
**UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
INSTITUTO DE PESQUISAS HIDRÁULICAS E ESCOLA DE ENGENHARIA
CURSO DE ENGENHARIA AMBIENTAL**

PRISCILA SILVA SILVEIRA CAMARGO

**AVALIAÇÃO DA VULNERABILIDADE DO SISTEMA AQUÍFERO
QUATERNÁRIO COSTEIRO NA REGIÃO DE PALMARES DO SUL**

(RS)

Porto Alegre

Novembro 2016.

PRISCILA SILVA SILVEIRA CAMARGO

**AVALIAÇÃO DA VULNERABILIDADE DO SISTEMA AQUÍFERO QUATERNÁRIO
COSTEIRO NA REGIÃO DE PALMARES DO SUL (RS)**

TRABALHO DE CONCLUSÃO
APRESENTADO AO CURSO DE ENGENHARIA
AMBIENTAL DA UNIVERSIDADE FEDERAL DO
RIO GRANDE DO SUL COMO PARTE DOS
REQUISITOS PARA A OBTENÇÃO DO TÍTULO
DE ENGENHEIRO AMBIENTAL.

Orientador: Pedro Antonio Roehe Reginato

Co-Orientador: Alfonso Risso

Porto Alegre

Novembro 2016

CIP - Catalogação na Publicação

Camargo, Priscila Silva Silveira
Avaliação da vulnerabilidade do Sistema Aquífero
Quaternário Costeiro na região de Palmares do Sul (RS)
/ Priscila Silva Silveira Camargo. -- 2016.
89 f.
Orientador: Pedro Antonio Roehe Reginato.

Coorientador: Alfonso Risso.

Trabalho de conclusão de curso (Graduação) --
Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Instituto
de Pesquisas Hidráulicas, Curso de Engenharia
Ambiental, Porto Alegre, BR-RS, 2016.

1. Hidrogeologia. 2. Aquíferos costeiros. 3.
Palmares do Sul (RS). I. Reginato, Pedro Antonio
Roehe, orient. II. Risso, Alfonso, coorient. III.
Título.

PRISCILA SILVA SILVEIRA CAMARGO

AVALIAÇÃO DA VULNERABILIDADE DO SISTEMA AQUÍFERO QUATERNÁRIO
COSTEIRO NA REGIÃO DE PALMARES DO SUL (RS)

Trabalho de Conclusão de Curso em Engenharia Ambiental da Universidade Federal do Rio Grande do Sul defendido e aprovado em **30/11/2016** pela Comissão avaliadora constituída pelos professores:

Banca Examinadora:

.....
Prof. Dr. Alfonso Risso – Departamento de Obras Hidráulicas (DOH)

.....
Prof. Dr. Marcos Imério Leão – Departamento de Hidromecânica e Hidrologia (DHH)

.....
Tuane de Oliveira Dutra – Doutoranda do Programa de Pós-Graduação em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental – IPH/UFRGS

Conceito:.....

Dedico este trabalho a meu amor, Luiz Fernando Camargo,
que me sustentou e apoiou nos momentos mais difíceis da
minha vida.

AGRADECIMENTOS

Dedico meus agradecimentos especiais aos meus queridos orientadores Pedro Antonio Roehe Reginato e Alfonso Risso, que disponibilizaram seu conhecimento e tempo na elaboração deste trabalho. Cabe salientar os valorosos e inestimáveis apoio e dedicação deles, sem os quais este estudo seria inviável.

Agradeço a oportunidade de estudar na Universidade Federal do Rio Grande do Sul, cujo ensino é de elevada qualidade, apesar de ser uma universidade de acesso gratuito.

Agradeço aos meus pais, José Roberto Silveira e Luci Pereira da Silva, à minha irmã Bruna Silva Silveira, à minha sogra Eliana Capel Camargo, bem como ao meu marido Luiz Fernando Camargo pelo incentivo e apoio ao estudo.

Agradeço a Deus pelo fôlego de vida, o qual é a mais importante ferramenta na execução de qualquer projeto.

“Quando a sabedoria entrar no teu coração e o próprio conhecimento se tornar agradável à tua alma, guardar-te-á o próprio raciocínio, resguardar-te-á o próprio discernimento”.

Provérbios 2:10,11

RESUMO

CAMARGO, P. S. S. Avaliação da vulnerabilidade do Sistema Aquífero Quaternário Costeiro na região de Palmares do Sul (RS) 2016. Trabalho de Conclusão de Curso do Curso de Engenharia Ambiental – Instituto de Pesquisas Hidráulicas. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.

Esse trabalho avaliou a vulnerabilidade de aquíferos sedimentares costeiros da região de Palmares do Sul/RS. A partir da interpretação de perfis estratigráficos de poços encontrados na região de estudo, extraídos do banco de dados do Sistema de Informações de Águas Subterrâneas do Serviço Geológico Nacional (SIAGAS), elaborou-se um modelo conceitual dos aquíferos existentes no município, o qual facilitasse o estudo da hidrogeologia local. Nesse modelo, aplicou-se o método GOD a fim de analisar a vulnerabilidade e gerar mapas na ferramenta ArcGIS. Posteriormente, compararam-se os produtos cartográficos com os usos do solo na região. Constatou-se que a maioria dos poços ponteiras capta de aquíferos com vulnerabilidade alta, em áreas ocupadas majoritariamente por atividades como agricultura, pecuária e reflorestamento. Em contrapartida, os poços tubulares da CORSAN captam de aquíferos com vulnerabilidade considerada insignificante.

Palavras-chave: hidrogeologia, GOD, SIG, Planície Costeira Rio-Grandense, Palmares do Sul/RS.

ABSTRACT

CAMARGO, P. S. S. Avaliação da vulnerabilidade do Sistema Aquífero Quaternário Costeiro na região de Palmares do Sul (RS) 2016. Trabalho de Conclusão de Curso do Curso de Engenharia Ambiental – Instituto de Pesquisas Hidráulicas. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.

This work evaluated the vulnerability of coastal sedimentary aquifers in the region of Palmares do Sul / RS. Based on the interpretation of stratigraphic profiles of wells found in the study region, extracted from the National Geological Survey's Groundwater Information System (SIAGAS) database, a conceptual model of the aquifers existing in the municipality was developed, which facilitated the study of local hydrogeology. In this model, the GOD method was applied in order to analyze the vulnerability and generate maps in the ArcGIS tool. Subsequently, the cartographic products were compared with the land uses in the region. It was verified that the majority of the wells captures from aquifers with high vulnerability, in areas occupied mainly by activities like agriculture, livestock and reforestation. In contrast, CORSAN tubular wells capture aquifers with insignificant vulnerability.

Keywords: hydrogeology, GOD, GIS, Rio Grande-Grande Coastal Plain, Palmares do Sul / RS.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Ciclo hidrológico. Fonte: MMA, 2016.....	18
Figura 2 – Distribuição Vertical da água num perfil do solo. Fonte: Carvalho, 2006.	19
Figura 3 – Tipos de aquíferos: poroso (ou sedimentar) , fissural (ou fraturado) e cárstico. Fonte: ABAS, 2013.	21
Figura 4 - Tipos de aquíferos quanto à pressão. Fonte: Boscardin Borghetti et al. (2004), adaptado de IGM (2001).	22
Figura 5 - Representação esquemática do nível de pressão nos aquíferos. Fonte: Boscardin Borghetti et al. (2004).	22
Figura 6 - Os volumes de água da Terra. Fonte: Rebouças et al, 1999.....	24
Figura 7 - Processos comuns de poluição da água subterrânea. Fonte: Foster et al., 2006.....	27
Figura 8 - Sistemas deposicionais da Planície Costeira do Rio Grande do Sul e perfil esquemático transversal aos sistemas na latitude de Porto Alegre. Fonte: modificado de Tomazelli e Villwock, 2000.	29
Figura 9 - Mapa Hidrogeológico do Estado do Rio Grande do Sul com a representação dos principais sistemas aquíferos e do Sistema Aquífero Quaternário Costeiro I e II (modificado de Machado e Freitas, 2005).	32
Figura 10 - Mapa Hidrogeológico da Região de Balneário Pinhal, Cidreira e Palmares do Sul (adaptado de Machado, 2005 - Reginato e Michalski, 2013).....	34
Figura 11 - Tabela com principais métodos para a determinação da vulnerabilidade à poluição de aquíferos (Hirata & Rebouças, 1999).....	38
Figura 12 - Parâmetros e índices de ponderação do método DRASTIC (adaptado de Hirata e Fernandes, 2008 in: Feitosa, 2008).	40
Figura 13 - Valores para cálculo do índice GOD . Fonte: FOSTER et. al., 2006.....	42
Figura 14 - Produção de mapa de vulnerabilidade pelo método GOD. Fonte: FOSTER et al., 2006.....	43
Figura 15 - Localização do Município de Palmares do Sul/RS..	48
Figura 16 - Mapa da Geologia de Palmares do Sul/RS.....	51

Figura 17 - Mapa hidrogeológico com localização dos perfis hidroestratigráficos definidos.....	53
Figura 18 – Mapa com poços ponteiras e tubulares catalogados na região de Palmares do Sul/RS	54
Figura 19 - Percentual de poços por tipo.....	55
Figura 20 - Intervalos de profundidades de poços.....	55
Figura 21 - Diferentes usos da água captada na região de estudo.....	56
Figura 22 - Vazões captadas pelos poços catalogados.....	56
Figura 23 - Perfil hidroestratigráfico 1.....	58
Figura 24 - Perfis geológicos e construtivos dos poços tubulares selecionados para seção geológica I.....	59
Figura 25 - Perfil hidroestratigráfico 2.....	60
Figura 26 - Perfis geológicos e construtivos dos poços tubulares selecionados para seção geológica II.....	61
Figura 27 –Mapa do parâmetro G para aquíferos livres.....	67
Figura 28 – Mapa do parâmetro O para aquíferos livres.....	68
Figura 29 – Mapa do parâmetro D para aquíferos livres.....	69
Figura 30 – Mapa do parâmetro G para aquíferos confinados.....	70
Figura 31 – Mapa do parâmetro O para aquíferos confinados.....	71
Figura 32 – Mapa do parâmetro D para aquíferos confinados.....	72
Figura 33 - Mapa de vulnerabilidade para aquíferos livres de Palmares do Sul/RS.....	73
Figura 34 - Mapa de vulnerabilidade para aquíferos confinados de Palmares do Sul/RS	74
Figura 35 - Mapa de uso do solo de Palmares do Sul/RS	76
Figura 36 – Mapa de uso do solo e vulnerabilidade de aquíferos livres.....	77
Figura 37 – Mapa de uso do solo e vulnerabilidade de aquíferos confinados.	78

LISTA DE TABELAS

Tabela 1.Classes de vulnerabilidade do índice DRASTIC. Fonte: ALLER et al., 1987.....	41
Tabela 2.Parâmetros O para diferentes litologias dos poços ponteiras.	63
Tabela 3. Validação do interpolador <i>Topo to Raster</i>	65
Tabela 5. Classes de vulnerabilidade dos aquíferos livres e seus percentuais em área relativos ao município.....	66
Tabela 6.Classes de vulnerabilidade dos aquíferos confinados e seus percentuais em área relativos ao município.	66
Tabela 4.Uso do Solo no Município de Palmares do Sul.....	75
Tabela 7 - Classes de uso do solo e percentuais relativos de área na região de vulnerabilidade insignificante dos aquíferos confinados.	79
Tabela 8 - Classes de uso do solo e percentuais relativos de área na região de vulnerabilidade baixa dos aquíferos confinados.	79
Tabela 9 - Classes de uso do solo e percentuais relativos de área na região de vulnerabilidade média dos aquíferos livres.....	80
Tabela 10 - Classes de uso do solo e percentuais relativos de área na região de vulnerabilidade alta dos aquíferos livres.....	80

LISTA DE SIGLAS

ANA: Agência Nacional de Águas

CORSAN: Companhia Riograndense de Saneamento

MMA: Ministério do Meio Ambiente

ABAS: Associação Brasileira de Águas Subterrâneas

SIAGAS: Sistema de Informações de Águas Subterrâneas

BTEX: Benzeno Tolueno Etil-benzeno Xilenos

LISTA DE SÍMBOLOS

D= *Depth*

R= *Recharge*

A= *Aquifer*

S= *Soil*

T= *Topography*

I= *Impact*

C= *Conductivity*

G= *Groundwater occurrence*

O= *Overall aquifer class*

D= *Depth of groundwater*

SUMÁRIO

RESUMO	7
ABSTRACT	8
LISTA DE FIGURAS	9
LISTA DE TABELAS	11
LISTA DE SIGLAS	12
LISTA DE SÍMBOLOS	13
1 INTRODUÇÃO.....	16
1.1 DESCRIÇÃO DO PROBLEMA	16
1.2 JUSTIFICATIVA	16
1.3 OBJETIVOS	17
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	18
2.1 ÁGUA SUBTERRÂNEA	18
2.1.1 CICLO HIDROLÓGICO.....	18
2.1.2 AQUÍFEROS	20
2.1.3 IMPORTÂNCIA DAS ÁGUAS SUBTERRÂNEAS.....	23
2.2 CONTAMINAÇÃO DA ÁGUA SUBTERRÂNEA	26
2.3 SISTEMA AQUÍFERO QUATERNÁRIO COSTEIRO	28
2.3.1 CARACTERÍSTICAS GEOLÓGICAS	28
2.3.2 CARACTERIZAÇÃO HIDROGEOLÓGICA	31
2.4 MÉTODOS DE AVALIAÇÃO DE VULNERABILIDADE	36
2.4.2 ÍNDICE DE VULNERABILIDADE À POLUIÇÃO DRASTIC	39
2.4.3 MÉTODO GOD.....	41
2.4.4 AVALIAÇÃO DE VULNERABILIDADE DE AQUÍFEROS COM BASE NO USO DO MÉTODO GOD.....	44

3 METODOLOGIA.....	46
4 RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	48
4.1 ÁREA DE ESTUDO.....	48
4.2 GEOLOGIA DA ÁREA DE ESTUDO	49
4.3 CARACTERIZAÇÃO HIDROGEOLÓGICA DA ÁREA.....	52
4.3 AVALIAÇÃO DA VULNERABILIDADE	62
4.3.1 PARÂMETRO G	62
4.3.2 PARÂMETRO O	63
4.3.3 PARÂMETRO D	64
4.3.4 AVALIAÇÃO DA VULNERABILIDADE.....	64
4.4 ANÁLISE DO USO E OCUPAÇÃO DO SOLO E SUA RELAÇÃO COM A VULNERABILIDADE DOS AQUÍFEROS	75
5 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES	82
6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	84

1 INTRODUÇÃO

1.1 DESCRIÇÃO DO PROBLEMA

Com o crescimento populacional, a demanda por recursos hídricos é crescente e urgente. É importante compreender que, em períodos de estiagem ou em locais com carência de águas superficiais, as águas subterrâneas têm um papel estratégico, uma vez que aquíferos podem fornecer água por longos períodos (HIRATA, 2012) e, se protegidos, podem fornecer água de qualidade.

No Brasil, as águas subterrâneas apresentam um papel fundamental no abastecimento público e privado, especialmente em cidades de pequeno a médio porte. Cabe ressaltar que, no estado do Rio Grande do Sul, 59 % dos municípios são abastecidos somente por águas subterrâneas e 13% dos municípios usa a água subterrânea como complementação para o abastecimento (ANA, 2010).

