



Levantamento de dados geomorfológicos e hidrogeológicos para mapeamento de vulnerabilidade de contaminação do Aquífero Guarani nos municípios de Portão e Estância Velha/RS utilizando o método DRASTIC

(doi:10.4136/ambi-agua.161)

Kellen Muradás¹; Daniel Wojahn²; Osmar G. Wöhl Coelho³

PPGEO - Universidade do Vale do Rio dos Sinos - UNISINOS

E-mail: ¹kellenmuradas@hotmail.com; ²dwgeologia@terra.com.br; ³osmar@unisinos.com

RESUMO

O mapeamento de vulnerabilidade de contaminação de águas subterrâneas tem sido amplamente desenvolvido e incluído em planos municipais de gerenciamento ambiental, além de estar referido na Resolução 396 do CONAMA (Brasil, 2008). Portão e Estância Velha/RS apresentam uma situação potencial de contaminação devido à atividade industrial. O Sistema Aquífero Guarani (SAG), na área de estudo, é representado pelos arenitos das Formações Piramboia e Botucatu sendo parcialmente confinado pelo Aquífero Serra Geral. Para a construção deste mapa, foi escolhido o método DRASTIC. A pouca profundidade dos níveis de água subterrânea e a litologia sedimentar são fatores decisivos para uma vulnerabilidade intermediária a alta. Os solos foram separados em domínios de acordo com a sua textura. O domínio argissolo 1 indica um comportamento impermeabilizante. Os ensaios de infiltração e as camadas espessas de argila confirmam a baixa condutividade hidráulica dessa unidade pedológica, constituindo proteção natural do aquífero. Porém, na área de estudo predomina o argissolo 2, mais arenoso. A presença restrita de argilominerais expansivos aumenta a suscetibilidade do meio. O estudo de risco está diretamente relacionado à ocupação de áreas de alta vulnerabilidade de contaminação do aquífero. A eficiência do mapa está associada à interdependência dos parâmetros envolvendo aspectos hidrogeológicos e geomorfológicos. Ficou evidenciado que 25% da área apresenta alto grau de vulnerabilidade; 72,4%, com grau intermediário e, apenas 2,6%, com baixo grau de vulnerabilidade à contaminação de águas subterrâneas.

Palavras-chave: vulnerabilidade de águas subterrâneas; gestão de recursos hídricos.

Survey of geomorphological and hydrogeological data for mapping groundwater vulnerability of the Guarani Aquifer in Portão and Estância Velha/RS using the DRASTIC method

ABSTRACT

The vulnerability mapping of groundwater contamination has been widely developed and included in municipal plans to guide environmental management policies and it is recommended in CONAMA 396 Resolution (Brasil, 2008). Portão and Estância Velha, RS regions present potencial risk of contamination due to industrial activities. The Guarani Aquifer System (SAG) in the study area is composed by the Pirambóia and Botucatu Formations. Both formations are formed by sandstones and they are partially confined by the basalts of the Serra Geral Aquifer. The method DRASTIC was chosen to build the vulnerability map. The shallow water table and the sedimentary lithology are indicative

factors of intermediate to high vulnerability. The soils were divided in domains according to their texture. The first domain of claysoil has an impermeable behavior. The infiltration tests and thick layers of clay confirm a low hydraulic conductivity of this pedological unit, providing a natural protection of the aquifer. However, in the study area, the second claysoil domain is dominant and has more diffuse sand in the profile. The restricted presence of expansive clay minerals increases the vulnerability. Occupancy of areas of high vulnerability is directly related to the contamination of the aquifer. The efficiency of the map is related to the interdependence of parameters involving hydrogeological and geomorphological aspects. Thus, it has been observed a high degree of vulnerability to groundwater contamination in 25% of the area, an intermediate vulnerability in 72.4%, and a low degree in only 2.6% of the area.

Keywords: groundwater vulnerability; water resources management.

1. INTRODUÇÃO

Muitas situações de impacto ambiental na Bacia Hidrográfica do Rio dos Sinos, em parte documentadas pela FEPAM¹ (2007) e outras instituições, têm induzido a propor projetos socioambientais na área de recursos hídricos. O mapeamento de vulnerabilidade de contaminação de aquíferos é um tema atual em planos de gestão ambiental e a Resolução do CONAMA nº 396/2008 vem corroborar a importância deste estudo. Essa Resolução dispõe sobre o enquadramento, prevenção e controle de poluição das águas subterrâneas para a caracterização da qualidade. O enquadramento é realizado por aquífero, considerando as características hidrogeológica e hidrogeoquímica, a vulnerabilidade e os riscos de poluição, o uso e a ocupação do solo, a viabilidade de uso para cada classe e a localização das fontes potenciais de poluição. As principais considerações dessa resolução, vinculando a prevenção e o controle da poluição ao uso dos recursos hídricos, vêm ao encontro da necessidade de proteção das águas subterrâneas cuja degradação é lenta e sua recuperação onerosa, por vezes não totalmente recuperável. A mobilidade de agroquímicos e outros diversos contaminantes, tanto no solo como na rocha constituinte do aquífero, é controlada por uma complexidade de fatores que dificultam a exatidão de prognóstico e diagnóstico de plumas de contaminação.

Sob esse enfoque, o presente trabalho está inserido em um projeto abrangente, o PLANOSINOS, contemplando o estudo de Vulnerabilidade e do Risco de contaminação de águas subterrâneas nos municípios de Estância Velha e Portão, região metropolitana de Porto Alegre (Figura 1).

Esses municípios fazem parte da área de ocorrência do Sistema Aquífero Guarani (SAG), constituindo uma área potencial de contaminação das águas subterrâneas e superficiais, em função dos descartes de esgotos domésticos e dos efluentes industriais, além da alta taxa de urbanização e do saneamento insuficiente. Os indicadores socioeconômicos-ambientais do IDESE² para esses municípios apontam para a necessidade de investimentos em modelos eficientes de vulnerabilidade e de risco de contaminação de águas subterrâneas, com vistas a gestão ambiental. A produtividade de Portão e Estância Velha 2006, IBGE-PIA, indica 47 e 76% a indústria de transformação de setor coureiro-calçadista, para esses municípios respectivamente.

O objetivo do trabalho é avaliar a vulnerabilidade e os riscos de contaminação do SAG nos municípios de Estância Velha e Portão. Para isso, características relevantes do meio físico para o estudo de vulnerabilidade do aquífero foram levantadas e aplicadas ao método DRASTIC. As classes de vulnerabilidade baixa, intermediária e alta foram relacionadas com

¹ Fundação Estadual de Proteção Ambiental Henrique Luiz Roessler - Rio Grande do Sul

² Índice de Desenvolvimento Socioeconômico.

o uso do solo. O aquífero sofre influência direta do uso e da ocupação do solo. A recarga das águas subterrâneas tem sua qualidade e quantidade alteradas por diversos fatores como: a impermeabilização urbana, o escoamento facilitado pela canalização, a sua exploração e contaminação.

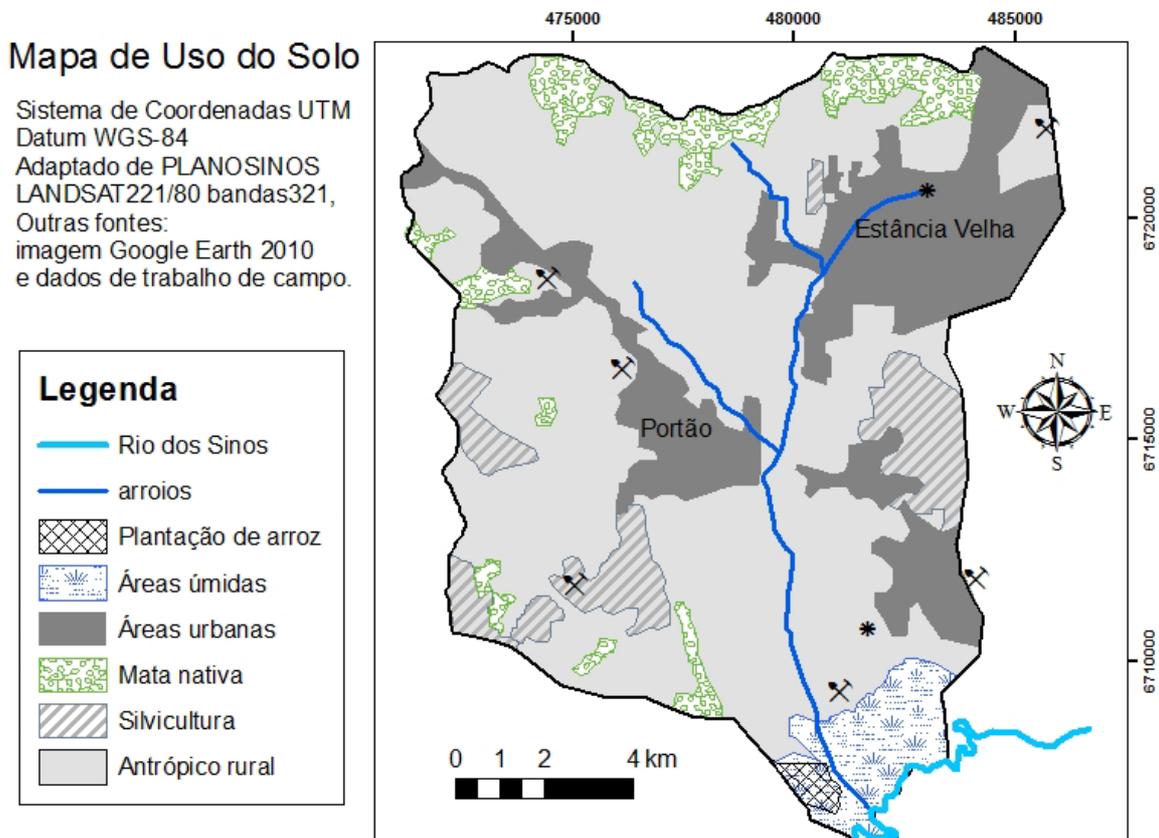


Figura 1. Localização da área de estudo.

