	10	1	10	6	5	30	1	3	3	88
16		6760856	680066	9	5	45	3	4	12	6	3	18	3	2	6	9	1	9	6	5	30	1	3	3	123
17	4300000981	6754551	681097	9	5	45	3	4	12	5	3	15	3	2	6	9	1	9	5	5	25	1	3	3	115
18	4300008291	6754315	680875	7	5	35	3	4	12	5	3	15	3	2	6	9	1	9	5	5	25	1	3	3	105
19		6754653	680659	10	5	50	3	4	12	5	3	15	3	2	6	9	1	9	5	5	25	1	3	3	120
20		6755525	673221	5	5	25	3	4	12	6	3	18	4	2	8	9	1	9	6	5	30	1	3	3	105
21		6755412	673227	10	5	50	3	4	12	6	3	18	3	2	6	9	1	9	6	5	30	1	3	3	128
22	4300008290	6756340	672144	1	5	5	3	4	12	5	3	15	4	2	8	5	1	5	5	5	25	1	3	3	73
23		6756600	672354	9	5	45	3	4	12	6	3	18	4	2	8	5	1	5	6	5	30	1	3	3	121
24	4300000982	6750337	678845	3	5	15	3	4	12	6	3	18	3	2	6	5	1	5	6	5	30	1	3	3	89
25		6747134	679489	10	5	50	3	4	12	4	3	12	4	2	8	10	1	10	4	5	20	1	3	3	115
26		6746379	679871	7	5	35	3	4	12	4	3	12	6	2	12	5	1	5	4	5	20	1	3	3	99
27		6746396	679818	7	5	35	3	4	12	4	3	12	6	2	12	5	1	5	4	5	20	1	3	3	99
28		6743824	681022	7	5	35	3	4	12	6	3	18	4	2	8	9	1	9	6	5	30	1	3	3	115
29	4300001114	6743461	681405	9	5	45	3	4	12	5	3	15	4	2	8	9	1	9	5	5	25	1	3	3	117
30	4300008295	6743278	685749	3	5	15	3	4	12	5	3	15	8	2	16	9	1	9	5	5	25	1	3	3	95
31		6744274	686058	1	5	5	3	4	12	5	3	15	8	2	16	5	1	5	5	5	25	1	3	3	81
32		6745306	687373	1	5	5	3	4	12	5	3	15	8	2	16	9	1	9	5	5	25	1	3	3	85
33		6745257	687385	9	5	45	3	4	12	5	3	15	8	2	16	9	1	9	5	5	25	1	3	3	125
34	4300008294	6745214	687268	1	5	5	3	4	12	5	3	15	8	2	16	5	1	5	5	5	25	1	3	3	81
35	4300001113	6747656	688512	3	5	15	3	4	12	5	3	15	8	2	16	9	1	9	5	5	25	1	3	3	95
36	4300001115	6737586	682874	3	5	15	3	4	12	4	3	12	6	2	12	5	1	5	4	5	20	1	3	3	79
37	4300008271	6738856	676173	1	5	5	3	4	12	5	3	15	3	2	6	9	1	9	5	5	25	1	3	3	75
38	4300008270	6740842	675249	1	5	5	3	4	12	5	3	15	3	2	6	9	1	9	5	5	25	1	3	3	75
39	4300001116	6740136	677471	5	5	25	3	4	12	4	3	12	4	2	8	9	1	9	4	5	20	1	3	3	89

**ANEXO 3 – Banco de dados do Modelo DRASTIC, fator S para a escala de 1:1.000.000, referente aos poços analisados na área de estudo (Carta Topográfica Vila Kramer).**

Poço	Código do poço	UTM (Norte/Sul)	UTM (Leste/Oeste)	DRASTIC																				Valor DRASTIC	
				D (C)	D (P)	D (I)	R (C)	R (P)	R (I)	A (C)	A (P)	A (I)	S (C)	S (P)	S (I)	T (C)	T (P)	T (I)	I (C)	I (P)	I (I)	C (C)	C (P)		C (I)
1		6738728	689643	9	5	45	3	4	12	5	3	15	8	2	16	5	1	5	5	5	25	1	3	3	121
2		6739238	689886	9	5	45	3	4	12	5	3	15	7	2	14	9	1	9	5	5	25	1	3	3	123
3		6739370	690016	9	5	45	3	4	12	5	3	15	7	2	14	9	1	9	5	5	25	1	3	3	123
4	4300008276	6739554	690082	1	5	5	3	4	12	5	3	15	7	2	14	5	1	5	5	5	25	1	3	3	79
5	4300001117	6741174	689401	10	5	50	3	4	12	5	3	15	7	2	14	9	1	9	5	5	25	1	3	3	128