Contudo, a existência de fontes de contaminação pode comprometer a qualidade da água subterrânea. Fontes de poluição, tais como indústrias, lavouras, criadouros de animais, fossas e sumidouros, cemitérios e postos de gasolina podem liberar substâncias que se infiltram no subsolo e contaminam as águas de aquíferos. Dessa forma, é necessária a utilização de ferramentas para a gestão e proteção das águas subterrâneas. Uma ferramenta eficaz é a análise de vulnerabilidade de aquíferos, a qual pode ser usada na gestão do uso e ocupação do solo, de modo a garantir a proteção da qualidade da água subterrânea.

1.2 JUSTIFICATIVA

No litoral do Rio Grande do Sul os aquíferos costeiros são frequentemente utilizados para o abastecimento humano (público e doméstico), tanto na área urbana como no interior dos municípios. A captação da água subterrânea é realizada de diversas formas, através de poços tubulares, poços ponteiras e poços escavados, que captam água de aquíferos granulares localizados em diferentes profundidades. Essa situação também ocorre no município de Palmares do Sul, sendo que o abastecimento urbano é realizado pela CORSAN e o abastecimento doméstico (fora da área urbana) é feito por poços perfurados pelos moradores.

Dependendo do tipo de captação, da profundidade dos poços, do aquífero captado e da ocupação do entorno a água subterrânea pode apresentar problemas de qualidade. Esses problemas podem ocorrer mais facilmente se os aquíferos captados possuírem uma maior vulnerabilidade à contaminação. A avaliação da vulnerabilidade pode ser realizada através da aplicação de diferentes métodos, sendo que os resultados obtidos com essa avaliação permitem a geração de mapas de vulnerabilidade que podem ser utilizados como ferramentas para a gestão e proteção dos aquíferos.

Em função disso, o desenvolvimento desse trabalho é importante, pois estará sendo feita a avaliação da vulnerabilidade dos aquíferos que fazem parte do Sistema Aquífero Quaternário Costeiro na região do Município de Palmares do Sul. Como esses aquíferos são utilizados para abastecimento, com esse estudo será possível identificar regiões que apresentam maior vulnerabilidade natural à contaminação, propiciando assim definir áreas onde podem ser desenvolvidos projetos de proteção da água subterrânea.

1.3 OBJETIVOS

O presente trabalho tem como objetivo geral a avaliação da vulnerabilidade dos aquíferos existentes na região de Palmares do Sul, os quais fazem parte do Sistema Aquífero Quaternário Costeiro.

Os objetivos específicos deste trabalho consistem em:

- Realizar uma caracterização hidrogeológica da região de Palmares do Sul;
- Definir os aquíferos presentes na localidade, a partir da interpretação de perfis estratigráficos dos poços;
- Avaliar a vulnerabilidade dos aquíferos que estão sendo captados para abastecimento;
- Comparar a vulnerabilidade dos aquíferos estudados com o uso e ocupação do solo no município de Palmares do Sul.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 ÁGUA SUBTERRÂNEA

2.1.1 CICLO HIDROLÓGICO

O ciclo hidrológico, ou ciclo da água, é o movimento contínuo da água presente nos oceanos, continentes (superfície, solo e rocha) e na atmosfera. É importante compreendermos que o ciclo hidrológico é movido pela energia térmica do sol e a gravitacional. Conforme Figura 1, a água presente nos oceanos, rios e lagos é evaporada pela ação da radiação solar, formando nuvens que são carregadas pelas massas de ar e, ao saturarem-se, precipitam sobre o solo, na forma de chuva, granizo, orvalho e neve. A água que provém da precipitação da chuva pode escoar (nos casos em que a precipitação é maior do que a capacidade de absorção do solo), infiltrar no solo (dando origem a umidade do solo e as zonas saturadas de água), ser absorvida pela vegetação, congelar formando camadas de gelo presente nos cumes de montanhas e geleiras, bem como sofrer novos processos de evaporação (MMA, 2016).

A água que infiltra e percola no solo ou nas rochas pode formar aquíferos, ressurgir na superfície na forma de nascentes, fontes, pântanos, ou alimentar rios e lagos. Ela flui lentamente entre as partículas e espaços vazios dos solos e das rochas, podendo ficar armazenada por um período muito variável, formando os aquíferos. (MMA, 2016).

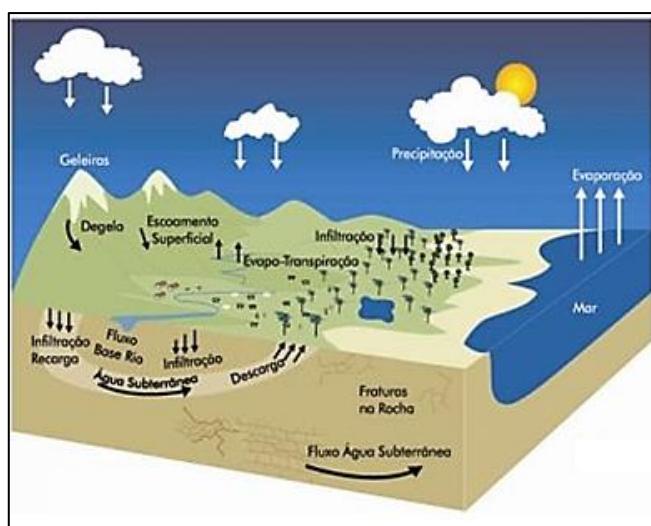


Figura 1 - Ciclo hidrológico. Fonte: MMA, 2016.

Cabe ressaltar que a água subterrânea, isto é, a água presente nos poros e fendas de sedimentos e rochas é oriunda principalmente da infiltração (Figura 2), sendo que a mesma é condicionada pelos seguintes fatores (CARVALHO, 2006):

- natureza física do solo (espaços intersticiais, porosidade e permeabilidade);
- cobertura vegetal (raízes das plantas favorecem infiltração);
- topografia (quanto menor declividade, maior infiltração);
- saturação do solo (solos secos tendem a apresentar maior infiltração).

As forças que atuam na infiltração são a gravidade, a pressão do ar existente nos poros das rochas, capilaridade e atrito. Na zona não saturada, isto é, a zona imediatamente sob a superfície terrestre, água e ar estão presentes nos poros. Logo abaixo, encontra-se a zona saturada, na qual todas as aberturas interconectadas estão cheias de água. A água da zona saturada é denominada de água subterrânea e pode ser captada através de poços para suprir a demanda por recursos hídricos gerados por diferentes usos. A recarga da zona saturada ocorre pela percolação da água de superfície através na zona não saturada (CARVALHO, 2006).

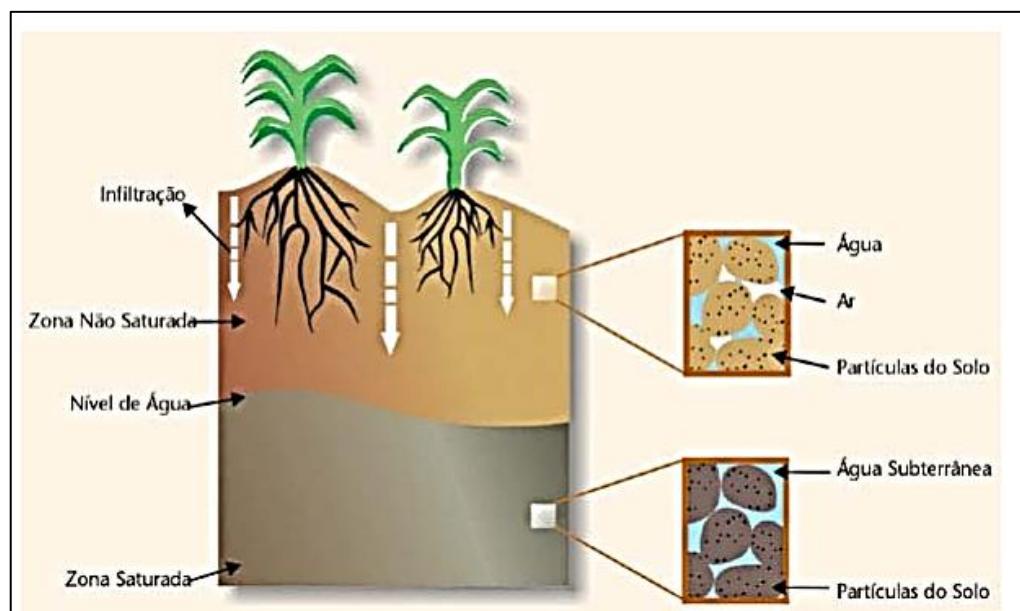


Figura 2 – Distribuição Vertical da água num perfil do solo. Fonte: Carvalho, 2006.

2.1.2 AQUÍFEROS

Sabe-se que um aquífero é uma formação geológica que permite a circulação e o armazenamento de água através de seus poros (ex. arenito) ou fraturas (ex. granito fraturado). Um aquífero necessita apresentar permeabilidade, ou seja, interconexão de seus poros e fraturas, a fim de não somente armazenar, mas também transmitir água. Os aquíferos, conforme se observa na Figura 3, são classificados de diferentes maneiras em função de sua porosidade (ABAS, 2013):

- **Aquíferos Porosos ou Sedimentares:** estes são formados por sedimentos inconsolidados ou rochas sedimentares consolidadas. Ressalta-se que poros são os espaços existentes entre os grãos de sedimentos, nos quais a água circula. Esses aquíferos são geralmente contínuos, de maior importância porque armazemam e transmitem grandes volumes de água;
- **Aquíferos Fraturados ou Fissurais:** são formados por rochas ígneas ou metamórficas que apresentam fraturas, fendas e falhas, as quais são originárias de processos tectônicos ou de resfriamento (rochas vulcânicas). Suas capacidades de armazenamento e transmissividade dependem da quantidade de fraturas interconectadas. São aquíferos descontínuos. Poços perfurados nessas rochas fornecem poucos metros cúbicos de água por hora, sendo que a possibilidade de se ter um poço produtivo dependerá, tão somente, desse poço interceptar fraturas capazes de conduzir a água.
- **Aquíferos Cárticos:** são aquíferos descontínuos, formados em rochas carbonáticas (calcários, dolomitos e mármores), que podem sofrer processos de dissolução que dão origem a condutos, galerias e cavernas, atingindo amplas dimensões. A qualidade de suas águas, as quais apresentam elevada dureza, e o risco de subsidência e desmoronamento fazem com que esse aquífero necessite ser captado e explotado de forma controlada e monitorada. Há diversas cidades do Brasil que são abastecidas por águas captadas por esse tipo de aquífero.

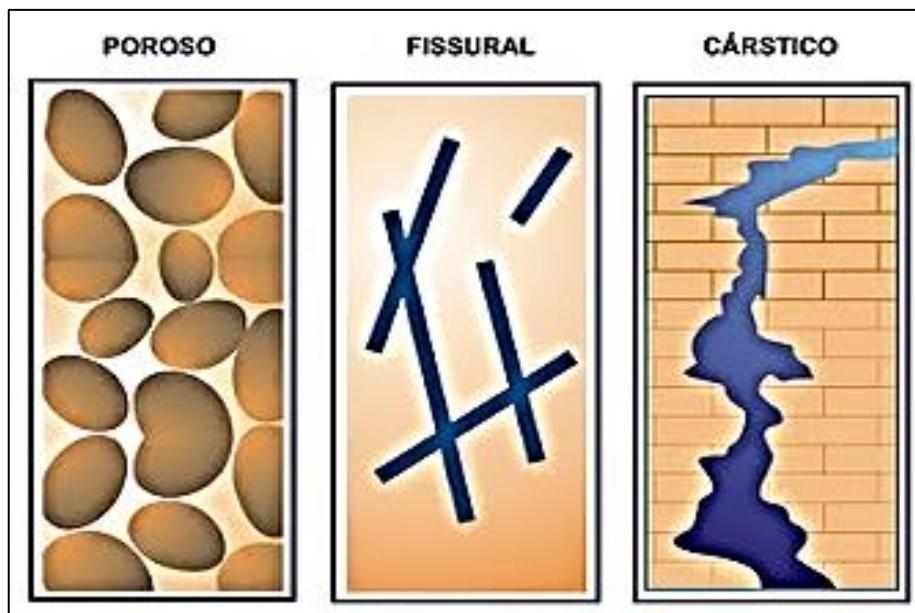


Figura 3 – Tipos de aquíferos: poroso (ou sedimentar), fissural (ou fraturado) e cárstico. Fonte: ABAS, 2013.

Com relação à pressão exercida sobre os aquíferos, os mesmos podem ser classificados em (Figura 4):

- **Aquíferos não confinados, livres ou freáticos:** são aquíferos pouco profundos cujo limite superior é representado por uma linha que define o início da zona saturada (linha do lençol freático). As águas desse aquífero estão sujeitos à pressão atmosférica, sendo que quando um poço é perfurado o nível de água dentro do poço coincide com o nível de água do lençol freático;.
- **Aquíferos confinados ou artesianos:** são aquíferos dispostos entre duas camadas impermeáveis, propiciando que a pressão da água encontrada no topo desses aquíferos seja maior do que a pressão encontrada na atmosfera. Nos aquíferos confinados, há a chamada “superfície piezométrica”, a qual é uma representação da altura que a água confinada pode elevar-se nos poços perfurados, em virtude da pressão das camadas impermeáveis sobrejacentes. Quando é perfurado um aquífero confinado, a água é elevada acima do topo do aquífero, em função da pressão existente. Quando a superfície piezométrica ultrapassa a superfície do terreno, a elevada pressão propicia que a água jorre livremente pelos poços, sendo que esse fenômeno é conhecido como artesianismo (Figura 5).

Existem também aquíferos semi-confinados, cujas condições são intermediárias, bem como os aquíferos suspensos, os quais são aquíferos não confinados cuja posição é controlada

pela estrutura ou estratigrafia, de forma a encontrarem-se acima do nível freático regional, como corpos isolados.

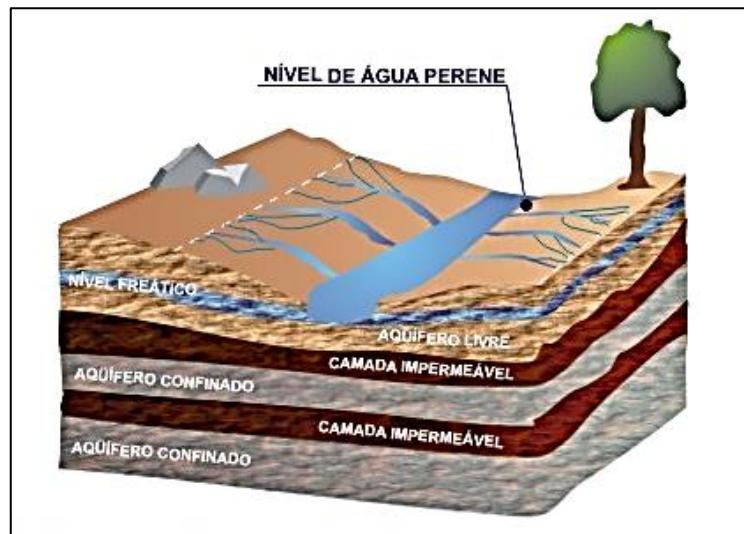


Figura 4 - Tipos de aquíferos quanto à pressão. Fonte: Boscardin Borghetti et al. (2004), adaptado de IGM (2001).