Rahman (2008) salienta a relação direta da contaminação de recursos hídricos com os seguintes fatores: elevado crescimento da população, crescimento não planejado das cidades, padrões misturados dos tipos de uso do solo, saneamento inadequado ou ausente, disposição inadequada de resíduos domésticos e industriais. Este tema é de interesse mundial, pois a contaminação de águas subterrâneas é uma realidade cada vez mais presente (Bekesi e McConchie, 1999; Almasri, 2008; Nobre et al., 2007; Rahman, 2008), principalmente quando se trata de fonte de abastecimento. Existem vários estudos relacionados à vulnerabilidade e à avaliação de risco de contaminação por agroquímicos, contaminantes característicos da produção industrial local e características específicas da interação com o meio (Aller et al., 1987; Sacunda et al., 1998; Almasri, 2008; Leone et al., 2009).

A uniformização, tanto de uma metodologia quanto de uma linguagem comum, faz necessária a convergência conceitual de vulnerabilidade. Para Oliveira e Lobo Ferreira (2004) “a sensibilidade da qualidade das águas subterrâneas a uma carga poluente é função apenas das características intrínsecas do aquífero”. Segundo Lobo Ferreira (1997), o método propõe que a vulnerabilidade seja definida como “a capacidade do meio atenuar a ação de cargas contaminantes”. O risco de poluição da água subterrânea depende da vulnerabilidade do aquífero e também da exposição ao contaminante. Antonakos e Lambrakis (2007) sugerem que a avaliação do pesticida e da sua interação com o meio é mais significativa do que considerar esses dois fatores separadamente. Neste trabalho, consideramos vulnerabilidade como a suscetibilidade do meio às cargas poluentes, controlada por características intrínsecas do aquífero.

Entre os fatores controladores da vulnerabilidade estão o relevo, a profundidade do aquífero, o tempo de residência, os tipos de rocha e de solo e a precipitação. A diferença entre vulnerabilidade intrínseca e específica é que a primeira aborda a possibilidade de ocorrer contaminação sem considerar o contaminante, enquanto a específica refere-se à vulnerabilidade a um contaminante de interesse, ou representativo na região, e sua dispersão no meio (Oliveira e Lobo Ferreira, 2004; Almasri, 2008). Para um plano de gestão ambiental municipal, o estudo de vulnerabilidade em relação a um contaminante específico muitas vezes não se justifica por envolver maior tempo de pesquisa, custo com análises químicas, uma vez que a produção de efluentes é muito diversificada, como na área de estudo deste trabalho. Portanto, a vulnerabilidade é mapeada a partir do conceito de vulnerabilidade intrínseca. Para Rahmam (2008), o mapeamento da vulnerabilidade é definido como uma técnica que quantifica a sensibilidade do meio e contribui por ser uma ferramenta de visualização das áreas vulneráveis, em que se objetiva o planejamento ambiental. A utilização de softwares para modelagem tem se mostrado uma eficiente ferramenta para avaliação e gerenciamento ambiental.

O processo de atenuação de contaminantes foi discutido pela *Environmental Protection Agency* (EPA / USA) (Aller, 1987), a qual cita algumas variáveis envolvidas na atenuação dos contaminantes. Os fatores que interferem no grau de atenuação são: 1) Tempo que o contaminante está em contato com o material, 2) Tamanho de grão e características físico-químicas do material pelo qual passa o contaminante, 3) Distância percorrida pelo contaminante. A caracterização mineralógica dos argilominerais auxilia no enquadramento dos tipos de solo na classificação do DRASTIC porque os argilominerais expansivos estão associados à retenção e liberação de íons de acordo com fatores climáticos e o volume do contaminante dispersivo no ambiente. Esse processo depende de propriedades físico-químicas da interação dos argilominerais e do contaminante/água e está associado a graus de vulnerabilidade relativa. Os argilominerais são filossilicatos com predominância de argila e possuem propriedades físico-químicas diferenciadas de acordo com a sua estrutura química. Incluem reações significativas como a tendência de alcançar o equilíbrio em sistemas água-sedimento na adsorção de cátions, por se comportarem como colóides iônicos, em que a superfície apresenta desequilíbrio de cargas (Langmuir, 1997). A esmectita tem estrutura 2:1, composta pela intercalação de duas camadas de tetraedros de sílica para uma camada de octaedros de alumina. Uma importante propriedade físico-química é a capacidade de sorção de moléculas nos *interlayers* entre os planos 2:1 para a compensação de carga elétrica. A capacidade de englobar moléculas, relacionada com a expansibilidade, faz com que a esmectita seja instável de acordo com as características do meio, como pH e temperatura, além da disponibilidade de cátions. Esse comportamento interfere diretamente na retenção, mas também na mobilidade de contaminantes e metais potencialmente tóxicos, formando pulsos hidráulicos. A presença de esmectita pode diminuir ainda mais a permeabilidade quando expandida. Porém, em períodos de estiagem, a retração das esmectitas pode fissurar o solo, permitindo a livre entrada dos poluentes, comum em vertissolos. Como esse argilomineral absorve, mas também libera íons, o método DRASTIC o coloca como fator que contribui para a alta vulnerabilidade do meio (Langmuir, 1997).

2. MATERIAL E MÉTODOS

O método aplicado para o estudo de vulnerabilidade e risco de contaminação de águas subterrâneas é sintetizada pelo fluxograma (Figura 2).

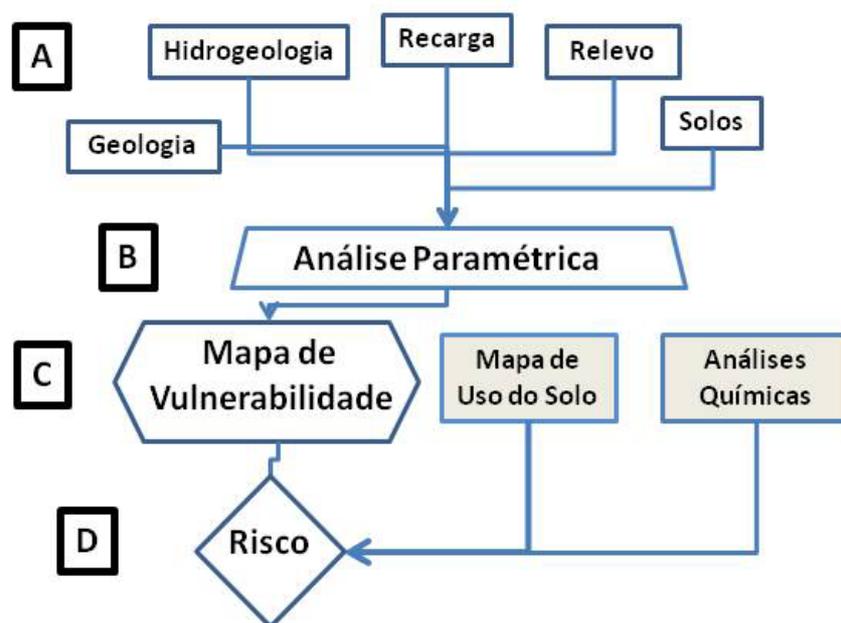


Figura 2. Fluxograma da abordagem metodológica.

A Etapa A trata da coleta de dados de campo e fontes como CPRM e CORSAN, assim como a confecção de mapas (tabela 1). A Etapa B constitui da análise paramétrica pela aplicação do índice DRASTIC. Esse índice apresenta-se de forma bastante completa por envolver variáveis como profundidade do nível da água (D), recarga (R), material do aquífero (A), tipo de solo (S), topografia (T), influência das características da zona vadosa (I) e condutividade hidráulica (C). Cada parâmetro do DRASTIC tem um mapa associado com um peso de 1 a 5, refletindo o grau de importância do parâmetro, como também uma pontuação (p) de 1 a 10 em função das características locais. Quanto maior o valor de p, mais vulnerável o ambiente se apresenta em relação ao parâmetro analisado. O peso do parâmetro é multiplicado por sua pontuação (p) e, somando-se ao final, todos os produtos e o somatório final representam a vulnerabilidade.

A equação que representa a relação matemática dos pesos e pontuações dos parâmetros, resume-se na equação 1.

$$V = 5.pD + 4.pR + 3.pA + 2.pS + 1.pT + 5.pI + 3.pC. \quad [1]$$

A seguir são explicitados os parâmetros desenvolvidos:

Parâmetro D Considera-se a aplicação do parâmetro D para diferentes conjuntos hidrogeológicos separadamente. No aquífero não confinado, pertencente ao SAG, os valores plotados do nível da água são dados pela expressão: cota do terreno/boca do poço (Z) subtraído do nível piezométrico (NA), obtendo-se a profundidade do nível estático determinada em poços tubulares (NE) pela interpolação desses valores. Quando o poço estava localizado no aquífero confinado, a profundidade foi redefinida ao topo do aquífero, que é base da camada confinante. Nesse caso, optou-se pelos valores expressos das cotas das nascentes.

Tabela 1. Descrição de coleta de dados correspondente à Etapa A.