6	4300008277	6744076	691758	7	5	35	3	4	12	5	3	15	7	2	14	5	1	5	5	5	25	1	3	3	109
7	4300008278	6744112	691593	5	5	25	3	4	12	5	3	15	7	2	14	9	1	9	5	5	25	1	3	3	103
8		6744756	692097	5	5	25	3	4	12	5	3	15	7	2	14	5	1	5	5	5	25	1	3	3	99
9	4300001112	6752350	693203	9	5	45	3	4	12	6	3	18	7	2	14	9	1	9	6	5	30	1	3	3	131
10	4300001111	6755779	690725	2	5	10	3	4	12	5	3	15	7	2	14	9	1	9	5	5	25	1	3	3	88
11		6755280	690678	3	5	15	3	4	12	5	3	15	7	2	14	9	1	9	5	5	25	1	3	3	93
12		6755591	690683	2	5	10	3	4	12	5	3	15	7	2	14	10	1	10	5	5	25	1	3	3	89
13		6756236	686747	10	5	50	3	4	12	5	3	15	7	2	14	5	1	5	5	5	25	1	3	3	124
14	4300000984	6755392	686211	10	5	50	3	4	12	5	3	15	7	2	14	5	1	5	5	5	25	1	3	3	124
15		6762573	683423	1	5	5	3	4	12	6	3	18	4	2	8	10	1	10	6	5	30	1	3	3	86
16		6760856	680066	9	5	45	3	4	12	6	3	18	4	2	8	9	1	9	6	5	30	1	3	3	125
17	4300000981	6754551	681097	9	5	45	3	4	12	5	3	15	4	2	8	9	1	9	5	5	25	1	3	3	117
18	4300008291	6754315	680875	7	5	35	3	4	12	5	3	15	4	2	8	9	1	9	5	5	25	1	3	3	107
19		6754653	680659	10	5	50	3	4	12	5	3	15	4	2	8	9	1	9	5	5	25	1	3	3	122
20		6755525	673221	5	5	25	3	4	12	6	3	18	4	2	8	9	1	9	6	5	30	1	3	3	105
21		6755412	673227	10	5	50	3	4	12	6	3	18	4	2	8	9	1	9	6	5	30	1	3	3	130
22	4300008290	6756340	672144	1	5	5	3	4	12	5	3	15	4	2	8	5	1	5	5	5	25	1	3	3	73
23		6756600	672354	9	5	45	3	4	12	6	3	18	4	2	8	5	1	5	6	5	30	1	3	3	121
24	4300000982	6750337	678845	3	5	15	3	4	12	6	3	18	4	2	8	5	1	5	6	5	30	1	3	3	91
25		6747134	679489	10	5	50	3	4	12	4	3	12	4	2	8	10	1	10	4	5	20	1	3	3	115
26		6746379	679871	7	5	35	3	4	12	4	3	12	4	2	8	5	1	5	4	5	20	1	3	3	95
27		6746396	679818	7	5	35	3	4	12	4	3	12	4	2	8	5	1	5	4	5	20	1	3	3	95
28		6743824	681022	7	5	35	3	4	12	6	3	18	4	2	8	9	1	9	6	5	30	1	3	3	115
29	4300001114	6743461	681405	9	5	45	3	4	12	5	3	15	8	2	16	9	1	9	5	5	25	1	3	3	125
30	4300008295	6743278	685749	3	5	15	3	4	12	5	3	15	7	2	14	9	1	9	5	5	25	1	3	3	93
31		6744274	686058	1	5	5	3	4	12	5	3	15	7	2	14	5	1	5	5	5	25	1	3	3	79
32		6745306	687373	1	5	5	3	4	12	5	3	15	7	2	14	9	1	9	5	5	25	1	3	3	83
33		6745257	687385	9	5	45	3	4	12	5	3	15	7	2	14	9	1	9	5	5	25	1	3	3	123
34	4300008294	6745214	687268	1	5	5	3	4	12	5	3	15	7	2	14	5	1	5	5	5	25	1	3	3	79
35	4300001113	6747656	688512	3	5	15	3	4	12	5	3	15	7	2	14	9	1	9	5	5	25	1	3	3	93
36	4300001115	6737586	682874	3	5	15	3	4	12	4	3	12	4	2	8	5	1	5	4	5	20	1	3	3	75
37	4300008271	6738856	676173	1	5	5	3	4	12	5	3	15	4	2	8	9	1	9	5	5	25	1	3	3	77
38	4300008270	6740842	675249	1	5	5	3	4	12	5	3	15	4	2	8	9	1	9	5	5	25	1	3	3	77
39	4300001116	6740136	677471	5	5	25	3	4	12	4	3	12	4	2	8	9	1	9	4	5	20	1	3	3	89