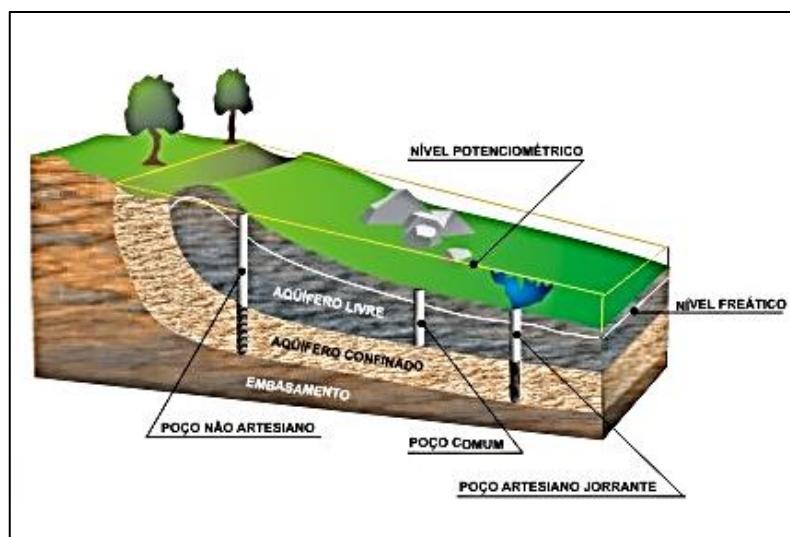


Figura 5 - Representação esquemática do nível de pressão nos aquíferos. Fonte: Boscardin Borghetti et al. (2004).

Um aquífero apresenta uma reserva permanente de água e uma reserva ativa ou reguladora que são continuamente abastecidas através da infiltração da chuva e de outras fontes subterrâneas. As reservas reguladoras ou ativas correspondem ao escoamento de base dos rios. A área por onde ocorre o abastecimento do aquífero é chamada zona de recarga. Já

as zonas de descarga são aquelas por onde as águas emergem do sistema, alimentando rios, lagos, oceanos, nascentes ou jorrando com pressão por poços artesianos (ANA, 2001).

A zona de recarga direta é aquela onde as águas da chuva se infiltram diretamente no aquífero, sendo que a recarga sempre é direta nos aquíferos livres, ocorrendo em toda a superfície acima do lençol freático. Nos aquíferos confinados, o reabastecimento ocorre preferencialmente nos locais onde a formação portadora de água aflora à superfície. A zona de recarga indireta é aquela onde o reabastecimento do aquífero se dá a partir da drenagem (filtração vertical) superficial das águas e do fluxo subterrâneo indireto, ao longo do pacote confinante sobrejacente (REBOUÇAS et al., 2002).

As maiores taxas de recarga ocorrem nas regiões planas, bem arborizadas, e nos aquíferos livres. Nas regiões de relevo acidentado, sem cobertura vegetal, sujeitas a práticas de uso e ocupação que favorecem as enxurradas, a recarga ocorre mais lentamente e de maneira limitada (REBOUÇAS et al., 2002).

Sob condições naturais, apenas uma parcela dessas reservas reguladoras é passível de exploração, constituindo o potencial ou reserva explotável. Esse volume de exploração pode aumentar em função das condições de ocorrência e recarga, bem como dos meios técnicos e financeiros disponíveis, considerando que a soma das extrações com as descargas naturais do aquífero para rios e oceano, não pode ser superior à recarga natural do aquífero.

2.1.3 IMPORTÂNCIA DAS ÁGUAS SUBTERRÂNEAS

Cabe ressaltar que o maior volume de água líquida doce da Terra - acessível aos meios técnicos e financeiros disponíveis - encontra-se no subsolo (10 milhões km^3). Estima-se que $13\text{ mil km}^3/\text{ano}$ é de água doce participante do ciclo hidrológico, o qual vem sendo extraído por cerca de 300 milhões de poços que irrigam cerca de 100 milhões de hectares e abastecem mais de metade da população mundial (UNESCO, 1998). A Figura 6 apresenta gráficos que representam os percentuais volumétricos de água no planeta Terra.

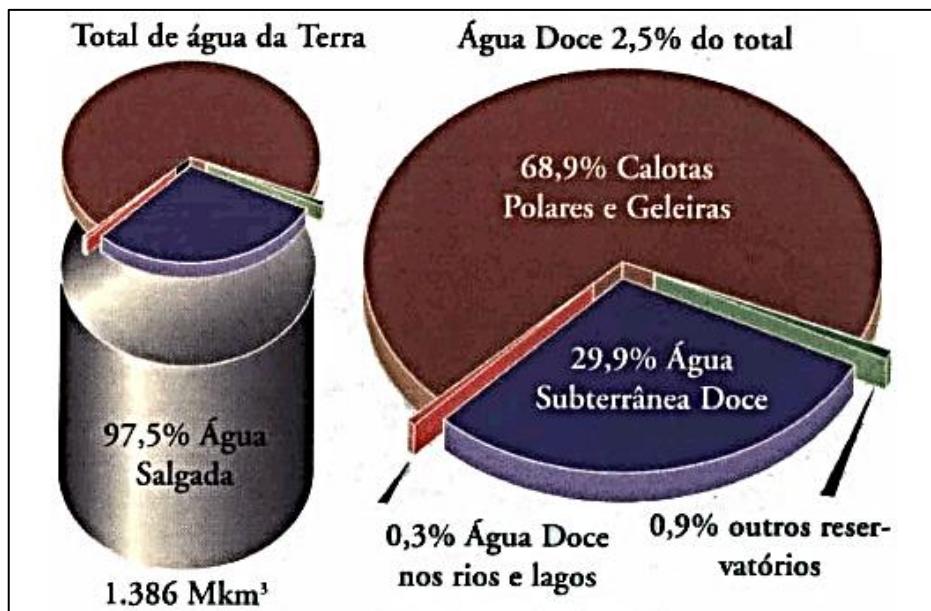


Figura 6 - Os volumes de água da Terra. Fonte: Rebouças et al, 1999.

No Brasil, as reservas de água subterrânea são estimadas em 112.000 km³ e a contribuição multianual média à descarga dos rios é da ordem de 2.400 km³/ano (REBOUÇAS, 1988 citado em MMA, 2003). As vazões obtidas por poços variam, no Brasil, desde menos de 1 m³/h até mais de 1.000 m³/h (FUNDAJ, 2003).

As águas subterrâneas são consideradas uma fonte imprescindível de água para consumo humano, especialmente para as populações que não tem acesso à rede pública de saneamento ou quando o fornecimento é irregular. (FREITAS et al, 2001). Em nosso país, as águas subterrâneas abastecem 19 % dos domicílios, dos quais 68,78 % estão na zona rural, abrangendo 11,94 % da população nacional (IBGE, 1994). Cabe ressaltar que, no estado do Rio Grande do Sul, 59 % dos municípios são abastecidos somente por águas subterrâneas e 13% dos municípios usa a água subterrânea como complementação para o abastecimento (ANA, 2010).

As águas subterrâneas apresentam aspectos positivos e uma importância na sociedade em função das seguintes razões (WREGE, 1997):

- suprimentos constantes, sendo que há fornecimento mesmo em períodos de estiagem, devido ao fluxo basal;
- há uma pequena distância à fonte de consumo, eliminando a instalação de onerosos sistemas de distribuição, facilitando o consumo especialmente na zona rural;

- os custos de captação da água subterrânea são baixos em relação à água superficial, por dispensarem a construção de obras de barramento, adutora de recalque e estação de tratamento;
- os poços podem ser construídos à medida que cresce a demanda, permitindo um parcelamento dos investimentos financeiros;
- as águas subterrâneas viáveis para consumo são geralmente de boa qualidade com simplificado tratamento ou até mesmo nenhum tratamento, desde que a captação seja construída e operada de forma adequada;
- são geralmente melhor protegidas dos agentes contaminantes que atingem rios e lagos, visto que passam por um longo processo de filtração, em função da profundidade e da estratigrafia;
- a água subterrânea sofre pequenas variações de temperatura em comparação com águas superficiais, tornando-a preferida pelas indústrias que necessitam de água à temperatura constante;
- o uso da água de aquíferos para abastecimento humano torna-se mais barato, se comparado com a captação e tratamento das águas de um rio ou de outro manancial de superfície.

Uma das principais vantagens é o fato de que, durante o percurso no qual a água percola entre os poros do subsolo e das rochas, ocorre a depuração através de processos físico-químicos (troca iônica, decaimento radioativo, remoção de sólidos em suspensão, neutralização de pH em meio poroso, entre outros) e bacteriológicos (eliminação de microrganismos devido à ausência de nutrientes e oxigênio que os viabilizem) (SILVA, 2003).

Apesar das vantagens do uso da água subterrânea, seu consumo não deve ser indiscriminado e irrefletido, uma vez que uma extração descontrolada poderá desequilibrar o balanço hidrológico na bacia hidrográfica em questão, provocar subsidências e desmoronamentos do terreno, bem como esgotar uma reserva de direito das futuras gerações. Além disso, uma obra de captação mal construída, operada ou abandonada, pode se transformar em foco de contaminação do aquífero que está sendo explotado.

Além disso, especialistas indicam que o volume de água subterrânea pode chegar até 60 milhões de km³, entretanto a sua ocorrência em grandes profundidades pode inviabilizar seu uso. Por essa razão, a quantidade passível de ser captada estaria a menos de 4.000 metros de profundidade, compreendendo cerca de 8 e 10 milhões de km³ (CEPIS, 2000), que,

segundo Rebouças et al. (2002), estaria assim distribuída: 65.000 km³ constituindo a umidade do solo; 4,2 milhões de km³ desde a zona não-saturada até 750 m de profundidade, e 5,3 milhões de km³ de 750 m até 4.000 m de profundidade.

Calcula-se que anualmente capta-se dos aquíferos 160 trilhões de litros no mundo, segundo Postel (1999 apud BROWN, 2003). Muitos dos principais aquíferos estão sendo exauridos com uma rapidez maior do que sua taxa natural de recarga. A mais severa exaustão de água subterrânea ocorre na Índia, China, Estados Unidos, Norte da África e Oriente Médio, causando um déficit hídrico mundial de cerca de 200 bilhões de metros cúbicos por ano (SAMPAT, 2001). Há muitos exemplos de esgotamento de aquíferos por superexploração para uso em irrigação. O esgotamento das águas subterrâneas já provocou o afundamento dos solos situados sobre os aquíferos na cidade do México e na Califórnia, Estados Unidos (CEPIS, 2000). Outro fator que está comprometendo qualidade e disponibilidade hídrica dos aquíferos é ocupação inadequada de suas áreas de recarga (CAVALCANTE e SABADIA, 1992, apud CPRM, 2002).

2.2 CONTAMINAÇÃO DA ÁGUA SUBTERRÂNEA

Segundo Brito (2013), a água subterrânea que consiste num recurso natural que sustenta o desenvolvimento de inúmeros setores, está sob constante ameaça, devido à poluição antrópica. Em virtude do desenvolvimento urbano, industrial, agrícola e de empresas de mineração, os aquíferos estão sob ameaça de contaminação (FOSTER et al, 1988). Cabe destacar que a contaminação das águas subterrâneas é de difícil reversão e, portanto, a melhor alternativa é a prevenção, visto que a remediação de águas subterrâneas é um processo que enfrenta dificuldades e limitações técnicas, além de ter um custo elevado (CUTRIM e CAMPOS, 2011).

Os principais contaminantes e suas fontes são (FOSTER et al., 2002):

- microrganismos (bactérias e vírus): oriundos principalmente da infiltração de esgoto cloacal, atividade pecuária (fezes oriundas da criação intensiva de animais) e cemitérios (necrochorume);
- compostos de nitrogênio (nitrogênio orgânico, nitrogênio amoniacal, nitrito, nitrato): oriundos principalmente do uso de fertilizantes na atividade agrícola, atividade pecuária e lançamentos de esgotos;

- metais: originários especialmente da atividade industrial e minerária (beneficiamento, drenagem ácida e elementos radioativos), bem como lixões (chorume rico em metais pesados);
- inorgânicos (ex. sódio, potássio, cálcio, magnésio, cloretos): presentes na água pela dissolução dos minerais (contaminação natural) ou intrusão salina;
- agrotóxicos: suas fontes são as atividades agrícolas;
- orgânicos (ex. matéria orgânica biodegradável, BTEX, hidrocarbonetos de petróleo): suas fontes são fossas sépticas, lançamento de esgoto, postos de combustíveis, cemitérios, derrames de petróleo, atividades agropecuárias, aterros de resíduos, etc.

Destacam-se como fontes de poluição, as quais contaminam a água subterrânea, aterros ou lixões de resíduos sólidos, rios influentes poluídos, drenagens em área industrial, vazamento em tanques de armazenagem, saneamento *in-situ* (fossa-sumidouro), drenagens em área rural, vazamento de rede de esgoto, lagoas de águas residuais e intensificação agrícola. Além disso, destacam-se o derramamento e vazamento de hidrocarbonetos, cemitérios, indústrias (ex. metalúrgica, de madeira, de pesticidas), despejo de lodo de esgoto, curtumes, extração/exploração de gás e petróleo, mineração (ex. carvão, metais), dutos e tanques de armazenamento subterrâneos, lagoas de efluentes, agrotóxicos e fertilizantes (Figura 7).

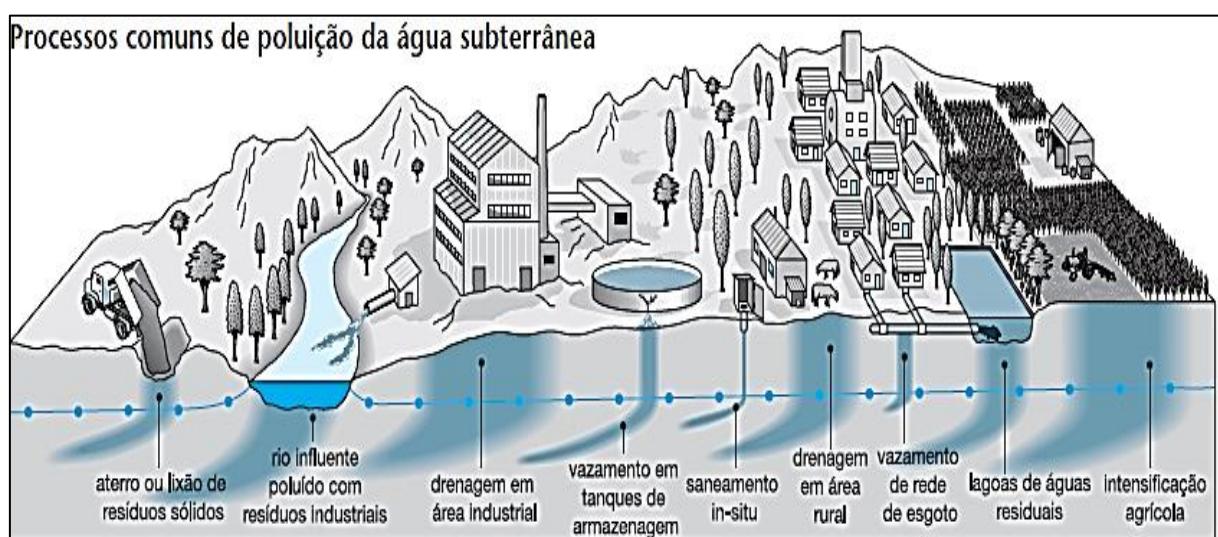


Figura 7 - Processos comuns de poluição da água subterrânea. Fonte: Foster et al., 2006.