Áreas de estudo	Dados	Processos e Técnicas	Produtos
Geologia	<ul style="list-style-type: none"> - Carta topográfica do Exército 1:50.000, Folhas: São Leopoldo, Novo Hamburgo, Montenegro e Morretes. - Mapa geológico CPRM (Programa Geologia do Brasil, 2008) - Imagens de satélite LANDSAT TM. - Fotos aéreas 1:60.000 (METROPLAN) - Trabalho de campo 	<ul style="list-style-type: none"> - Identificação da variação litológica, contato entre as litologias, controles estruturais - Sensoriamento remoto. - Compilação de dados em ambiente SIG por digitalização, poligonização, produção de planos de informação utilizando os Softwares ILWIS 3.3 e ArcGIS 9.3.1. 	<p>Mapa geológico e de Zona vadosa PARÂMETROS A e I</p>
Hidrogeologia	<p>Dados de nível estático de poços CPRM-SIAGAS e CORSAN</p> <p>Referências bibliográficas para dados de recarga (Marquezan, 2000).</p>	<ul style="list-style-type: none"> - Separação dos dados por domínio hidrogeológico - Interpolação por krigagem. <p>Separação de domínios de recarga</p>	<p>Superfície potenciométrica PARÂMETRO D</p> <p>Mapa de recarga PARÂMETRO R</p>
Recarga	Dados de condutividade hidráulica (Wojahn, no prelo).	Interpolação por krigagem	PARÂMETRO C
Relevo	<p>Curvas topográficas digitalizadas (Heine 2008).</p> <p>Modelo Numérico do Terreno</p>	<p>Interpolação pelo Software ILWIS 3.3</p> <p>Função declividade pelo Software ILWIS 3.3</p>	<p>Modelo Numérico do Terreno</p> <p>Mapa de declividade PARÂMETRO T</p>
Solos	Trabalho de campo	<p>Análise textural e estrutural do solo, relações geomorfológicas, coleta de solo por horizontes.</p> <p>Análise granulométrica de solo pela norma ABNT; Ensaio de Permeabilidade em solos da ABGE Boletim 04 - 3 edição - Junho de 1996</p>	<p>Mapa de domínio de solos PARÂMETRO S</p>

Parâmetro R O parâmetro de recarga considera as taxas de escoamento e evapotranspiração. Esses dados não são facilmente disponíveis, portanto, alguns dados bibliográficos foram utilizados a fim de inferir domínios de recarga. Os domínios foram separados fundamentalmente pela variação litológica que armazena água de forma diferenciada, no caso, os basaltos fraturados, as rochas sedimentares e os depósitos colúvio-aluvionares. A recarga para as condições de não confinamento do aquífero ocorre mais facilmente, sendo áreas mais vulneráveis. As curvas de isoietas, disponibilizadas pela CPRM-FEPAM, com valores de precipitação anual na área, variam de 1500 a 1600 mm/ano. Hausmann (apud Marquezan, 2000) indica o valor para a recarga de 8% da precipitação anual, para a região da Região Metropolitana de Porto Alegre. Esse valor foi atribuído para as formações sedimentares.

Parâmetro A As rochas que constituem o Sistema Aquífero Guarani na área de estudo foram delimitadas de acordo com as seguintes etapas: trabalho de campo, mapa geológico pela compilação do mapeamento já realizado pela CPRM (Wildner et al., 2008) e dados de poços (Wojahn, no prelo). Os lineamentos tectônicos foram identificados por meio de fotointerpretação de fotos aéreas de 1:60.000 adquiridas pela Metroplan (Porto Alegre) e imagens de satélite LANDSAT TM7 banda 4 e composição de bandas, e após, digitalizadas no software ArcGIS 9.0.

Parâmetro S O estudo do parâmetro solo envolveu duas etapas. A primeira etapa constou em levantamento de dados, como:

Análise de campo: características físicas e geomorfológicas. Os pontos de coleta de solo acompanharam a variação de relevo (plano, suave ondulado, ondulado) e declividade, contribuição do substrato rochoso assim como rastejo e variação de características estruturais e texturais de acordo com a localização no perfil topográfico.

Ensaio de permeabilidade foi executado em 24 pontos com base nas normas técnicas da ABGE (1996) - Ensaio de permeabilidade em solos.

Análise granulométrica contou com 12 perfis. As amostras foram coletadas por horizonte para análise granulométrica de cada perfil, sendo as análises realizadas no Laboratório de Sedimentologia da Unisinos, NESE - Núcleo de Estudos Sedimentares e Estratigráficos e Laboratório de Mecânica dos Solos – Unisinos. A distribuição granulométrica é obtida por peneiramento e sedimentação da fração silte/argila de acordo com a norma da ABNT 718418.

Difratometria de Raios-X com 08 perfis. As amostras foram preparadas para análise de mineralogia total e argilominerais em difratômetro de Raios-X com o equipamento Brüker – SIEMENS AXS Modelo D5000 (Laboratório de Difratometria de Raios-X - UFRGS). As condições analíticas para o método do pó, mineralogia total, foram a utilização da amostra moída com variação de ângulo de varredura de 2° a 70°; para argilominerais, o tempo de incidência do raios-X foi de 3s com variação do ângulo de 2° a 35° com condições analíticas de 40 kV e 25 mA. A fração menor que 4µm foi separada e esse procedimento ajudou a isolar significativamente a matéria orgânica da parte sobrenadante, de onde se tira o material para fazer a lâmina. A separação dessa fração foi repetida duas vezes. Esse último material foi levado à centrífuga 5000 rpm por 10 min. O material decantado foi coletado para fazer a lâmina, separação da fração menor que 4µm.

A segunda etapa de análise de solos constou na classificação da área de estudo em domínios de solo de acordo com as propriedades levantadas. A classificação dos solos em domínios dependeu da integração dos resultados obtidos de todas as análises, tanto de campo, quanto laboratoriais. No ambiente SIG, essas propriedades são georreferenciadas e verificadas

as suas respectivas distribuições espaciais, associações com o mapa geológico e modelo numérico do terreno (MNT)³.

Parâmetro T Esse parâmetro trata de um mapa de declividade construído a partir do modelo numérico do terreno (MNT) pelas curvas topográficas digitalizadas. As classes seguem os valores indicados pelo método DRASTIC/USEPA. A função *slope* foi calculada no software ILWIS 3.3.

Parâmetro I O material acima do aquífero está associado ao manto de alteração constituindo a zona vadosa.

Parâmetro C Os valores de condutividade hidráulica dos arenitos Pirambóia e Botucatu foram calculados para 12 amostras pelas normas da ABNT-NBR 7181.

Cada parâmetro do índice DRASTIC refere-se a um mapa que, no ambiente SIG trata-se de um plano de informação constituído de polígonos com pesos e pontuações. A criação dos planos de informação, tipo *shapefile* no ambiente SIG, foi realizada por meio dos softwares ILWIS 3.4 e ArcView 9.0 GIS. Essa é a etapa de classificação por pesos pelo método DRASTIC.

A Etapa C corresponde ao somatório de mapas paramétricos que resulta no mapa final de vulnerabilidade. Esse mapa é dividido em classes de vulnerabilidade, estas sendo divididas em intervalos de pontuação, variando de muito alta >199; alta 160 – 199; intermediária 120-159; baixa <120.

A Etapa D compreende o cruzamento do mapa final de vulnerabilidade e mapa de uso do solo a fim de identificar áreas vulneráveis expostas com a finalidade de proporcionar alguns apontamentos quanto à gestão territorial.

3. RESULTADOS

3.1. Geologia

O SAG na área de estudo é constituído por arenitos Pirambóia (Permotriássico) e Botucatu (Cretáceo), sendo mais vulnerável devido à porosidade dessas Formações (Tucci e Cabral, 2008). Os arenitos da Formação Pirambóia têm cor rosa claro a rosa avermelhado, por vezes esbranquiçado devido ao processo de caolinitização, e cor avermelhada pela presença de óxido de ferro. Os arenitos são bimodais, friáveis e com maior teor de argila que a Formação Botucatu (Heine, 2008). Na maioria dos afloramentos, observam-se espessas camadas com estratificações cruzadas acanaladas e tangenciais de médio a grande porte (Figura 3A), tratando-se de grandes paleodunas eólicas de cristas sinuosas com cosets com mais de 5m de espessura. As paleocorrentes indicam o sentido NO-NE. Essa formação é distinguida da Formação Botucatu por camadas tabulares sub-horizontais com variação granulométrica em sequência granocrescente ascendente (Figura 3B).

A área apresenta três domínios hidrogeológicos (Figura 4) correspondente a: i) Derrames basálticos da Formação Serra Geral; ii) Arenitos das Formações Pirambóia e Botucatu e, iii) Depósitos colúvio-aluvionares. O fluxo subterrâneo é condicionado principalmente pela porosidade, com condutividade hidráulica predominante entre $k= 1 \times 10^{-6}$ m/s a 1×10^{-8} m/s. As zonas de falha atuam possivelmente como conexões hidráulicas interderrame e estruturas de maior permeabilidade, inclusive recebendo recarga das unidades hidroestratigráficas sobrepostas.

Quando a superfície potenciométrica do SAG encontra-se abaixo do contato com a Formação Serra Geral, esta última não atua como superfície confinante. Nessa situação as zonas de falha deverão permitir a recarga do SAG a partir do aquífero Serra Geral, e mesmo com níveis potenciométricos elevados deverá ocorrer interação hídrica entre esses dois

³ Também referido como MDT (Modelo Digital do Terreno).

aqüíferos por meio das zonas de falha. O aquífero quaternário, constituído pelos depósitos colúvio-aluvionares ao longo da várzea dos rios, tem seus níveis piezométricos condicionados pela dinâmica fluvial, recebendo recarga superficial direta em toda a sua extensão, por precipitações pluviométricas, sendo bastante provável que receba aporte hídrico subterrâneo do aquífero Guarani.

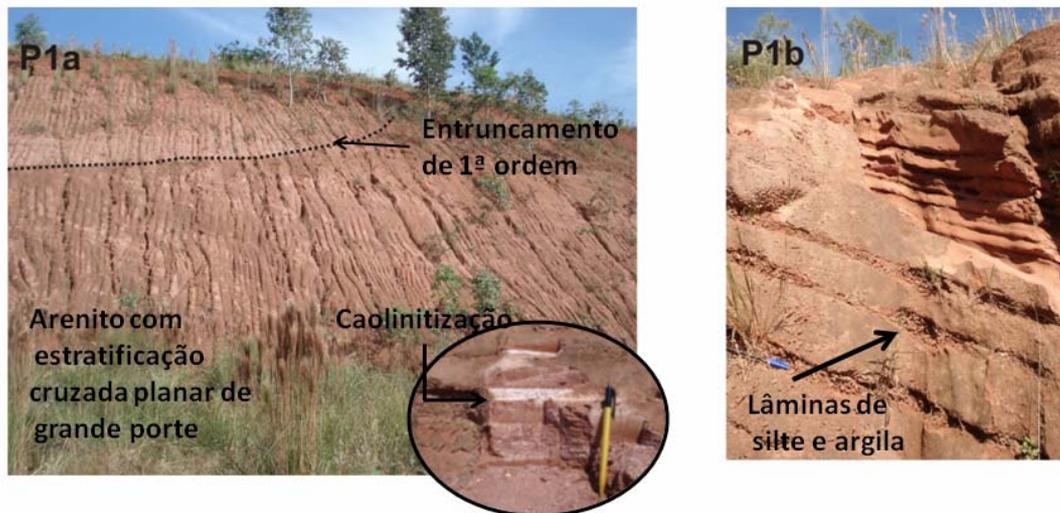


Figura 3. (P1a): Arenito com estratificação cruzada planar de grande porte, em que pode ser visualizado entruncamento de 1ª ordem entre cosets; (P1b): Camadas tabulares sub-horizontais com contraste granulométrico entre camadas de arenito e lâminas de silte e argila, característicos da Formação Pirambóia.