Cabe ressaltar que poços construídos fora de normas podem tornar-se vetores de contaminantes químicos e biológicos. Em poços sem revestimento, abandonados e próximos

de fontes de contaminação, a água contaminada pode ser introduzida nesses poços provocando a contaminação dos mesmos e dos próprios aquíferos.

Outro ponto que deve ser destacado é a intrusão salina. O avanço da cunha salina definida como, o avanço da água do mar em subsuperfície sobre a água doce, provoca a salinização dos aquíferos, localizados em áreas litorâneas, segundo Melo (1996, apud CPRM, 2002). Algumas das cidades que tiveram problemas de salinização de seus poços são, entre outras: Lima (Peru); Santa Marta (Colômbia); Coro (Venezuela); Rio Grande e Natal (Brasil) e Mar del Plata (Argentina). No caso de Buenos Aires-La Plata, o problema de salinização se deve ao conteúdo de sais de uma formação costeira (DELGADO e ANTÓN, 2002). O crescimento desordenado do número de poços tem provocado significativos rebaixamentos do nível de água e problemas de intrusão salina em Boa Viagem, no Recife (MMA,2003).

Nos aquíferos também é comum a contaminação natural, devido à dissolução de minerais.

2.3 SISTEMA AQUÍFERO QUATERNÁRIO COSTEIRO

2.3.1 CARACTERÍSTICAS GEOLÓGICAS

O Sistema Aquífero Quaternário Costeiro está localizado na Planície Costeira do Estado do Rio Grande do Sul (Figura 8). Segundo Villwock e Tomazelli (1985) a planície costeira é uma região geológica originada das variações do nível do mar que foram responsáveis pela formação de uma extensa planície arenosa caracterizada pela presença de depósitos de sedimentos de origem lagunar, eólica, marinha, fluvial e transicional.

A planície costeira é formada por quatro sistemas do tipo laguna-barreira, sendo que o sistema lagunar é representado por lagunas, lagos, pântanos, canais e deltas (depósitos de sedimentos argilosos, silticos e orgânicos), enquanto o sistema barreira é representado por campos de dunas e praias (depósitos arenosos).

Segundo Tomazelli e Villwock (2000), a geologia dessa região é resultante de regressões e transgressões marinhas ocorridas principalmente durante o Quaternário, estando constituída por um sistema de leques aluviais e quatro sistemas Laguna-Barreira,I,II,III e IV, cujas idades variam de cerca de 400.000 anos até 5.000 anos (Figura 8). Estes depósitos

associados a eventos transgressivo-regressivos atuaram como barreiras, as quais foram fundamentais na formação de sistemas de lagos, lagoas e lagunas.

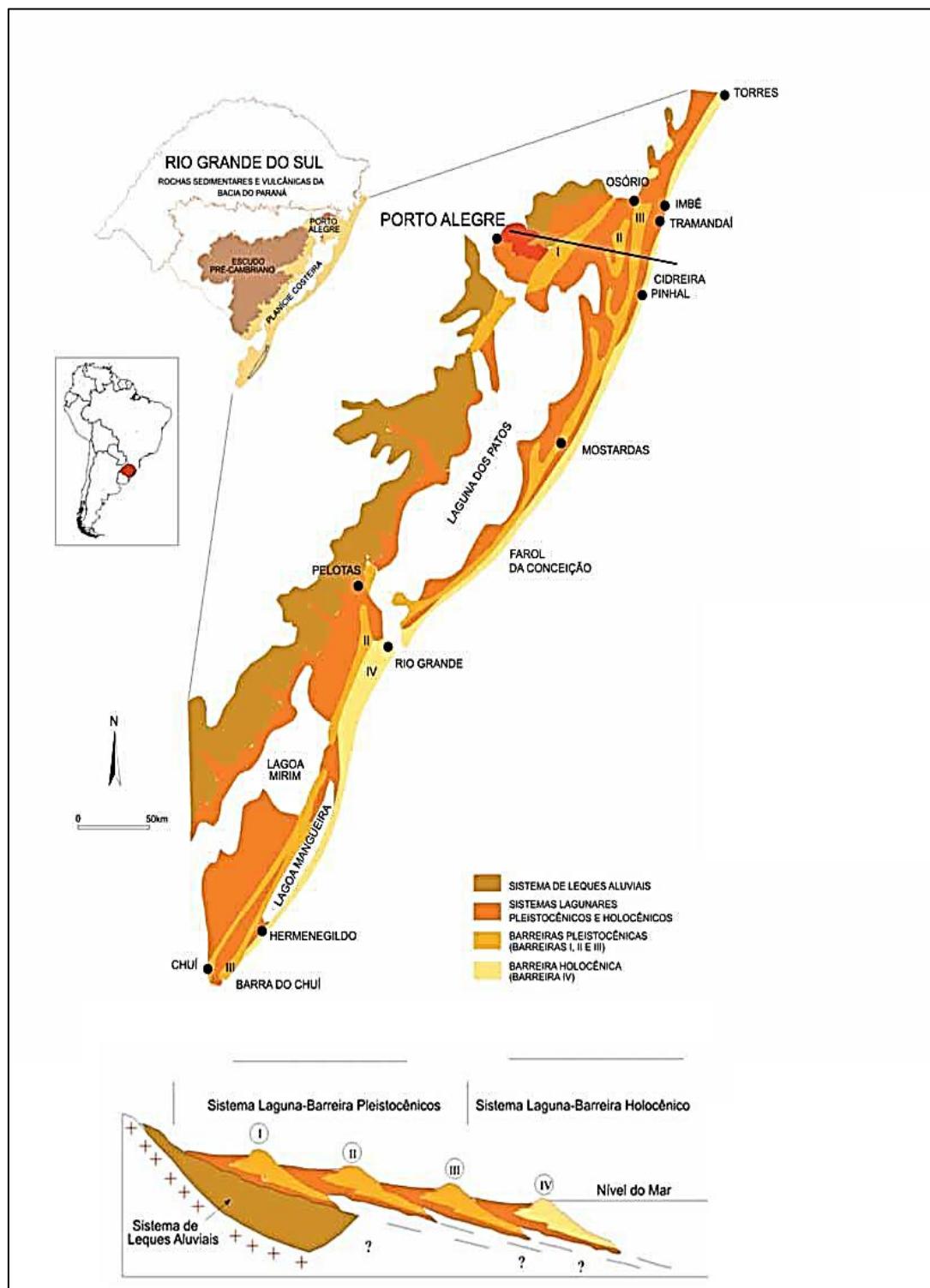


Figura 8 - Sistemas deposicionais da Planície Costeira do Rio Grande do Sul e perfil esquemático transversal aos sistemas na latitude de Porto Alegre. Fonte: modificado de Tomazelli e Villwock, 2000.

Tomazelli e Villwock (2005) esclarecem que o Sistema Deposicional Laguna Barreira I, o mais antigo (400 ka) da Planície Costeira do Rio Grande do Sul, ocupa uma faixa com orientação NE-SW com cerca de 150 km de extensão e apresenta uma largura média entre 5 e 10 km. Na Barreira I, sedimentos eólicos se acumularam e ancoraram sobre o embasamento, os quais correspondem majoritariamente a areias quartzo-feldspáticas avermelhadas de granulação fina a média. Além disso, entre os sedimentos se encontram disseminados nódulos ferruginosos. Cabe ressaltar que o Sistema Lagunar I esteve suscetível a intensos processos pós-deposicionais, como por exemplo acúmulo de carga sedimentar de rios originários de terras altas adjacentes, bem como ingressões marinhas que afogavam e retrabalhavam a geomorfologia.

O Sistema Deposicional Laguna-Barreira II (325 ka), oriundo de um segundo evento transgressivo-regressivo, é representado na porção norte por um grande pontal arenoso desenvolvido a partir do leste da Lagoa dos Barros e na parte sul por um antigo sistema de ilhas-barreiras que isola a Lagoa Mirim. A Barreira II é caracterizada por areias quartzo-feldspáticas de coloração castanho-amareladas (TOMAZELLI e VILLWOCK, 2005).

O Sistema Deposicional Laguna Barreira III, associado a um terceiro evento transgressivo-regressivo (120 ka), atualmente está bem preservada em virtude do surgimento da Lagoas dos Patos, de modo que seus depósitos se estendem de forma, desde Torres ao Chuí. Na Barreira III, os sedimentos praiais são compostos por areias quartzosas claras e finas, com algumas presenças de conchas de moluscos. Além disso, as areias eólicas de cobertura apresentam coloração avermelhada e aspecto maciço, com presença de raízes. É importante destacar que a remoção natural ou antrópica da vegetação reativa e intensifica os processos eólicos, especialmente por ventos vindos do nordeste, os quais atuam na formação de dunas parabólicas. Também, ocorrem concreções carbonáticas e ferruginosas, bem como fósseis de mamíferos (fauna pleistocênica). (TOMAZELLI e VILLWOCK, 2005)

Tomazelli e Villwock (2005) afirmam que o Sistema Deposicional Laguna-Barreira IV desenvolveu-se há cerca de 5ka com o avanço do nível do mar (3 a 4 m acima do nível atual), que possibilitou a formação de cordões litorâneos, grandes corpos lagunares, sistemas aluviais, sistemas deltaicos e paludiais (TOMAZELLI e VILLWOCK, 1991). As areias praiais da Barreira IV são quartzosas e finas (MARTINS, 1967), com locais que apresentam elevadas concentrações de minerais pesados. Ao longo de toda costa, ocorrem dunas eólicas (entre 2 e 8 km de largura) do tipo barcanóide em função dos intensos ventos.

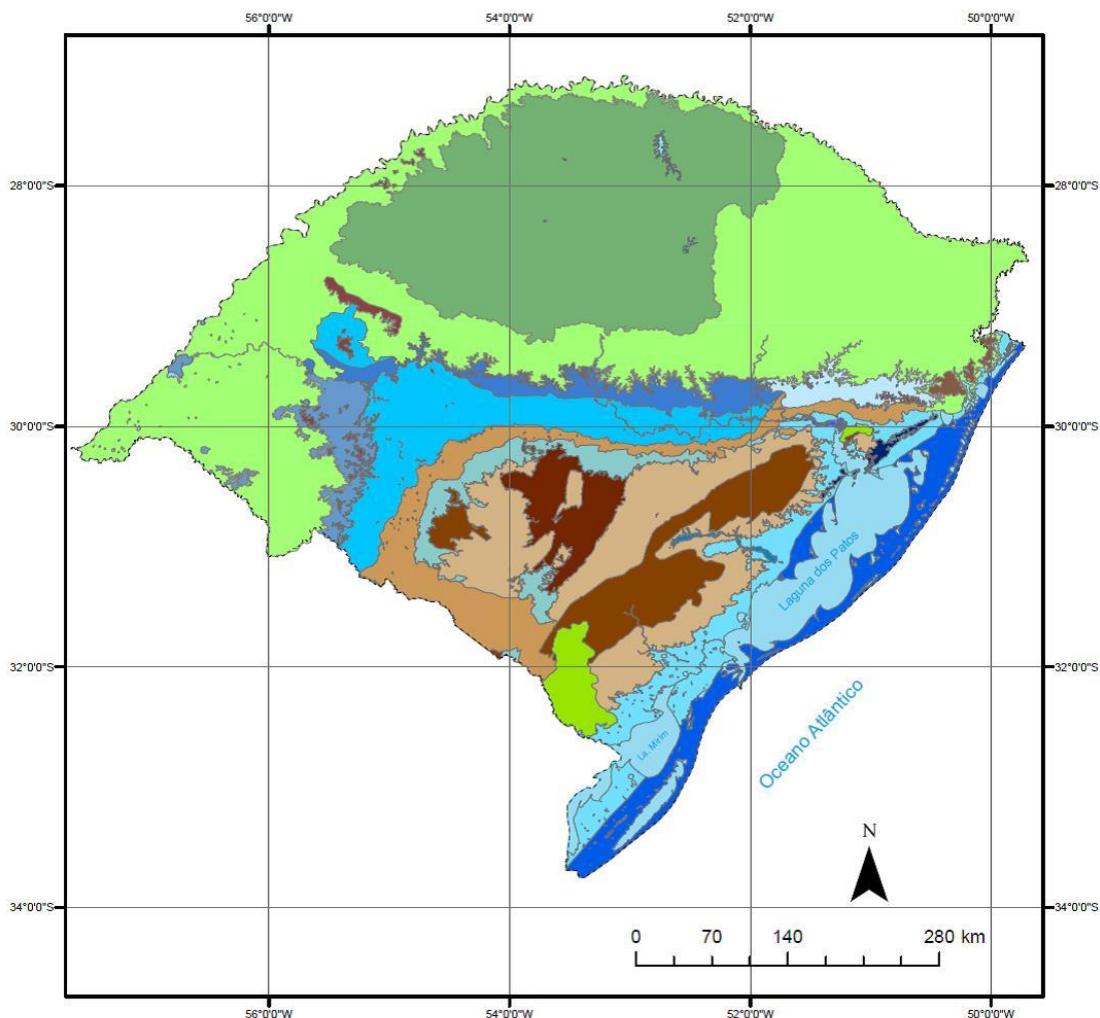
Travessas et al. (2005) observou que a Barreira IV evoluiu de forma diferenciada, no Holoceno Superior (últimos 5,1ka), em função das variações no balanço de sedimentos, as quais foram determinadas por diferenças na declividade do seu substrato, isto é, a atual plataforma continental interna. O autor ressaltou que as diferenças determinaram a existência de gradientes de energia de onda ao longo da costa, sendo que a menor energia de onda em Tramandaí determinou uma relativa estabilidade da barreira durante o Holoceno Superior, enquanto que, em Cidreira, uma maior energia de onda determinou uma maior taxa de retrogradação da barreira. A retrogradação da barreira em Cidreira promoveu a reciclagem de um extraordinário estoque de areia, o qual foi transferido parcialmente para o continente na forma de dunas transgressivas e, em parte, transportado para o norte através do sistema de correntes litorâneas.

Dillenburg et al. (2005), salientou que na Barreira IV apresenta caráter transgressivo que não é resultante da migração da barreira por uma elevação do nível do mar, visto que nesse caso os depósitos lagunares poderiam aflorar na face litorânea ou na plataforma continental, mas estes estão em zonas de pós-praia. Também afirmou que o deslocamento no sentido do continente ocorre em função de um processo erosivo na linha de costa, que se iniciou entre 5 a 6 ka.

2.3.2 CARACTERIZAÇÃO HIDROGEOLÓGICA

Conforme Lisboa et al. (2004) na Planície Costeira do RS há ocorrência de aquíferos granulares livres e confinados que formam o Sistema Aquífero Cenozóico Planície Costeira. Os aquíferos ocorrem em camadas de sedimentos que estão associadas a dois grandes eventos deposicionais denominados de Sistema Depositional Quaternário de Cobertura Laguna-Barreira e Sistema Depositional Terciário Bacia Rasa de Pelotas. Esses sistemas deposicionais deram origem a uma grande quantidade de depósitos de sedimentos. Em função disso, os aquíferos associados aos depósitos arenosos, em geral, são excelentes, apresentam consistente continuidade lateral e vertical e dão origem a grandes reservatórios de água subterrânea. Por isso, na região da planície costeira esses recursos são amplamente utilizados.

Já, conforme o Projeto Mapa Hidrogeológico do Rio Grande do Sul, desenvolvido pela CPRM (2005), a região da planície costeira há ocorrência do Sistema Aquífero Quaternário Costeiro I e II (Figura 9).



Convenções Cartográficas

----- Limites estaduais e internacionais Corpos d'água

Sistemas Aquíferos

Aquitardos Permianos	Sistema Aquífero Quaternário Costeiro II
Sistema Aquífero Embasamento Cristalino II	Sistema Aquífero Sanga do Cabral / Pirambóia
Aquicludes Eo-Paleozóicos	Sistema Aquífero Botucatu / Guará I
Sistema Aquífero Basalto / Botucatu	Sistema Aquífero Botucatu / Pirambóia
Sistema Aquífero Botucatu	Sistema Aquífero Palermo / Rio Bonito
Sistema Aquífero Serra Geral III	Sistema Aquífero Quaternário Barreira Marinha
Sistema Aquífero Embasamento Cristalino III	Sistema Aquífero Quaternário Costeiro I
Sistema Aquífero Serra Geral I	Sistema Aquífero Quaternário Indiferenciado
Sistema Aquífero Serra Geral II	Sistema Aquífero Sedimentos Deltaicos
Sistema Aquífero Embasamento Cristalino I	Sistema Aquífero Santa Maria

Figura 9 - Mapa Hidrogeológico do Estado do Rio Grande do Sul com a representação dos principais sistemas aquíferos e do Sistema Aquífero Quaternário Costeiro I e II (modificado de Machado e Freitas, 2005).

O Sistema Aquífero Quaternário Costeiro I (SAQC I) consiste de um conjunto de aquíferos que estão associados a camadas de sedimentos arenosos de granulometria fina a

média, coloração esbranquiçada, que ocorrem intercaladas com camadas de sedimentos siltico-arenosas a argilosas. Os aquíferos apresentam capacidades específicas altas, em geral, superiores a 4 m³/h/m e águas com salinidades inferiores a 400 mg/l (CPRM, 2005).

O Sistema Aquífero Quaternário Costeiro II (SAQC II) é caracterizado por aquíferos associadas a camadas de sedimentos arenosos finos que ocorrem intercalados com camadas de argila cinza. Os aquíferos apresentam capacidades específicas baixas a médias (valores entre 0,5 e 1,5 m³/h/m) e águas com conteúdo de sólidos totais dissolvidos entre 600 e 2000 mg/l (CPRM, 2005).

O Sistema Aquífero Quaternário Costeiro, no estado do Rio Grande do Sul e Santa Catarina, segundo Goffermann et al. (2013), é caracterizado por depósitos de sedimentos inconsolidados (areia finas a média) que ocorrem intercalados por camadas de sedimentos finos (siltes e argilas). Nesse sistema foram perfurados 17 poços que são utilizados para monitoramento de níveis e de qualidade da água. Esses poços fazem parte da rede RIMAS (Rede Integrada de Monitoramento da Água Subterrânea) da CPRM.

No litoral norte do estado o Sistema Aquífero Quaternário Costeiro ocupa praticamente toda a faixa litorânea entre os municípios de Torres e Palmares do Sul, totalizando 120 km de extensão. Essa região é caracterizada por uma ampla área de terrenos planos (área aflorante de aproximadamente 6.000 km²), composto por um grande sistema de lagoas costeiras, sendo que os aquíferos apresentam, em geral, capacidades específicas superiores a 4 m³/h/m (Troian et al., 2014).

Segundo Troian et al. (2014) esse sistema aquífero apresenta alta vulnerabilidade à contaminação, em virtude de suas características hidrogeológicas. Além disso, há um uso não controlado de uma elevada quantidade de poços ponteiras na região, especialmente em aglomerados urbanos, os quais podem ser um meio de contaminação das águas subterrâneas.

Reginato e Michalski (2013) realizaram um estudo do Sistema Aquífero Quaternário Costeiro na região de Cidreira, Balneário Pinhal e Palmares do Sul e identificaram a ocorrência de aquíferos granulares livres e confinados que estão associados ao Sistema Aquífero Quaternário Costeiro I (Figura 10). Os aquíferos granulares livres estão associados a camadas de areia que ocorrem até as profundidades de 10 a 15 metros, sendo que os níveis estáticos estão situados entre 1,5 e 2,0 metros de profundidade. Os aquíferos granulares confinados ocorrem associados a camadas de areia localizadas em profundidades maiores que 15 ou 20 metros. Essas camadas de areia são limitadas por camadas de sedimentos mais finos,

representados por(silte e argila de coloração acinzentada ou argilas com concentração variável de matéria orgânica.

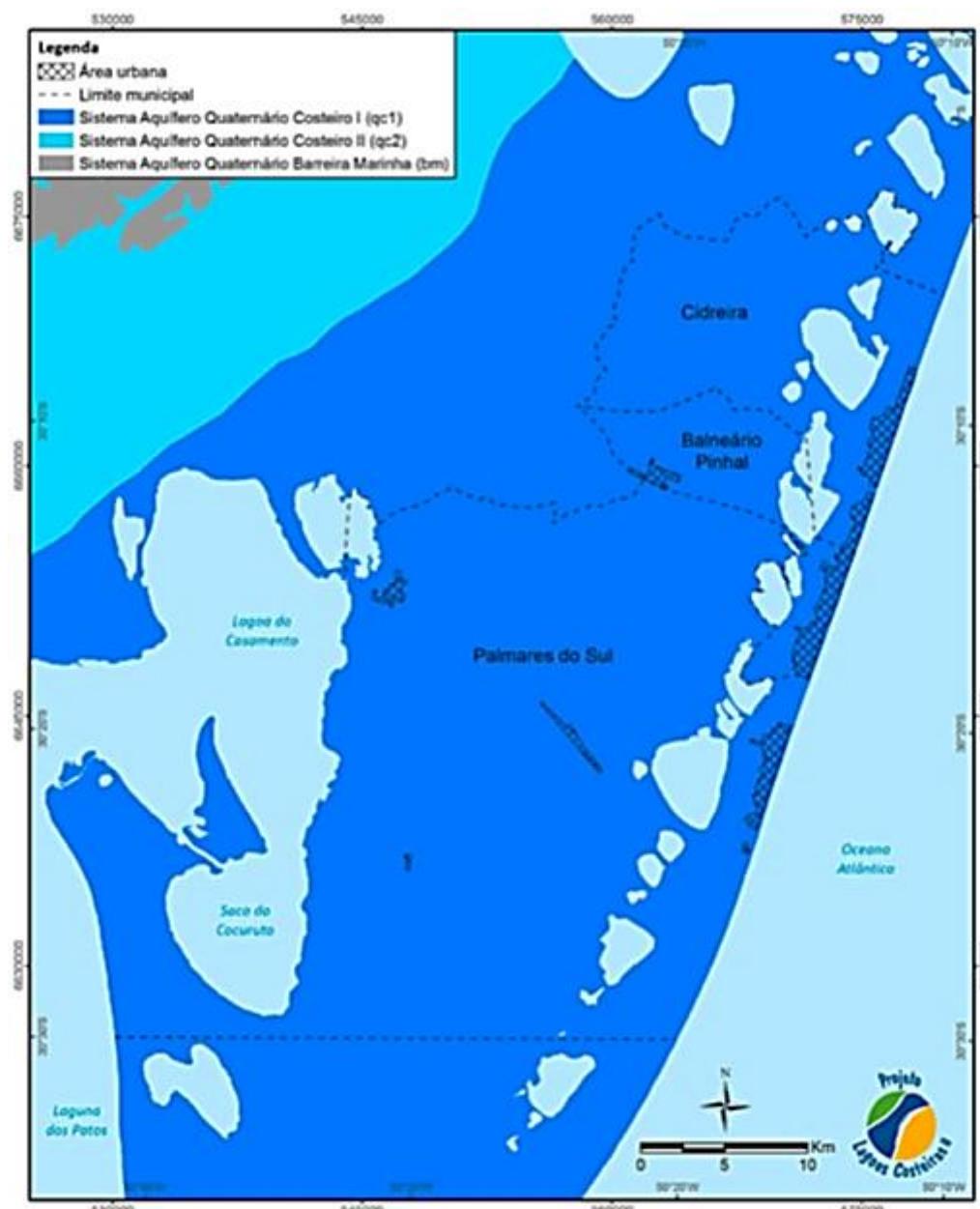


Figura 10 - Mapa Hidrogeológico da Região de Balneário Pinhal, Cidreira e Palmares do Sul (adaptado de Machado, 2005 - Reginato e Michalski, 2013).

Segundo Reginato e Brancher (2009) no litoral médio e sul do Rio Grande do Sul há ocorrência do Sistema Aquífero Quaternário Costeiro I (região de Mostardas, Tavares, São José do Norte e Santa Vitória do Palmar) e Sistema Aquífero Quaternário Costeiro II (região de Santa Vitória do Palmar). Nessas regiões há ocorrência de aquíferos granulares livres e confinados que estão associados a camadas de sedimentos arenosos. Esses aquíferos

apresentam capacidades específicas variáveis (entre 0,1 e 14,23 m³/h/m), vazões médias da ordem de 25 m³/h (entre 1,6 e 100 m³/h) e níveis estáticos variando entre 2 e 5 metros.

No sistema aquífero quaternário costeiro, a água subterrânea é usada especialmente para consumo humano (urbano e doméstico), mas também é utilizada na irrigação e na dessedentação de animais. Em geral, nas áreas urbanas dos municípios o abastecimento é realizado pela CORSAN, enquanto que na área rural esse abastecimento é realizado pelo proprietário da terra, que em geral, utiliza poços para captação da água subterrânea. Nesse caso, a captação é individual e não coletiva, pois são raros os poços comunitários (REGINATO et. al., 2008; Reginato e Brancher, 2009; Reginato e Michalski, 2013).

A principal forma de captação da água subterrânea na região litorânea é feita por meio de poços rasos (poços ponteira e poços escavados) e, secundariamente, por poços tubulares. Em função das características dos aquíferos captados e da forma de captação há um elevado risco de contaminação. Os próprios poços podem se tornar vetores de contaminação, uma vez que, quando construídos de forma inadequada, permitem o contato de contaminantes químicos e biológicos com a água subterrânea (REGINATO et al., 2008).

As águas subterrâneas do Sistema Aquífero Quaternário Costeiro (SAQC), conforme Goffermand et al. (2013), são águas bicarbonatadas cálcicas, cloretadas cálcicas e bicarbonatadas sódicas que apresentam pH variando entre 5,1 e 7,8 e condutividades elétricas entre 70 e 438 uS/cm. Já de acordo com Machado e Freitas (2005) as águas do SAQC I são águas que apresentam como principais ânions o bicarbonato e os cloretos e, como cátion predominante o sódio. Assim, as águas são bicarbonatadas sódicas ou cloretadas sódicas. No caso do SAQCII, as águas também são bicarbonatadas a cloretadas sódicas e podem apresentar valores de sólidos totais dissolvidos entre 600 e 2000 mg/l.

No estudo realizado por Reginato e Michalski (2013) para a região de Palmares, Balneário Pinhal e Cidreira, as águas subterrâneas foram classificadas como doces (89,7%) e salobras (10,3%). Nessa região predominam águas bicarbonatadas cálcicas ou magnesianas (51,7%), bicarbonatadas sódicas (44,8%), sulfatadas ou cloretadas sódicas (3,5%). O pH varia entre 6 e 9 indicando a ocorrência de águas levemente ácidas a alcalinas.

Para o litoral médio e sul da planície costeira Reginato e Brancher (2009) identificaram que no SAQC I e II as águas subterrâneas são do tipo bicarbonatadas sódicas (56,9%), bicarbonatadas cálcicas ou magnesianas (23,5%) e sulfatadas ou cloretadas sódicas (19,6%).

Troian et al. (2014) realizaram um monitoramento quali-quantitativo do aquífero costeiro no litoral norte do estado do Rio Grande Do Sul. Em suas amostras, identificaram altas concentrações do elemento ferro nas águas analisadas, nas quais a maioria das amostras apresentou valores acima do limite de potabilidade estabelecido pela Resolução CONAMA396/2008.

Michalski et al. (2013) realizaram estudos de toxicidade da água subterrânea sendo que os resultados indicaram a ocorrência de vários elementos que dependendo da concentração podem provocar problemas de saúde. Os elementos identificados no estudo foram: ferro, manganês, alumínio, cromo, zinco e boro, entre outras. Em muitos poços os valores desses elementos e da turbidez estão acima dos limites definidos nas portarias de potabilidade, tornando a água imprópria para consumo humano.

2.4 MÉTODOS DE AVALIAÇÃO DE VULNERABILIDADE

A vulnerabilidade é o grau de facilidade natural de um aquífero ser contaminado, a qual depende de suas características intrínsecas (FOSTER et. al., 2006), que são:

- acessibilidade do contaminante ao aquífero;
- capacidade de atenuação da camada não saturada sobre o aquífero.

O conceito de vulnerabilidade fundamenta-se no fato de que as características físicas dos aquíferos oferece certo grau de proteção às águas subterrâneas contra a contaminação. Por isso, algumas áreas são mais vulneráveis a contaminações que outras (GUIGUER e KOHNKE, 2002). Por exemplo, a existência de uma camada confinante sobrejacente ao aquífero reduz a acessibilidade do contaminante, dificultando sua infiltração. Por outro lado, os aquíferos freáticos são mais suscetíveis à poluição, em função da fácil entrada no sistema aquífero. Além disso, a existência de camadas acima do aquífero com maiores profundidades propicia atenuação natural dos poluentes, ao longo de sua percolação. Elevadas profundidades associadas às interações físicas, químicas e biológicas podem degradar ou imobilizar substâncias poluentes.

É importante ressaltar que, a partir de mapas de vulnerabilidade é possível gerenciar melhor os recursos hídricos subterrâneos de uma região. Normalmente, as ferramentas de vulnerabilidade e os perímetros de proteção de poços de captação são eficazes na aplicação de diretrizes para a regulação do uso do solo. Essas ferramentas são imprescindíveis porque as

estratégias de proteção da qualidade das águas subterrâneas são geralmente fundamentadas nas restrições da ocupação da terra (FOSTER et al. 1992, FOSTER et al. 2002).

Visto que um controle universal que restrinja a ocupação do terreno indistintamente é pouco executável e apresenta elevados custos econômicos e sociais, é fundamental usar a capacidade natural de proteção e depuração de poluentes que as camadas que recobrem a zona saturada oferecem, a fim de identificar o tipo de controle necessário para cada local (HIRATA, 1999).

Cabe destacar que a quantificação da vulnerabilidade é relativa e apresenta critérios subjetivos já que os resultados apresentados mostram apenas valores relativos uns aos outros e não valores absolutos (VRBA e ZAPOROZEC, 1994).

Existem diferentes métodos para avaliar a vulnerabilidade de aquíferos, os quais utilizam índices para características específicas do aquífero estudado (Figura 11), sendo que os mais utilizados no Brasil serão descritos a seguir. Destaca-se como método para aquíferos costeiros o GALDIT.