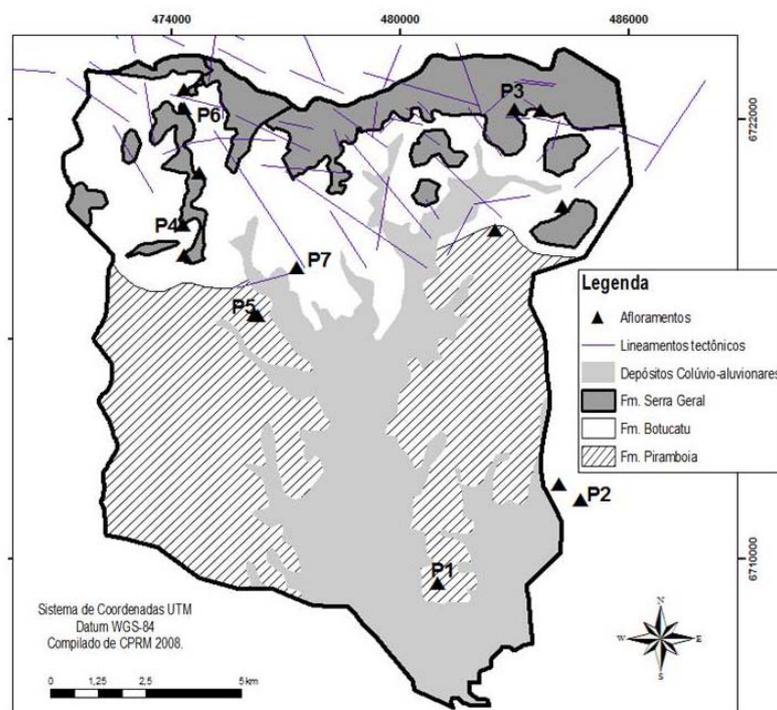


Figura 4. Mapa geológico identificando os três domínios hidrogeológicos e lineamentos tectônicos. Os pontos amostrados são indicados no mapa (Compilado do mapa geológico, Wildner et al., 2008).

A área de confinamento ao norte não se apresenta com muita eficácia devido à alta densidade de fraturamento das rochas vulcânicas, tendo sido identificados lineamentos tectônicos na porção norte inseridos no contexto de forças extensionais com predominância NO-SE, ao passo que na Bacia dos Sinos, os lineamentos se orientam predominantemente NE-SO.

3.2. Hidrogeologia

A área de estudo foi classificada em áreas com diferentes potenciais de recarga:

Arenitos, rocha predominante na região, com alta capacidade de armazenamento de água. =128 mm/ano (8% da precipitação anual em formações sedimentares).

Depósitos aluvionares, planícies de inundação, banhados e áreas adjacentes aos canais fluviais com declividade baixa possuem recarga baixa. Nos estudos de Marquezan (2000), para as áreas com as mesmas características que seguem nas proximidades do Rio dos Sinos, ao sul de Portão, a recarga ficou próxima de 11 mm/ano.

As áreas de ocorrência das rochas vulcânicas consideradas confinadas (nordeste da área, município de Estância Velha) e não verdadeiramente confinadas (norte-noroeste; município de Portão), são morros testemunhos de basalto escassos, alterados e alta densidade de fraturas. Para obter a pontuação da recarga desse domínio litológico, foi inferido o valor entre os depósitos aluvionares e arenitos.

3.3. Solos

A separação de domínios de solo foi fundamentada nas características geomorfológicas como controle pedogenético, permeabilidade, análise granulométrica para separação em domínios texturais, além da caracterização mineralógica incluindo argilominerais.

Predominam na região os argissolos derivados de arenitos e com influência dos solos originados em cotas mais elevadas na Formação Serra Geral. Os depósitos coluvionares originados dos basaltos conferem aos argissolos tons marrom e vermelho, assim como um horizonte B bem delimitado, muito argiloso, com espessuras decimétricas a métricas (Figura 5), chegando a mais de 60% de argila (Figura 6 e Tabela 2). Esse domínio se trata do **argissolo 1**.

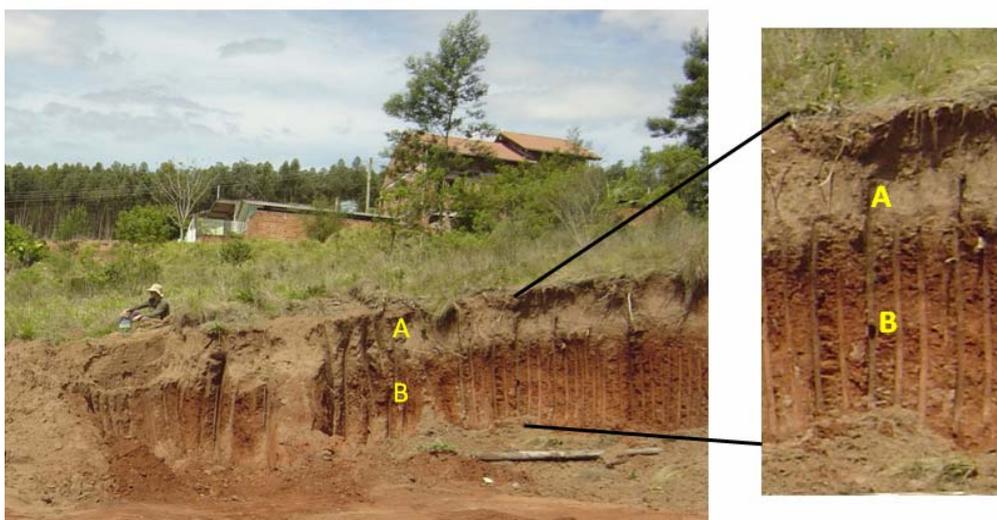


Figura 5. Ensaios de permeabilidade nos solos em Estância Velha. A e B são respectivamente horizontes A e B.

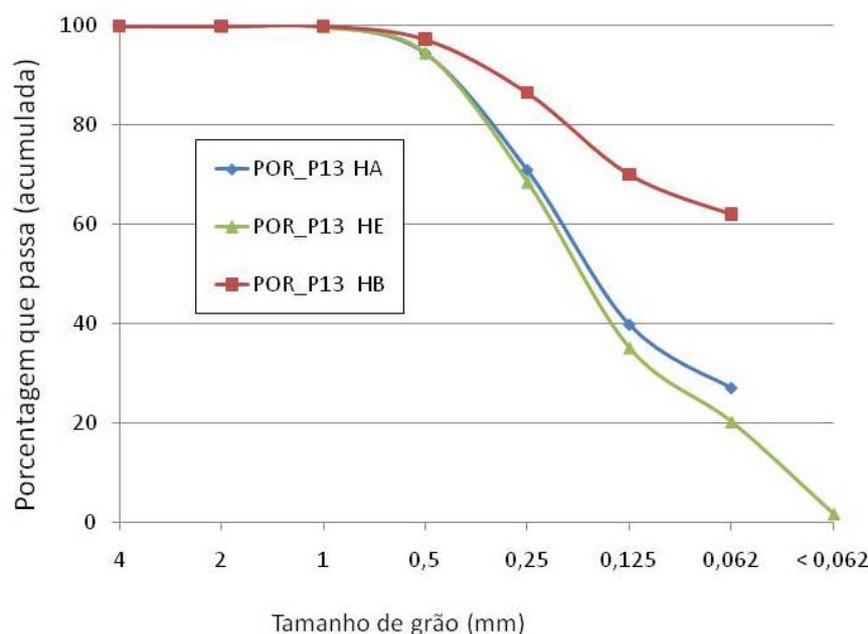


Figura 6. Análise granulométrica da amostra de Portão indicando a diferença textural entre horizontes do argissolo ao norte de Portão.

Tabela 2. Granulometria da amostra 13 em Portão por horizonte.

	Granulometria	POR_P13_HA	POR_P13_HB	POR_P13_HE
Seixo Fino	4,00	0,00	0,00	0,00
Seixo Muito Fino	2,00	0,00	0,00	0,10
Areia Muito Grossa	1,00	0,00	0,00	0,06
Areia Grossa	0,50	5,49	2,69	5,21
Areia Média	0,250	23,50	10,73	26,05
Areia fina	0,125	31,12	16,48	35,17
Areia Muito Fina	0,062	12,79	7,99	14,86
Silte/Argila	<0,062	27,10	62,11	18,55

A ocorrência das vossorocas (Figura 7) é determinada pela diferença textural abrupta, com horizontes superficiais arenosos e subsuperficiais argilosos (Streck et al., 2008). A taxa de escoamento superficial aumenta devido à diferença textural entre as camadas arenosas e argilosas. Essa camada argilosa subsuperficial pode atuar como um selante importante na presença de contaminantes.

As vossorocas contribuem para a exposição de áreas de recarga direta do aquífero e, se associada a atividades agrícolas com utilização de produtos químicos, o risco de contaminação é potencializado (Filizola et al., 2008).

Os controladores pedogenéticos modificam-se no terreno na porção centro-sul da área de estudo, designando outro domínio, o **argissolo 2** (Figura 8). O substrato rochoso é o arenito Pirambóia de relevo suave ondulado a plano, já não possuindo a contribuição do basalto de forma significativa, tornando os solos mais arenosos que o domínio do argissolo 1 (Figura 9 e Tabela 3). É caracterizado por solos que apresentam predominantemente transição difusa entre os horizontes. O argissolo pode ser espesso, com presença do horizonte E (eluvial) que caracteriza a perda de material fino para o horizonte B.