MÉTODO	AVALIAÇÃO DE	FATORES	REFERÊNCIA
SURFACE IMPOUNDMENT ASSESSMENT	Sistemas de disposição de águas servidas	<ul style="list-style-type: none"> · zona não saturada · importância do recurso · qualidade de águas subterrâneas · periculosidade do material · distância aterro e poços produtores 	LE GRAND (1964)
LANDFILL SITE RANKING (método Le Grand-Brown)	Aterros sanitários novos e em operação	<ul style="list-style-type: none"> · profundidade do nível d'água · gradiente do aquífero · permeabilidade e capacidade de atenuação 	LE GRAND (1983)
SITE RANKING SYSTEM	Disposição de produtos químicos, novos e em operação	<ul style="list-style-type: none"> · solo, caract. hidráulica, sorção e tamponamento químico · hidrodinâmica do aquífero · ar · população próxima 	HAGERTY <i>et al.</i> (1973)
POLUIÇÃO DOS LENÇOIS AQUÍFEROS	Vulnerabilidade geral	<ul style="list-style-type: none"> · geologia (litológia e estrutura) 	TALTASSE (1972)
WASTE-SOIL INTERACTION MATRIX	Disposição de resíduos sólidos e líquidos e novas indústrias	<ul style="list-style-type: none"> · efeitos na saúde · característica do produto químico · comportamento do produto · capacidade do solo/atenuação · hidrogeologia · característica do local 	PHILIPS <i>et al.</i> (1977)
SITE RANKING METHODOLOGY	Disposição de resíduos sólidos e líquidos e novas indústrias	<ul style="list-style-type: none"> · receptor-população/uso da água/uso local/degradação ambiental · caminhos, nível e tipo de contaminação; profundidade do nível d'água; pluviometria; permeabilidade do solo · característica do resíduo-toxicidade, persistência · prática de manejo-aspectos operacionais e construtivos 	KULFS <i>et al.</i> (1980)
DRASTIC	Vulnerabilidade geral	<ul style="list-style-type: none"> · D profundidade da água subterrânea · R recarga · A meio aquífero · S solo · T topografia · I impacto no aquífero · C condutividade hidráulica 	ALLER <i>et al.</i> (1985)
GOD	Vulnerabilidade geral	<ul style="list-style-type: none"> · G tipo de aquífero · O litologia zona vadosa · D profundidade da água 	FOSTER & HIRATA (1988)
GROUNDWATER VULNERABILITY MAP FOR NITRATE	Potencial de lixiviação de nitrato	<ul style="list-style-type: none"> · tipo de solo · característica hidráulica e litológica do aquífero 	Carter <i>et al</i> (1987)
POTENTIAL WASTE SITES (PWDS)	Disposição de resíduos sólidos	<ul style="list-style-type: none"> · vulnerabilidade · confinamento do aquífero · proximidade de fontes · tipo e quantidade de contaminante · velocidade zona saturada · percolação 	BGS (sem data)
(Sem nome)	Vulnerabilidade geral, baseado na teoria do fluxo-pistão	<ul style="list-style-type: none"> · condutividade hidráulica zona não saturada · profundidade da água subterrânea · umidade do solo · recarga real 	Marcolongo & Pretto (1987)
SINTACS	Vulnerabilidade geral	igual ao DRASTIC, com pesos diferentes	CIVITA <i>et al.</i> (1990)
(Sem nome)	Vulnerabilidade geral	<ul style="list-style-type: none"> · característica litológica e de permeabilidade · profundidade da água 	ADAMS & FOSTER (1992)
PERIGO ASSOCIADO A SISTEMA DE SANEAMENTO <i>IN SITU</i>	Avaliar áreas de maior risco por sistemas de saneamento <i>in situ</i>	<ul style="list-style-type: none"> · vulnerabilidade (GOD) · densidade população · análises indicadores físico-químicos (condutividade elétrica) 	FERREIRA & HIRATA (1993)

Figura 11 - Tabela com principais métodos para a determinação da vulnerabilidade à poluição de aquíferos (Hirata & Rebouças, 1999).

2.4.2 ÍNDICE DE VULNERABILIDADE À POLUIÇÃO DRASTIC

A metodologia DRASTIC (ALLERT et. al., 1987) calcula um índice de vulnerabilidade a partir de dados de geologia, pedologia, hidrogeologia e topografia. Esse método pressupõe que o contaminante é introduzido à superfície do terreno, sendo transportado verticalmente até o aquífero pela água de infiltração, de forma que o contaminante possui mobilidade na água. Uma área mínima de 0,4 km² é necessária para que a utilização do método seja válida;

O índice é calculado a partir do somatório ponderado de sete valores correspondentes aos sete parâmetros (ALLER et al., 1987): denominados de:

- D – Profundidade do nível freático (*Depth*): indica a distância ou espessura de material que um poluente deve percorrer antes de atingir a zona saturada. Quanto maior o caminho percorrido do contaminante, maior a chance de adsorção ou atenuação dele, e assim, menor será o nível de contaminação do aquífero;
- R – Recarga que recebe o aquífero (*Recharge*): representa o volume por unidade de área de água que atinge a zona saturada. Quanto maior for a recarga de uma área, maior é a chance de infiltração do contaminante na água subterrânea;
- A – Litotipo e estrutura do meio aquífero (*Aquifer*): compreende a composição dos sedimentos e das rochas que formam o aquífero. A composição é importante nos processos de atenuação e dispersão de contaminantes;
- S – Tipo de solo (*Soil*): consiste no material de cobertura da superfície terrestre, o qual é constituído por partículas de tamanhos variáveis, além de constituintes orgânicos. Tem influência nos processos de recarga e atenuação;
- T – Inclinação do terreno (*Topography*): significa a declividade do terreno. Terrenos com maior declividade sofrem menor infiltração de água e, portanto, menor infiltração do poluente. Terrenos mais planos são mais suscetíveis à infiltração dos poluentes;
- I – Influência da zona vadosa ou não saturada (*Impact*): corresponde a ação da zona não saturada que se encontra abaixo da superfície da terra e acima do nível estático. O tipo de material da zona não saturada condiciona o tempo de contato com o poluente, o qual permite a biodegradação, a neutralização, a filtração mecânica, a reação química, a volatização e a dispersão. Cada material tem uma importância para atenuação do potencial de poluição;

- C – Condutividade hidráulica do aquífero (*Conductivity*): consiste na taxa com que a água flui nos interstícios do meio aquífero, sob um determinado gradiente hidráulico (MELO JUNIOR, 2002). O transporte de poluente na zona saturada depende do fluxo subterrâneo, logo quanto maior for a condutividade hidráulica do aquífero maior será a taxa de transporte de um poluente.

Para cada um dos sete parâmetros é definido um índice que varia de 1 a 10 e que é multiplicado por um peso pré-definido pela metodologia (D = Peso 5, R = Peso 4, A = Peso 3, S = Peso 2, T = Peso 1, I = Peso 5, C = Peso 3). Na figura 12 são apresentados os valores dos diferentes índices. A partir do valor obtido dessa multiplicação é obtido um número (entre 23 e 230) que é utilizado para enquadrar o aquífero nas diferentes classes de vulnerabilidade (Tabela 1).

D - Profundidade do NA		R - Recarga (cm)		A - Meio aquífero		
Intervalo	Grau	Intervalo	Grau	Tipo	Grau	
0-2	10	0-3	1	Argilito maciça	1-3	2
2-5	9	3-10	3	Metamórfica/Ígnea	2-5	3
5-10	7	10-18	6	M/I Intemperizada	3-5	4
10-17	5	18-25	8	Till glacial	4-6	5
17-26	3	>25	9	Argilito/siltito laminada(o)	5-9	6
26-34	2			Arenito macizo	4-9	6
>34	1			Calcário maciço	4-9	6
				Areia ou cascalho	4-9	8
				Basalto	2-10	9
				Calcário cárstico	9-10	10

S - Solo		T - Declividade (%)		I - Material da zona vadosa		
Tipo	Grau	Intervalo	Grau	Tipo	Grau	
Fino/ausente	10	0-2	10	Camada confinante	1	1
Cascalho	10	2-6	9	Silte/argila	2-6	3
Areia	9	6-12	5	Argilito	2-5	3
Turfa	8	12-18	3	Calcário	2-7	6
Argila estruturada	7	>18	1	Arenito	4-8	6
* Loam	5			Argilito/siltito laminado	4-8	6
Loam siloso	4			Areia e cascalho com	4-8	6
Loam argiloso	3			silte e argila		
** Muck	2			Metamórfica/Ígnea	2-8	4
Argila maciça	1			Areia e cascalho	6-9	8

C - Condutividade hidráulica (m/s)		Fatores de ponderação e índice DRASTIC final	
Intervalo	Grau	D	.5 =
5.10 ⁻⁷ - 5.10 ⁻⁵	1	R	.4 =
5.10 ⁻⁵ - 1.10 ⁻⁴	2	A	.3 =
1.10 ⁻⁴ - 3.10 ⁻⁴	4	S	.2 =
3.10 ⁻⁴ - 5.10 ⁻⁴	6	T	.1 =
5.10 ⁻⁴ - 10.10 ⁻⁴	8	I	.5 =
> 10.10 ⁻⁴	10	C	.3 =
		Total =	

Figura 12 - Parâmetros e índices de ponderação do método DRASTIC (adaptado de Hirata e Fernandes, 2008 in: Feitosa, 2008).

Tabela 1.Classes de vulnerabilidade do índice DRASTIC. Fonte: ALLER et al., 1987.

Índice DRASTIC	Vulnerabilidade
Superior a 199	Muito Elevada
160-199	Vulnerabilidade Elevada
120-159	Vulnerabilidade Moderada
Inferior a 120	Vulnerabilidade Baixa

2.4.3 MÉTODO GOD

O método GOD foi amplamente utilizado na América Latina e no Caribe durante a década de 90 (FOSTER et. al., 2006). Em virtude de sua simplicidade conceitual e de aplicação, é um método amplamente utilizado no Brasil. O método GOD considera o nível de inacessibilidade hidráulica da zona saturada do aquífero e a capacidade de attenuação dos estratos da cobertura da porção saturada do aquífero.

O índice GOD baseia-se nos seguintes parâmetros, de acordo com FOSTER (1987):

- G – Grau de confinamento da água subterrânea (*Groundwater occurrence*);
- O – Ocorrência de estratos de cobertura (*Overall aquifer class*);
- D – Distância até o lençol freático ou teto do aquífero confinado (*Depth of groundwater*).

Para cada parâmetro é atribuído um valor entre 0 e 1 (Figura 13), sendo que o índice de vulnerabilidade GOD é calculado a partir da multiplicação direta dos valores atribuídos a cada um dos parâmetros e resulta em um valor entre 0 e 1. O resultado do índice GOD possui 5 classes diferentes de vulnerabilidade que são insignificante, baixa, média, alta e extrema.

Um grau de vulnerabilidade insignificante representa a ausência de um fluxo vertical significativo de água devido à presença de camadas confinantes. Uma vulnerabilidade baixa indica uma difícil contaminação, possibilitada somente por contaminantes resistentes, quando são lançados ou lixiviados de forma contínua, durante um longo período. A vulnerabilidade moderada significa que apenas alguns contaminantes alcançarão o aquífero, se lixiviados de forma contínua. As zonas de alta vulnerabilidade são regiões que são facilmente afetadas por

diversos poluentes. As zonas de vulnerabilidade extrema são aquelas afetadas pela maioria dos contaminantes, com um impacto rápido (FOSTER et. al., 2006).

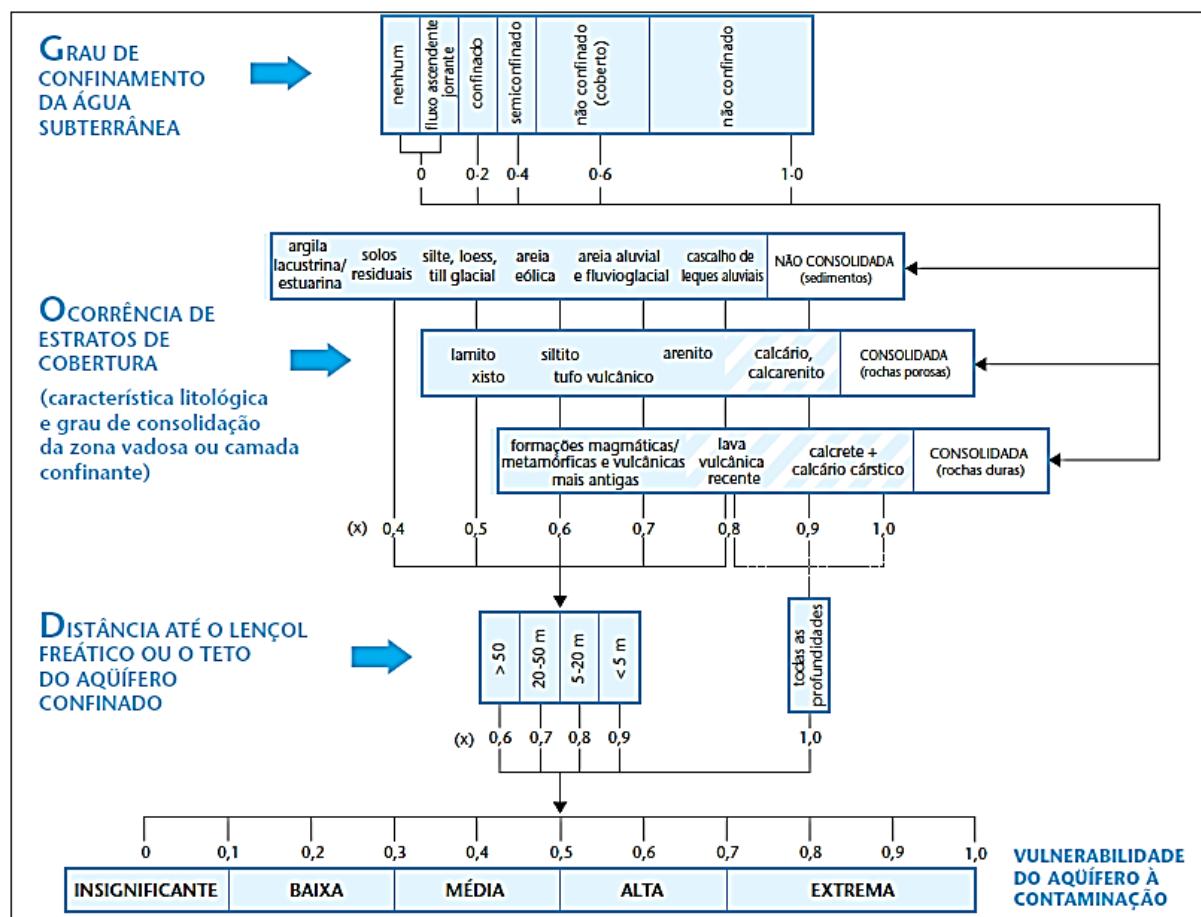


Figura 13 - Valores para cálculo do índice GOD . Fonte: FOSTER et. al., 2006

A metodologia GOD apresenta como principal vantagem a facilidade de sua execução e o fato de utilizar os parâmetros mais importantes, como profundidade do lençol freático, litologias da zona vadosa e de camadas confinantes e condição do aquífero. Cabe ressaltar que é a única metodologia que diferencia um aquífero livre de um confinado (GUIGUER et KOHNKE, 2002).

É possível gerar mapas de vulnerabilidade usando o método GOD e, com este objetivo, é necessário que toda a informação envolvida seja representada por planos de informação espacial, os quais devem estar georreferenciados. Para a obtenção dos mapas, pode-se utilizar softwares de Sistema de Informações Geográficas, realizando uma interpolação dos valores de cada parâmetro dos poços para área de estudo. Dessa forma, pode-

se obter mapas em formato matricial, nos quais os pixels indicam os valores dos parâmetros interpolados para todo o espaço amostral (MEDEIROS et al, 2011).

Usando álgebra de mapas, isto é, multiplicando-se os pixels das coordenadas correspondentes dos arquivos raster gerados para cada parâmetro, obtém-se um raster em que cada pixel apresenta um valor relativo de vulnerabilidade. Assim, é possível delimitar áreas, as quais pertencem à mesma classe de vulnerabilidade natural (Figura 14). Portanto, a área de estudo pode ser classificada espacialmente, em relação ao aquífero em questão.

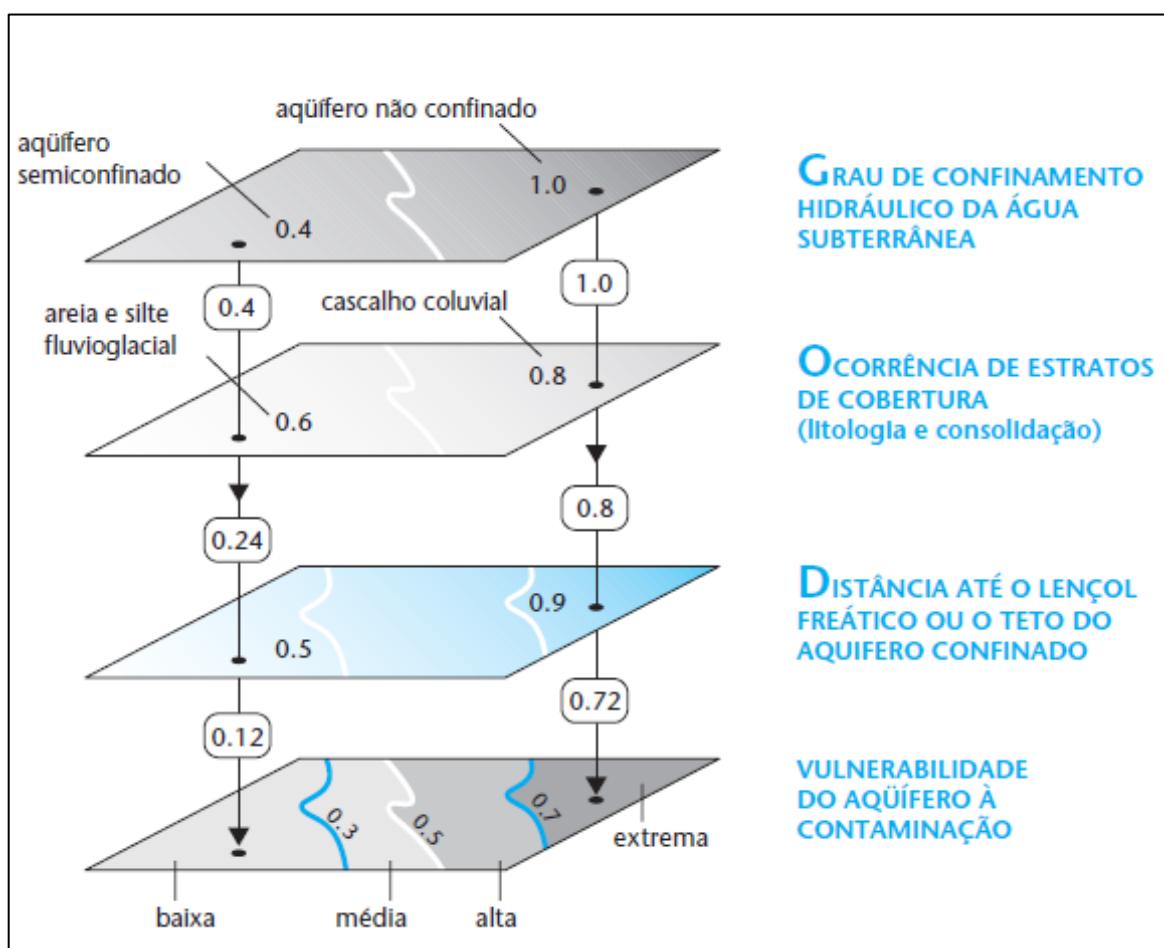


Figura 14 - Produção de mapa de vulnerabilidade pelo método GOD. Fonte: FOSTER et al., 2006.

O método de interpolação usado preferencialmente é o *Topo to Raster*, o qual é baseado nos trabalhos desenvolvidos por Hutchinson (1988, 1989) em seu programa ANUDEM. Esse interpolador está disponível no software ArcGIS, o qual informa que essa ferramenta interpola uma superfície raster a partir de dados de pontos, linhas e polígonos.

2.4.4 AVALIAÇÃO DE VULNERABILIDADE DE AQUÍFEROS COM BASE NO USO DO MÉTODO GOD

Como comentado anteriormente, o método GOD é muito utilizado para avaliação da vulnerabilidade de aquíferos no Brasil e no Rio Grande do Sul. Esse método já foi utilizado para avaliar a vulnerabilidade de aquíferos granulares e fraturados. No entanto, para a região da Planície Costeira (área de ocorrência do Sistema Aquífero Quaternário Costeiro), não foram realizados estudos de avaliação da vulnerabilidade que permitiram a geração de mapas. Para essa região, foram realizados estudos pontuais (captações) ou estudos gerais, baseados em características gerais dos aquíferos.

Para esse caso pode ser citado o trabalho de Reginato e Brancher (2009) que avaliou a vulnerabilidade de aquíferos granulares livres confinados na região do litoral médio e sul da planície costeira do Rio Grande do Sul. Nessa região foi determinado que os aquíferos granulares livres apresentam vulnerabilidades altas a extremas, pois são aquíferos livres associados a camadas de sedimentos arenosos, com níveis de água entre 0 e 5 metros na sua maioria e com pequena cobertura de solo. Já os aquíferos confinados por serem mais profundos e estarem limitados por camadas impermeáveis apresentam vulnerabilidades baixas a insignificantes.

Como exemplos de aplicação do método GOD em diferentes aquíferos, são apresentados a seguir, alguns trabalhos desenvolvidos por diferentes autores em regiões do Brasil e do Rio Grande do Sul.

Medeiros et al. (2011) realizaram o estudo da vulnerabilidade de parte da bacia sedimentar do baixo curso do Rio Paraíba, com base no uso do método GOD. Os autores realizaram a elaboração de um mapa de vulnerabilidade através do uso do programa ArcGIS 9.2. Os resultados obtidos indicaram que na região de estudo há ocorrência de todas as classes de vulnerabilidade (desde a insignificante até a extrema), sendo que nas regiões de vulnerabilidade alta e extrema deveriam ser realizados planejamentos para o uso e ocupação do solo, bem como uma gestão mais eficaz do uso dos recursos hídricos subterrâneos.

Diniz Filho et al. (2014) aplicaram o método GOD na avaliação da vulnerabilidade do aquífero Barreiras, localizado na região oeste da Lagoa do Bonfim (RN). Nessa região, o aquífero foi considerado como semi-confinado e os resultados obtidos indicaram uma baixa vulnerabilidade. No entanto, os autores ressaltam que embora esse aquífero esteja protegido, o

mesmo pode ser contaminado através da drenagem vertical descendente do aquífero livre que ocorre sobreposto.

Löbler e Silva (2015) aplicaram o método GOD na análise das águas subterrâneas do município de Nova Palma/RS. Nessa região, há ocorrência do Sistema Aquífero Serra Geral e do Sistema Aquífero Guarani. Os resultados indicaram que as captações de água subterrânea estão localizadas em regiões que apresentam diferentes vulnerabilidades: insignificante (8%), baixa (15%), média (31%), alta (31%) e extrema (15%). Além disso, os autores identificaram que os derrames de rochas vulcânicas servem como proteção natural dos aquíferos confinados que estão associados aos arenitos (Sistema Aquífero Guarani).

Feron et al. (2014) analisou a vulnerabilidade natural de aquíferos localizados na região central do município de Canoas/RS. Nesse estudo, observou-se que a vulnerabilidade natural dos aquíferos majoritariamente foi considerada como baixa a insignificante. Essa avaliação é explicada pelo fato de que na região predominam aquíferos localizados numa maior profundidade que são recobertos por camadas de sedimentos finos (argilas e siltes) e a profundidade dos níveis de água, na sua maioria, é superior a 20 metros. Contudo, foi salientado que os aquíferos fraturados associados às camadas de folhelho, por estarem localizados em menor profundidade e recobertos por sedimentos do tipo areia e silte, apresentam uma maior vulnerabilidade e risco de contaminação.

Pinheiro et al. (2015) aplicaram o método GOD nos aquíferos granulares do município de Santa Maria/RS. Concluíram que a aplicação do método GOD na avaliação da vulnerabilidade natural dos aquíferos locais mostrou-se eficiente. Nesse estudo, observou-se que as áreas onde há ocorrência de vulnerabilidade média a alta estão associadas as regiões de ocorrência da Formação Santa Maria (onde está localizado o aquífero Passo das Tropas que é poroso e livre) e da Formação Caturrita.

Reginato e Ahlert (2011) utilizaram os métodos DRASTIC e GOD para avaliar a vulnerabilidade de aquíferos fraturados que formam o Sistema Aquífero Serra Geral na região nordeste do estado do Rio Grande do Sul. Com a aplicação do método GOD foram definidas duas classes principais de vulnerabilidade que foram a baixa (79,1%) e a média (20,9%). Os autores destacam que o parâmetro profundidade de água é o que apresentou maior influência na avaliação da vulnerabilidade.

Os trabalhos desenvolvidos pelos diferentes autores demonstram que o método GOD pode ser aplicado para a avaliação da vulnerabilidade de aquíferos. Sendo assim, para esse estudo será utilizado esse método, visto que os dados disponíveis permitem a utilização do mesmo. Além disso, a avaliação da vulnerabilidade de aquíferos localizados em regiões

litorâneas é justificada, pois há carência de estudos que tenham esse objetivo, bem como são regiões onde o uso de recursos hídricos subterrâneos é elevado.

3 METODOLOGIA

Para desenvolvimento desse trabalho foram realizadas atividades associadas a diferentes etapas como: levantamento de dados geológicos e hidrogeológicos existentes; identificação e levantamento dos pontos de captação existentes na área de estudo; caracterização geológica e hidrogeológica, avaliação da vulnerabilidade e do uso do solo.

A seguir são descritas as atividades realizadas em cada uma das etapas:

- **Levantamento de Dados Geológicos e Hidrogeológicos Existentes:** esse levantamento foi realizado com o objetivo de obter dados disponíveis em publicações e mapas. Com isso, foram utilizados: o mapa hidrogeológico elaborado pela CPRM (2005) que serviu como base para a interpretação hidrogeológica da área de estudo, [e](#) o mapa hidrogeológico do estado do RS elaborado pela CPRM (2007) e Viero e Silva (2010). Também foram obtidos dados geológicos e hidrogeológicos disponíveis em publicações geradas com base em pesquisas realizadas na região de estudo. Esses dados foram utilizados na caracterização geológica e hidrogeológica da região, bem como na elaboração dos mapas geológico e hidrogeológico do município, elaborados no software QuantumGis 2.16.

- **Identificação e Levantamento de Pontos de Captação Existentes:** o levantamento foi realizado através de consulta a bancos de dados do SIAGAS, da CORSAN e do Projeto LACOS II (REGINATO e MICHAELSKI, 2013). Os dados obtidos com essa identificação foram: localização dos pontos de captação, tipos [e](#) profundidade dos poços, perfis geológicos e construtivos dos poços, nível estático, vazão e uso da água. Os dados dos poços foram organizados num banco de dados com uso do Excel, sendo que essas informações foram utilizadas na caracterização hidrogeológica e identificação dos aquíferos existentes na área de estudo, bem como na determinação de parâmetros do método GOD.

- **Caracterização Hidrogeológica:** a caracterização hidrogeológica foi realizada com base na avaliação de dados geológicos e hidrogeológicos existentes e perfis geológicos dos poços identificados na etapa anterior. Com os dados dos poços identificados, foram gerados gráficos com uso de Excel. Os perfis geológicos foram utilizados para identificar os tipos de aquíferos, suas características geológicas (tipos de sedimento, espessuras e profundidade de ocorrência), bem como elaborar seções esquemáticas da hidrogeologia da área de estudo com a representação dos principais aquíferos existentes na região. A elaboração das secções foi feita com uso do programa AutoCAD 2016.
- **Avaliação da Vulnerabilidade:** a avaliação da vulnerabilidade foi realizada através da aplicação da metodologia GOD. O parâmetro “G“, correspondente ao tipo de aquífero, foi avaliado com base na interpretação dos perfis geológicos dos poços. Para os poços que não tinham perfil geológico (poços ponteira) foi realizada uma avaliação do tipo de aquífero com base na profundidade desses poços e sua relação com a seção hidrogeológica esquemática elaborada na etapa anterior. O parâmetro “O“ que corresponde ao material de cobertura também foi determinado tendo como informações o tipo de material geológico existente sobre o aquífero. No caso dos poços que continham o perfil geológico, a avaliação desse parâmetro foi realizada com base na identificação de camadas e tipos de sedimentos que ocorrem sobre os aquíferos. Já para os poços que não continham perfis (poços ponteira), a determinação desse parâmetro foi realizada tendo como base o mapa geológico. Para isso os poços foram plotados no mapa geológico da área, sendo feita a identificação da unidade geológica que estava associado a localização do poço. Com base nas características geológicas dessa unidade foi definido o valor do parâmetro O para esses poços. Por fim, o parâmetro “D“ foi definido levando em consideração a profundidade do nível de água identificado nos poços cadastros na área de estudo, sendo que para os aquíferos confinados considerou-se a profundidade de localização do topo da camada confinante. Para cada grupo de aquíferos foram geradas as interpolações dos parâmetros do método GOD, usando o interpolador *Topo to Raster* do software ArcGIS. Em seguida, geraram-se os mapas de vulnerabilidade por meio da ferramenta de Álgebra de Mapas do mesmo software.

- **Uso e Ocupação do Solo e a Relação com a Vulnerabilidade:** o mapeamento do uso e cobertura do solo foi realizado através do uso de arquivos vetoriais georreferenciados do IBGE (2004), escala 1/250.000. O mapa de uso do solo foi cruzado com os mapas de vulnerabilidade, a fim de avaliar possíveis problemas de contaminação em áreas com

diferentes classes de vulnerabilidade. A elaboração dos mapas temáticos e do mapa de vulnerabilidade foi realizada com o emprego do programa QuantumGis 2.16 e ArcGIS 10.4.1.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 ÁREA DE ESTUDO

A área de estudo abrange todo o município de Palmares do Sul, localizado na porção leste do estado do Rio Grande do Sul (Figura 15), pertencente à região sul do Brasil. De acordo com o IBGE (2016), o município foi fundado em 31/12/1983, a população estimada em 2016 é de 11.431 habitantes, a área da unidade territorial é de 950,716 km² e a densidade demográfica de 2010 é de 11,56 habitantes/km². Também, o município está inserido no bioma pampa e apresenta clima subtropical.



Figura 15 - Localização do Município de Palmares do Sul/RS.

Além disso, o Índice de Desenvolvimento Humano (IDH) é de 0,715, considerado alto (IDHM 2010), seu PIB *per capita* (IBGE, 2013) é de R\$ 23.374,13 e a população residente alfabetizada é de 9.397 pessoas.