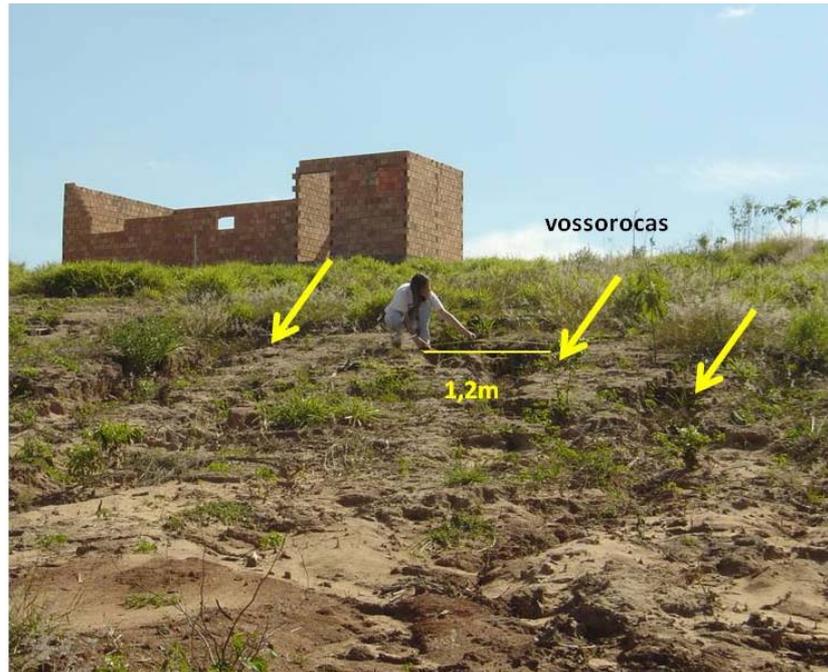


Figura 7. Vossorocas com mais de um metro de largura e profundidade. Ensaio de permeabilidade nos solos em Portão.

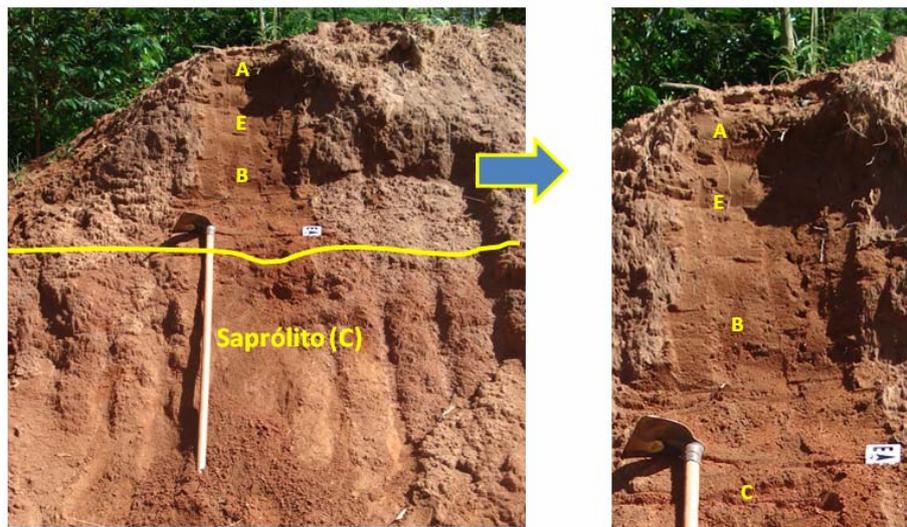


Figura 8. Perfil típico do Argissolo 2 é caracterizado pela transição difusa e distribuição homogênea de areia.

As análises granulométricas mostram que, na porção centro-sul da área, no município de Portão, predominam solos arenosos e franco arenosos, enquanto na porção norte de Portão e Estância Velha, os solos são argilosos, caracterizando dois domínios diferentes de argissolo, atribuídos à variação do declive do centro-sul ao norte da área, ocorrendo erosão. Nas áreas de baixa declividade, basicamente no fundo dos vales, predominam os planossolos, caracterizados pelo acúmulo de matéria orgânica e de sedimentos trazidos pelas cheias dos canais fluviais.

Os solos das áreas mais elevadas, divisor de águas da bacia hidrográfica, provenientes da alteração do basalto, caracterizam-se como neossolos pouco espessos. O ensaio de permeabilidade apresenta valores de permeabilidade (k) para os domínios diferentes. Para o domínio de argissolo com horizonte B textural espesso, ocorre horizonte A espessarênico,

onde areia predomina no horizonte A, com permeabilidade superior ao horizonte B textural, onde predomina argila, com valores de permeabilidade $2,37 \cdot 10^{-3}$ cm/s e $9,25 \cdot 10^{-4}$ cm/s, respectivamente (Figura 10).

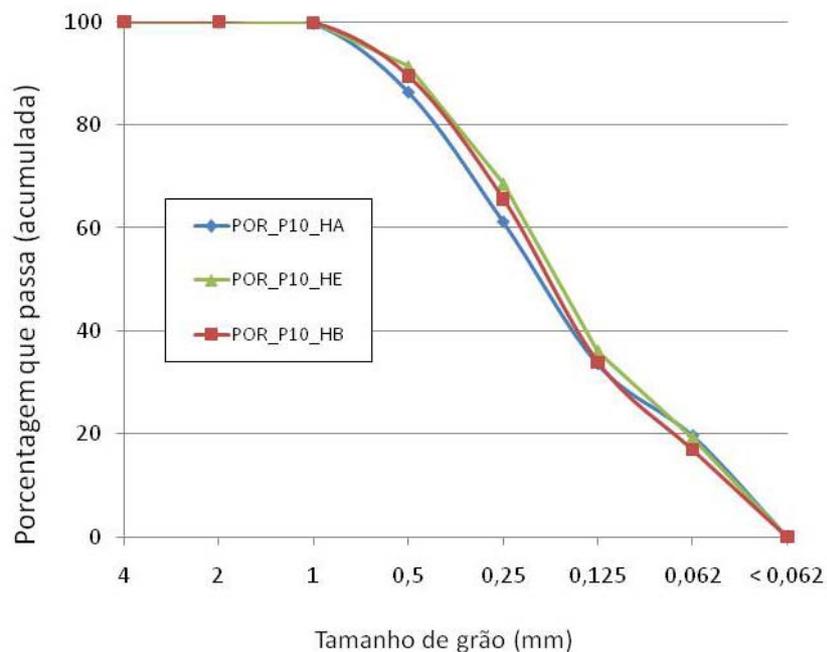


Figura 9. Análise granulométrica da amostra de Portão indicando horizontes arenosos do argissolo ao norte de Portão.

Tabela 3. Granulometria da amostra 13 em Portão por horizonte.

	Granulometria	POR_P10_HA	POR_P10_HB	POR_P10_HE
Seixo Fino	4,00	0,00	0,00	0,00
Seixo Muito Fino	2,00	0,07	0,00	0,00
Areia Muito Grossa	1,00	0,30	0,24	0,11
Areia Grossa	0,50	13,30	10,34	8,56
Areia Média	0,250	25,17	23,81	22,81
Areia fina	0,125	27,63	31,67	32,50
Areia Muito Fina	0,062	13,89	17,02	16,69
Silte/Argila	< 0,062	19,63	16,92	19,34

O valor de permeabilidade relativamente alto para a camada argilosa pode ter ocorrido pelo fato de horizontes arenosos serem muito espessos (até 60 cm) e ocorrer deslocamento horizontalizado durante os ensaios de permeabilidade.

A difratometria de raios-X mostrou que as fases minerais comuns das amostras de solo são quartzo, feldspato e óxido de ferro. Na fração menor que $4 \mu\text{m}$, o argilomineral comum é a caolinita; ocorrendo fases de illita e esmectita em menor quantidade.

Na figura 11, são apresentados os difratogramas por horizonte dos perfis de solo característicos aos domínios arenoso e argiloso, respectivamente. Ambos os horizontes apresentam caolinita, com maior contagem no horizonte B, por ser mais argiloso.

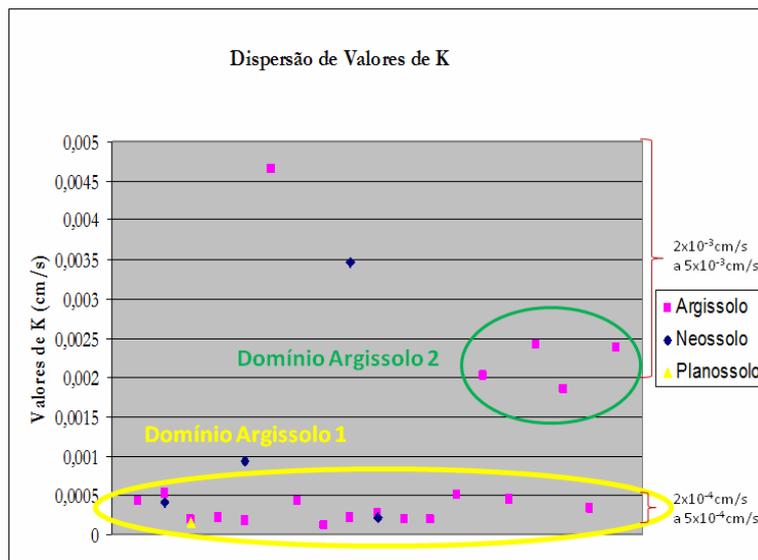


Figura 10. Gráfico valores de K e tipos de solo.

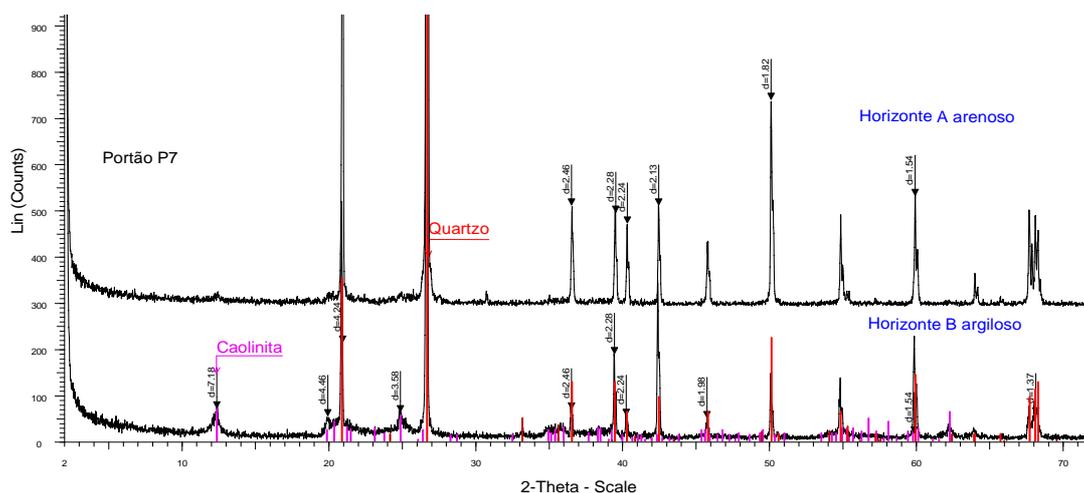


Figura 11. Mineralogia total da amostra de Portão, solo domínio Argissolo 1, horizontes A e B. Fases: feldspato alcalino; caolinita e hematita presente somente em B.

Os solos da área de estudo foram classificados em quatro domínios de acordo com suas características físicas e mineralógicas, contemplando todo o levantamento de dados. O argissolo foi separado em dois domínios devido à diferença textural, com variação de espessura proeminente, controlada pela declividade do terreno. O terceiro domínio é o planossolo. Ele está presente nas áreas planas, declividade de 0 a 3° onde predominam áreas de várzea, remobilização hídrica pela dinâmica dos corpos hídricos e quantidade alta de material detrítico transportado pelo relevo. São solos mal drenados por dois motivos: está em ambiente saturado devido à cota topográfica (disposição no relevo), e possui composição textural arenosa, mas com acúmulo de matéria orgânica. O neossolo é o quarto domínio de solo da área de estudo. Geralmente são solos pouco espessos, imaturos, provenientes diretamente da área fonte por depósito coluvionar. Predomina a alteração proveniente do basalto na área norte de Portão e Estância Velha onde o controle do relevo acentuado, fator condicionante para a formação de solos rasos e argilosos, individualiza esse domínio (Figura 12).

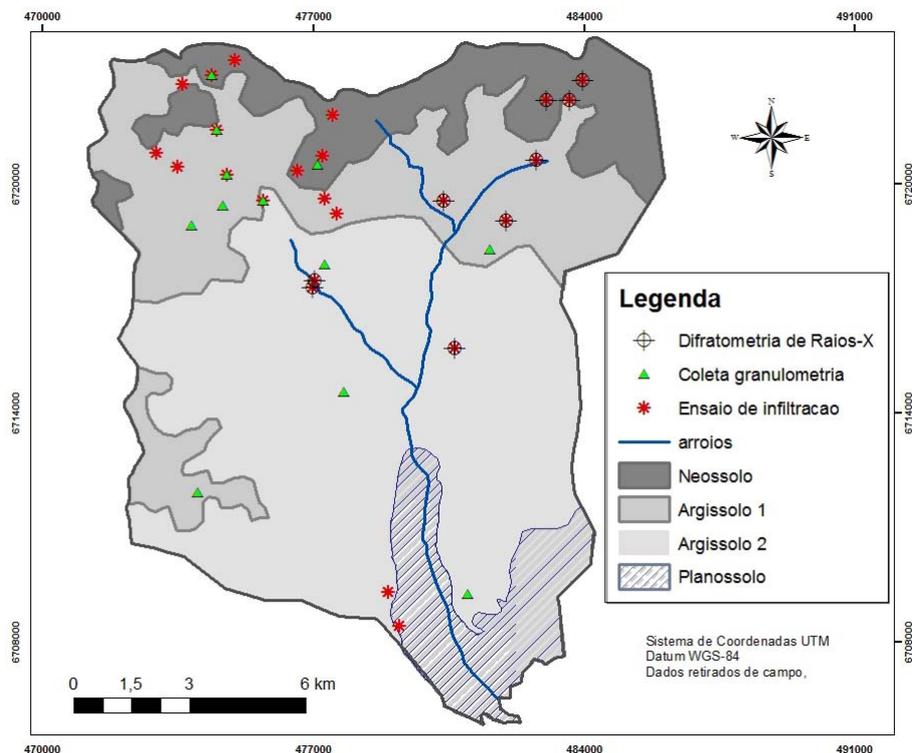


Figura 12. Mapa pedológico com os quatro domínios de solos classificados e localização das coletas para análise granulométrica e mineralógica e locais do ensaio de permeabilidade.

3.4. Critérios de pontuação na parametrização

O fato de o SAG ser constituído fundamentalmente por arenito das Formações Botucatu e Pirambóia, torna-o mais vulnerável por ser do tipo granular. Mesmo o arenito Pirambóia possuindo maior porcentagem de argila (Heine, 2008), este é propício para a difusão de contaminantes em geral, sem considerar a vulnerabilidade específica. O primeiro conjunto hidrogeológico é ajustado para a porção predominante da área de estudo, constituída desses arenitos. Toda área do SAG aflorante recebeu pontuação 9 por se tratar de litologia arenosa, que favorece a infiltração e circulação de água e, conseqüentemente, contaminantes dispostos no ambiente. A porção norte da área, onde ocorrem rochas vulcânicas, delimita o segundo conjunto hidrogeológico, o qual exige um tratamento na análise dos parâmetros diferente da porção sul, de litologia sedimentar.

O forte controle estrutural faz com que as rochas vulcânicas apresentem confinamento não tão eficiente a ponto de aumentar o valor na classificação do DRASTIC. A tabela 4 indica pontuação de 2 a 10 para basalto e 2 a 5 para ígneas intemperizadas. O valor 6 foi atribuído pelo grau intenso de fraturamento, como mostra a figura 4.

O terceiro conjunto hidrogeológico é referente às áreas úmidas como os banhados e planícies de inundação, onde o freático entra em equilíbrio com as áreas de descarga por meio dos afluentes. Refere-se ao conjunto hidrogeológico caracterizado por baixo relevo e alto nível da água sujeito a variações sazonais, com alto teor de matéria orgânica, silte e areia. A recarga é dependente principalmente da precipitação. Essas áreas podem estar sob controle de rochas impermeáveis. A pontuação 7 foi atribuída aos depósitos aluvionares pois apresentam maior vulnerabilidade que as outras unidades litológicas da área.

O parâmetro solo foi o parâmetro que mostrou maior complexidade ao ser analisado. As características estruturais e, principalmente texturais, foram decisivas para a atribuição dos referidos valores. Os solos mais rasos, neossolo, obtiveram maior pontuação, valor 20; os

argissolos mais arenosos (mais permeáveis) obtiveram valor 18 e os menos vulneráveis são os argissolos com horizonte argiloso espesso e, por fim, os planossolos em áreas de descarga do aquífero.

Para a zona vadosa, o peso do parâmetro a ser multiplicado pela pontuação é 5. O capeamento de basaltos e rochas intemperizadas recebeu pontuação 6, o manto de alteração dos arenitos recebeu pontuação 7 e os depósitos aluvionares receberam 8, por apresentarem maior quantidade de silte e argila.

A figura 13 mostra o mapa de declividade com variação de pontuação de 1 a 10, de acordo com os intervalos de pontuação para a declividade especificados pela EPA (Aller, 1987). Maiores declividades recebem pontuação baixa (azul), pois facilitam o escoamento superficial, assim como áreas mais planas à suave onduladas (tons avermelhados) favorecem a infiltração.

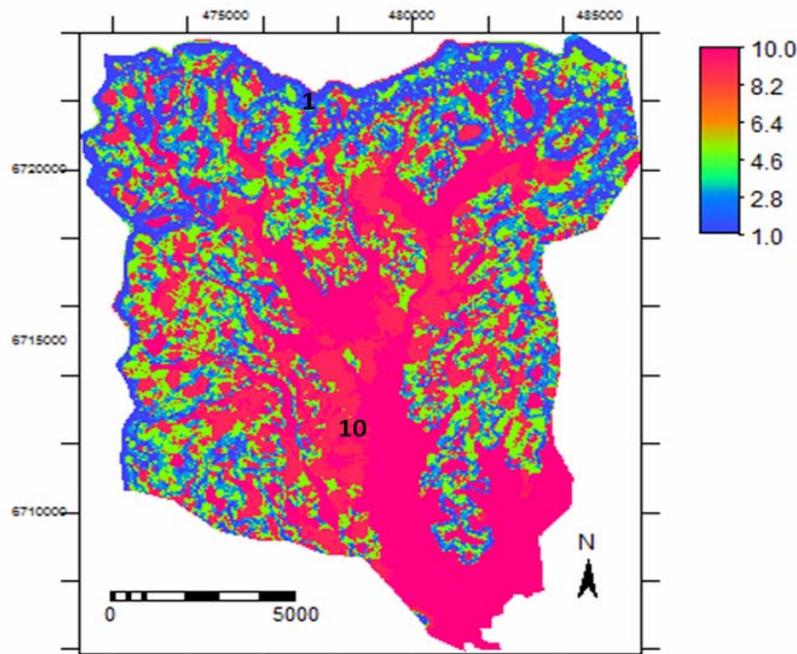


Figura13. Mapa de pontuação do parâmetro declividade.

A pontuação dos parâmetros D, T e C foram aplicados de acordo com intervalos determinados pelo DRASTIC sem critérios adicionais ou subjetivos. A tabela 4 resume a pontuação aplicada aos demais parâmetros.

Para o parâmetro Recarga, os arenitos receberam pontuação 6, conforme tabela 3, pois segundo dados bibliográficos, o valor de recarga na litologia sedimentar é 8% da precipitação anual. Aos depósitos aluvionares a pontuação conferida foi 1 por serem áreas de descarga. Um valor maior que o indicado pelo DRASTIC é atribuído ao basalto densamente fraturado, portanto, recebeu pontuação 3, menor em relação às formações sedimentares e maior que a área de descarga.

A condutividade hidráulica (parâmetro C) aparece constante para os intervalos especificados do índice DRASTIC por causa do intervalo de condutividade obtido.

O parâmetro solo foi desenvolvido na classificação de domínios. O domínio argissolo 1, argissolo 2, neossolo, planossolo receberam respectivamente os valores 6, 9, 10 e 8 como pontuação de acordo com pontuação da tabela 3.

O mapa do parâmetro D (nível da água do aquífero) apresenta maior influência no mapa resultante de vulnerabilidade entre os demais parâmetros estudados e está relacionado com as pontuações respectivas à profundidade do nível da água do aquífero.

Tabela 4. Critérios de pontuação dos parâmetros R, A, S e I e valores atribuídos.

Parâmetros	Critérios de Pontuação	Pontuação DRASTIC	Pontuação aplicada
R	Diferença litológica considerando porosidade e fraturas, potencial de infiltração e escoamento superficial.	6	6
	Formações sedimentares: 8% da precipitação anual. Valor aproximado de 124 mm/ano		
	Depósitos aluvionares: dados bibliográfico <11 mm/ano	1	1
	Rochas vulcânicas: inferência por peso relativo	3	3
A	Delimitação por conjunto hidrogeológico.	2-10	6
	Basalto com forte controle estrutural		
	Arenito	4-9	9
	Depósitos Colúvio-aluvionares	6-9	7
S	Delimitação por domínio textural, composição de argilominerais, espessura, declividade.	10	10
	Neossolo: Solos rasos		
	Argissolo 1: Mistura de areia-argila	6	6
	Argissolo 2: Predomina areia	9	9
	Planossolo: Areia, argila, matéria orgânica	8	8
I	Manto de alteração do arenito	2-7	7
	Argissolo espesso	2-6	4
	Basalto	2-10	5
	Planossolo e Depósitos colúvio-aluvionares	4-8	8

3.5. Mapa de vulnerabilidade

O mapa de vulnerabilidade obtido (Figura 14) apresenta um grande intervalo de valores, em que os parâmetros de maior peso, nível da água e material da zona vadosa foram decisivos pela presença de áreas com alta vulnerabilidade à contaminação das águas subterrâneas.

Os valores de cada domínio dos parâmetros são mostrados nos mapas paramétricos na Figura 14, já sendo o peso do parâmetro multiplicado pela pontuação DRASTIC. Os parâmetros R, A e I seguem zoneamento de domínios por critérios essencialmente litológicos e respectivo manto de alteração. Observa-se que o domínio de rochas basálticas possui valores diferentes de acordo o parâmetro não somente devido ao valor do peso do parâmetro, mas devido ao fato de apresentar interpretações diferentes de acordo com o objeto de estudo que é a vulnerabilidade do aquífero.

No segundo mapa de vulnerabilidade, apresenta-se a classificação do mapa 1 em relação aos intervalos do DRASTIC para vulnerabilidade baixa, média e alta. A área de estudo possui 2,61% de áreas com baixa vulnerabilidade, 72,37% de áreas intermediárias e, 25,01% com alta vulnerabilidade (Figura15).

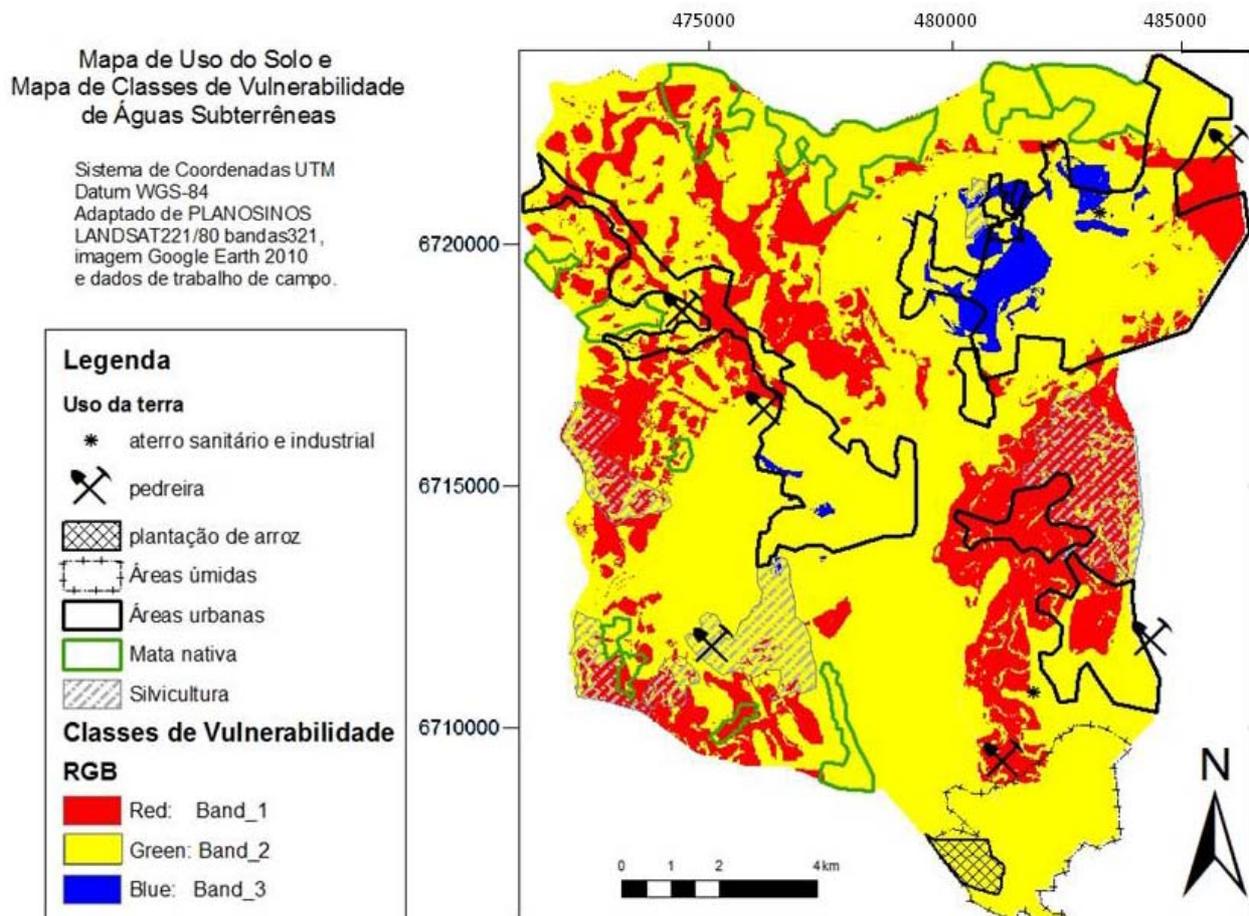


Figura 15. Mapa das classes baixa, intermediária e alta vulnerabilidade.

4. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

A área é constituída por três sistemas aquíferos com interações hídricas variáveis entre si, quais sejam: Sistema Aquífero Serra Geral, Sistema Aquífero Guarani e Aquífero Quaternário. A recarga direta do SAG ocorre em toda a sua extensão aflorante. Além disto, o sistema aquífero Serra Geral sobrejacente ao SAG, apesar da impermeabilização do contato entre arenitos e rochas vulcânicas, deve contribuir para a recarga do SAG através de zonas de falha. As áreas de descarga, assim como as planícies de inundação, têm vulnerabilidade intermediária. Isso ocorre principalmente pela baixa profundidade da água subterrânea, a qual se conecta aos corpos hídricos superficiais. Nessas áreas, os contaminantes podem ser transferidos para as águas superficiais, ou dependendo de suas características físico-químicas, como os compostos mais densos, podem se infiltrar e permanecer tanto na zona vadosa quanto na própria água subterrânea.

O estudo de vulnerabilidade identificou características intrínsecas do geossistema aquífero, como a função hídrica dos domínios de solo. O argissolo tipo 1 com acentuada variação da condutividade hidráulica resultante das diferenças texturais abruptas ao longo do perfil, é eficiente na proteção do aquífero devido ao seu espesso horizonte B argiloso e com baixa condutividade hidráulica. Por sua vez, o Argissolo 2, com menores espessuras e maiores teores de areia ao longo do perfil, é fator determinante para a elevação da vulnerabilidade.

De uma forma geral, detectou-se a ausência de argilominerais esmectínicos, aumentando a suscetibilidade dos solos ao fendilhamento por ressecamento em épocas de estiagem, bem como reduzindo a vulnerabilidade do meio físico.

Os Neossolos, diretamente associados ao basalto, são solos rasos, com altos teores de matéria orgânica e presença de argilominerais esmectíticos, atribuindo-se a estes uma alta infiltração e, portanto, elevando a vulnerabilidade.

Os Planossolos apresenta maior quantidade de sedimentos finos e estão associados às áreas de descarga, reduzindo por isso a vulnerabilidade do meio físico.

O mapa de vulnerabilidade obtido mostra áreas de alta vulnerabilidade sobre as formações sedimentares ocupadas por áreas urbano-industriais. O mapa de vulnerabilidade mostra-se coerente diante dos argumentos paramétricos levantados a campo e em laboratório. O mapa de classes de vulnerabilidade permite visualizar que a área de estudo possui 2,61% de áreas com baixa vulnerabilidade, 72,37% de áreas intermediárias e, 25,01% com alta vulnerabilidade.

Foram determinantes para a detecção de alta vulnerabilidade, os parâmetros do nível da água e o manto de alteração do aquífero (parâmetro impacto da zona vadosa). A profundidade do nível da água corresponde à espessura da zona vadosa a qual é o amortecedor em processos de sorção de contaminantes. O fluxo subterrâneo mostra áreas de descarga cuja profundidade baixa do nível estático aumenta diretamente o grau de vulnerabilidade do aquífero Guarani.

Na área urbana de Estância Velha ocorre um cone de depleção associado a baixos valores de vulnerabilidade à contaminação. Porém, deve-se considerar o rebaixamento do nível estático como impacto negativo no aquífero sob o aspecto de preservação quantitativa da água. Houve significativa expansão urbano-industrial no período de 1975 a 2008, e a mancha urbano-industrial encontra-se em área de alta vulnerabilidade na parte leste da área de estudo.

Com vistas à detecção de contaminação, foram avaliadas 41 análises químicas da água subterrânea cedidas pela CPRM e CORSAN, estas datadas predominantemente de 1980 a 2000. Não foi verificada a contaminação do aquífero. Entretanto, a não detecção de contaminação pode estar associada à resolução analítica das análises químicas, bem como a análise incompleta de espécies metálicas e demais componentes tóxicos. É importante ressaltar que as análises disponíveis são poucas e, no caso, insuficientes para se chegar ao mapa efetivo de risco de águas subterrâneas. No entanto, a área é reconhecida por vários exemplos de degradação ambiental, como indica o relatório FEPAM (2007) e projeto PROTEGER-CPRM (PROTEGER, 1994).

O ambiente SIG permitiu a manipulação e atualização de dados de forma dinâmica e constante. As fotos aéreas e imagens de satélite permitiram identificar e delimitar a homogeneidade de domínios de diversos parâmetros como solos, litologias, áreas de recarga/descarga e lineamentos tectônicos.

O mapa de vulnerabilidade obtido ofereceu resultados qualitativos georreferenciados, orientando o planejamento da ocupação e monitoramento das áreas de maior vulnerabilidade. Com base no mapa de vulnerabilidade obtido, a porção de alta vulnerabilidade no leste da área, atualmente com uso urbano-industrial e silvicultura, deve ser priorizada para o estudo de contaminação.

As águas subterrâneas devem ser incluídas no plano de gestão ambiental municipal porque exibem conexão com os corpos hídricos superficiais através da descarga, auxiliam no fluxo superficial em período de estiagem e, demandam importância como alternativa de abastecimento rural e urbano-industrial, o qual requer controle quantitativo e qualitativo.

5. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao projeto PLANOSINOS, que oportunizou este trabalho; ao Laboratório de Mecânica dos Solos-UNISINOS, pelo auxílio nas análises granulométricas; à CPRM-SIAGAS e CORSAN, pelos dados de poços; ao Laboratório de Difractometria de Raios-X do Instituto de Geociências da UFRGS.

6. REFERÊNCIAS

- ALLER, L.; BENNETT, T.; LEHR, J. H.; PETTY, R. J. **DRASTIC**: a standardized system for evaluating groundwater pollution potential using hydrogeologic settings. Ada: EPA, 1987. 163p. EPA/600/2-85/0108.
- ALMASRI, M. N. Assessment of intrinsic vulnerability to contaminantion for Gaza coastal aquifer, Palestine. **Journal of Environmental Management**, v. 88, n. 4, p. 577-593, 2008. p. 1-17.
- ANTONAKOS, A. K; LAMBRAKIS, N. J. Development and testing of three hybrid methods for the assessment of aquifer vulnerability to nitrates, based on the drastic model, an example from NE Korinthia, Greece. **Journal of Hydrology**, v. 333, n. 2/4, p. 288– 304, 2007.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE GEOLOGIA DE ENGENHARIA E AMBIENTAL – ABGE. Ensaios de permeabilidade em solos. **Boletim**, v. 3, n. 04, jun. de 1996.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. **NBR 7181**: análise granulométrica: método de ensaio. Rio de Janeiro: dez. 1984.
- BEKESI, G; McCONCHIE, J. Groundwater recharge modelling using the Monte Carlo technique, Manawatu region, New Zealand. **Journal of Hydrology**, v. 224, n. 3/4, p. 137-148, 1999.
- BRASIL. Ministério do Meio Ambiente. Conselho Nacional do Meio Ambiente. **Resolução CONAMA n. 396/2008**. Dispõe sobre a classificação e diretrizes ambientais para o enquadramento das águas subterrâneas e dá outras providências. Disponível em: <<http://www.mma.gov.br/port/conama/legiano.cfm?codlegitipo=3>>. Acesso: maio 2008.
- FUNDAÇÃO ESTADUAL DE PROTEÇÃO AO MEIO AMBIENTE HENRIQUE LUIS ROESSLER/RS – FEPAM. **Qualidade ambiental**: região hidrográfica do Guaíba. 2007. Disponível em: <http://www.fepam.rs.gov.br/qualidade/qualidade_sinos/sinos.asp>. Acesso: set. 2007.
- FILIZOLA, H. F.; ALMEIDA FILHO, G. S.; CANIL, K. GOMES, M. A. F. Processos erosivos em área de afloramento do sistema Aquífero Guarani no Brasil. In.: GOMES, M. A. F. (Ed.). **Uso agrícola das áreas de afloramento do Aquífero Guarani no Brasil**. Brasília-DF: EMBRAPA Informação Tecnológica, 2008. p. 417.
- HEINE, C. A. **Análise de sustentabilidade de uso do Sistema Aquífero Guarani - SAG em Ivoti-RS**. Tese (Doutorado em Geologia Sedimentar) - Programa de Pós-Graduação em Geologia, Universidade do Vale do Rio dos Sinos, Porto Alegre, 2008.
- INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA - IBGE. **Dados CNAE**. Rio de Janeiro: IBGE, 2001.
- INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS - INPE. **Imagem de satélite LANDSAT-TM5 221/81 bandas 1 a 7**. 2008. Disponível em: <<http://www.inpe.gov.br>>. Acesso: set. de 2008.
- LANGMUIR, D. **Aqueous environmental geochemistry**. New Jersey: Prentice Hall, 1997. 600p.

MURADÁS, K.; WOJAHN, D.; COELHO, O. G. W. Levantamento de dados geomorfológicos e hidrogeológicos para mapeamento de vulnerabilidade de contaminação do Aquífero Guarani nos municípios de Portão e Estância Velha/RS utilizando o método DRASTIC. *Ambi-Agua*, Taubaté, v. 5, n. 3, p. 172-194, 2010. ([doi:10.4136/ambi-agua.161](https://doi.org/10.4136/ambi-agua.161))

LEONE, A.; RIPA, M. N.; URICCHIO, V.; DEÁK, J.; VARGAY, Z. Vulnerability and risk evaluation of agricultural nitrogen pollution for Hungary's main aquifer using DRASTIC and GLEAMS models. *Journal of Environmental Management*, v. 90, n. 10, p. 2969-2978, 2009. doi:10.1016.

LOBO FERREIRA, J. P. C. **Vulnerabilidade à poluição de águas subterrâneas: fundamentos e conceitos para uma melhor gestão e proteção dos aquíferos de Portugal.** 1997. Disponível em: <<http://www.aprh.pt/congressoagua98/files/com;023.pdf>>. Acesso: abr. 2008.

MARQUEZAN, R. G. **Avaliação do potencial de vulnerabilidade à contaminação das águas subterrâneas na área do sistema de dutos REFAP-Triunfo/ RS.** 2000. 174f. Dissertação (Mestrado em Geociências) - Curso de Pós-graduação em Geociências, Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2000.

NOBRE, R. C. M.; ROTTUNO FILHO, O. C.; MANSUR, W. J.; NOBRE, M. M. M.; COSENZA, C. A. N. Groundwater vulnerability and risk mapping using GIS, modeling and a fuzzy logic tool. *Journal of Contaminant Hydrology*, v. 94, n. 3/4, p. 277-292, 2007.

OLIVEIRA, M. M.; LOBO-FERREIRA, J. P. C. Cartografia da vulnerabilidade à poluição das águas do Conselho de Montemor-O-Novo utilizando o método DRASTIC. In: CABRAL, J. J. S. **Água subterrânea: aquíferos costeiros, aluviões, vulnerabilidade e aproveitamento.** Recife: UFPE, 2004.

PROGRAMA GEOLOGIA DO BRASIL. **Geologia e recursos minerais do Estado do Rio Grande do Sul.** Porto Alegre, 2008. Escala 1:750.000-SIG. 1 DVD.

PROGRAMA TÉCNICO PARA O GERENCIAMENTO NA REGIÃO METROPOLITANA DE PORTO ALEGRE - CPRM-PROTEGER. **Fontes de poluição e degradação ambiental no município de Estância Velha/RS.** Porto Alegre: PROTEGER, 1994. (Degradação Ambiental, 3)

RAHMAN, A. A GIS based DRASTIC model for assessing groundwater vulnerability in shallow aquifer in Aligarh, India. *Applied Geography*, v. 28, p. 32-53, 2008.

SECUNDA, S.; COLLIN, M. L.; MELLOUL, A. J. Groundwater vulnerability assessment using a composite model combining DRASTIC with extensive agricultural land use in Israel's Sharon region. *Journal of Environmental Management*, v. 54, p. 39-57, 1998.

SISTEMA DE INFORMAÇÕES DE ÁGUAS SUBTERRÂNEAS – SIAGAS. **Dados digitais de poços tubulares.** Porto Alegre: SIAGAS, 2009.

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

TUCCI, C. E. M.; CABRAL, J. J. S. P. **Qualidade da água subterrânea – relatório final.** CGEE: Centro de Gestão e Estudos Estratégicos. 2003. Disponível em: <http://novo.cgee.org.br/arquivos/a2b_agua_sub.pdf em agosto de 2008>. Acesso: ago. 2008.

WILDNER, W.; RAMGRAB, G. E.; CUNHA LOPES, R.; IGLESIAS, C. M. F. **Mapa geológico do Estado do Rio Grande do Sul,** In: CPRM Serviço Geológico do Brasil. **Geologia e recursos minerais do Estado do Rio Grande do Sul.** Porto Alegre: CPRM, 2008. Escala 1:750.000. 1 DVD.

MURADÁS, K.; WOJAHN, D.; COELHO, O. G. W. Levantamento de dados geomorfológicos e hidrogeológicos para mapeamento de vulnerabilidade de contaminação do Aquífero Guarani nos municípios de Portão e Estância Velha/RS utilizando o método DRASTIC. *Ambi-Agua*, Taubaté, v. 5, n. 3, p. 172-194, 2010. ([doi:10.4136/ambi-agua.161](https://doi.org/10.4136/ambi-agua.161))

WOJAHN, D. **Modelagem geológica e hidrogeológica do Sistema Aquífero Guarani na sub-bacia do Arroio Portão - RS**. 2010. Dissertação (Mestrado em Geologia) - Programa de Pós-Graduação em Geologia, Universidade do Vale do Rio dos Sinos, Porto Alegre (no prelo).