4.2 GEOLOGIA DA ÁREA DE ESTUDO

Com base nos shapefiles do mapa geológico do estado do RS (CPRM, 2008), elaborou-se o mapa geológico (Figura 16). As principais unidades geológicas presentes na região estão representadas por:

- Depósitos do Sistema Laguna-Barreira II (Pleistoceno - 325 ka)
 - Depósitos praiais eólicos (Q2pe2)
 - Depósitos de planície lagunar (Q2pl2)
- Depósitos do Sistema Laguna-Barreira III (Pleistoceno - 120 ka)
 - Depósitos de cristas e praias lagunares (Q3pc3)
 - Depósitos praiais eólicos (Q3pe3)
 - Depósitos de planície lagunar (Q3pl3)
- Depósitos do Sistema Laguna-Barreira IV (Holoceno - 5ka)
 - Depósitos aluviais (Q4a)
 - Depósitos deltaicos (Q4d)
 - Depósitos eólicos (Q4e4)
 - Depósitos de praias e cristas lagunares (Q4pc)
 - Depósitos de planície lagunar (Q4pl)
 - Depósitos de retrabalhamento eólico (Q4re)
 - Turfas (Q4tf)

No caso do Sistema Laguna-Barreira II, os depósitos praiais eólicos são representados por areias quartzosas finas e areias médias a finas bem arredondadas e selecionadas. Já os depósitos de planície lagunar são caracterizados por areias com silte e argila, mal selecionadas, apresentando concreções carbonáticas e ferruginosas.

Já para o Sistema Laguna-Barreira III, os depósitos de cristas e praias lagunares estão representados por areia quartzosa fina a muito fina, bem selecionada, formando cristas subparalelas às margens lagunares. Os depósitos praiais eólicos são formados por areia quartzosa fina, bem selecionada com laminação plano-paralela e cruzada, enquanto os depósitos de planície lagunar são caracterizados por areia com silte e argila, mal selecionada com concreções de carbonato, ferro e manganês.

Por fim, no Sistema Laguna Barreira IV é caracterizado pela ocorrência de diferentes tipos de depósitos de sedimentos: aluviais (areias grossas a finas, cascalhos, silte e argila, depositados em calhas de rio e planícies de inundação); deltaicos (areia siltico-argilosa, silte e argila com restos orgânicos vegetais); eólicos (areias quartzosas, finas a médias, bem arredondadas e selecionadas); praias e cristas lagunares (areias quartzosas finas a muito finas, bem selecionadas formando cristas subparalelas às margens de lagoas); planície lagunar (areias com silte e argila mal selecionadas); retrabalhamento eólico (areias quartzosas finas a médias, bem arredondadas e selecionadas com laminação plano-paralela e cruzada); turfas (matéria orgânica misturada com camadas de areia, silte e argila).

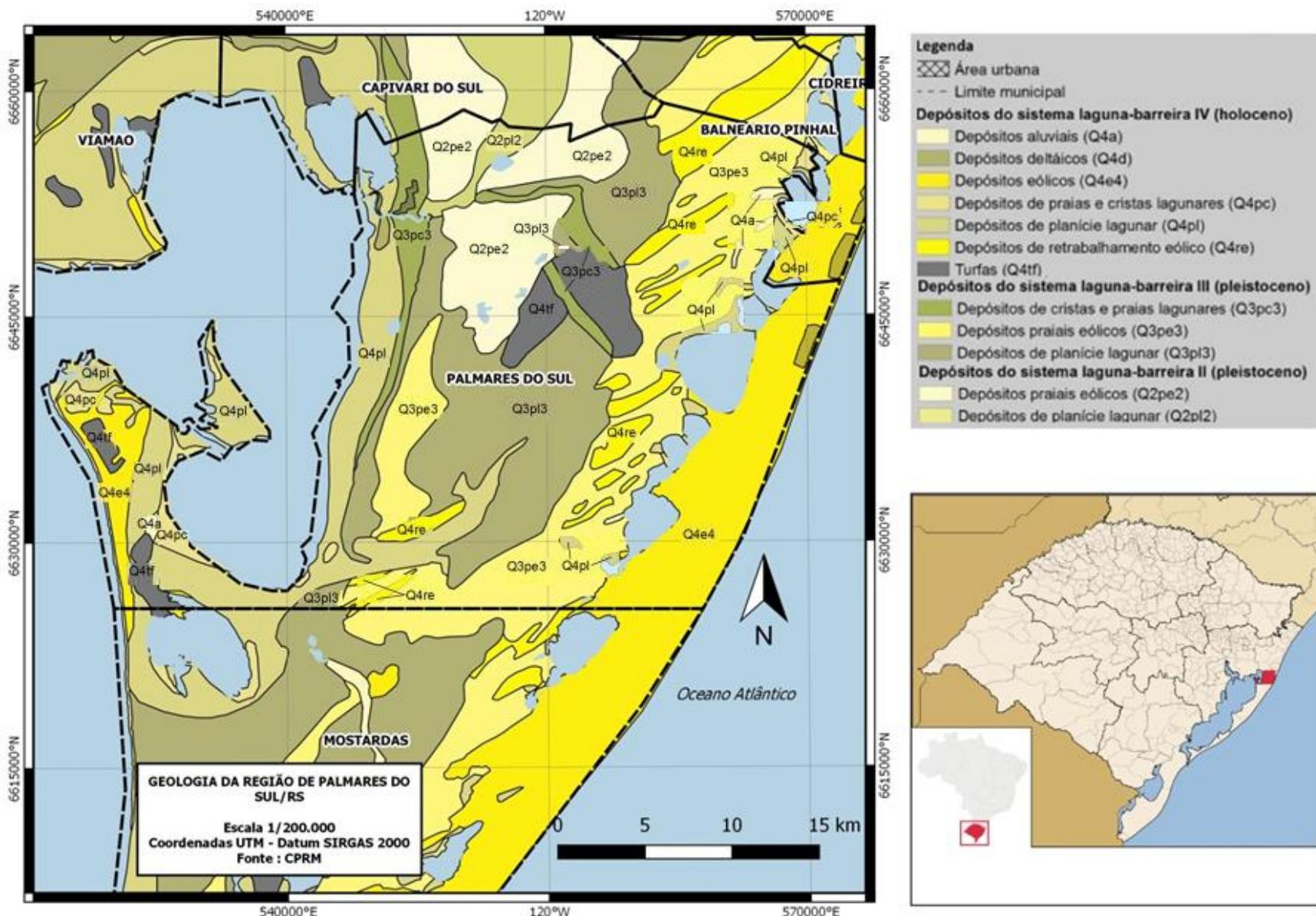


Figura 16 - Mapa da Geologia de Palmares do Sul/RS.

4.3 CARACTERIZAÇÃO HIDROGEOLÓGICA DA ÁREA

O município de Palmares do Sul está inserida totalmente no Sistema Aquífero Quaternário Costeiro I. Com base na análise dos perfis geológicos de poços tubulares, foi realizada a identificação dos principais aquíferos que ocorrem na região de estudo. Para uma melhor avaliação e representação desses aquíferos foram definidas duas seções que bem representassem a área de estudo, bem como aproveitassem ao máximo a disposição geométrica dos poços com perfil estratigráficos levantados. O Perfil 1 (sentido noroeste–sudeste), com extensão aproximada de 29 km, localiza-se entre a sede do município de Palmares do Sul e o balneário de Quintão. O Perfil 2 (sentido nordeste – sudoeste), com extensão aproximada de 17,5km, está relativamente paralelo à linha de costa entre a Lagoa do Quintão e a Lagoa do Rincão das Éguas. A Figura 17 apresenta as seções definidas (Perfil 1 e Perfil 2) e a hidrogeologia local.

A Figura 18 apresenta a distribuição dos poços na região de estudo, bem como aspectos físicos da área (hidrografia, rede viária, áreas urbanas, corpos d'água e limites municipais). Foram levantados 145 poços na região de estudo, dos quais 117 são poços ponteiras e 28 são tubulares, conforme Figura 19. Do total de poços, 74 % captam água de baixas profundidades, dentro do intervalo de 2 a 20 m (Figura 20). Esses dados demonstram que o abastecimento de água subterrânea é de grande importância no município, sendo que na área urbana esse abastecimento é realizado pela CORSAN através da captação da água subterrânea por poços tubulares. Já fora da área urbana o abastecimento é realizado, principalmente por poços ponteiras.

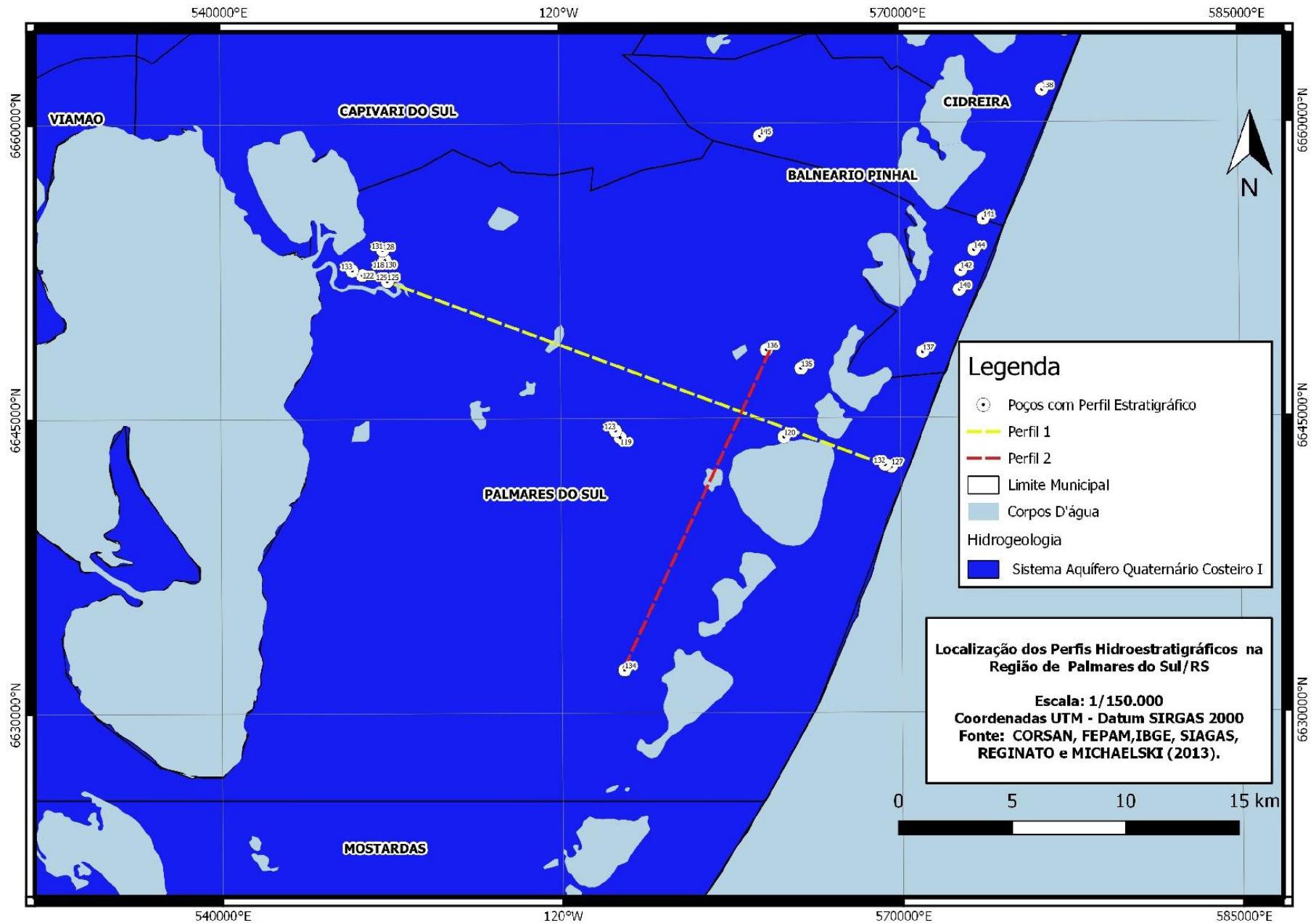
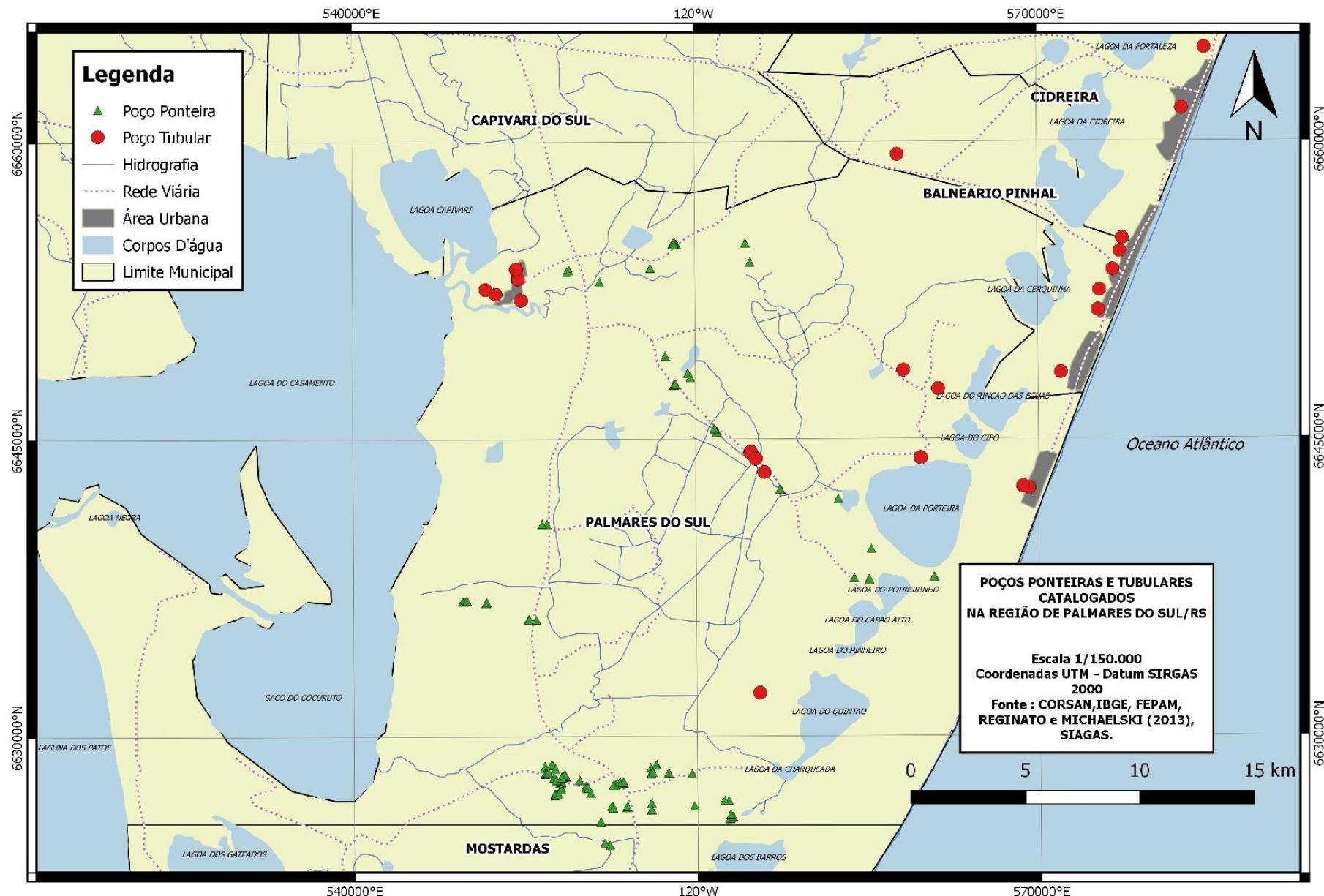


Figura 17 - Mapa hidrogeológico com localização dos perfis hidroestratigráficos definidos.



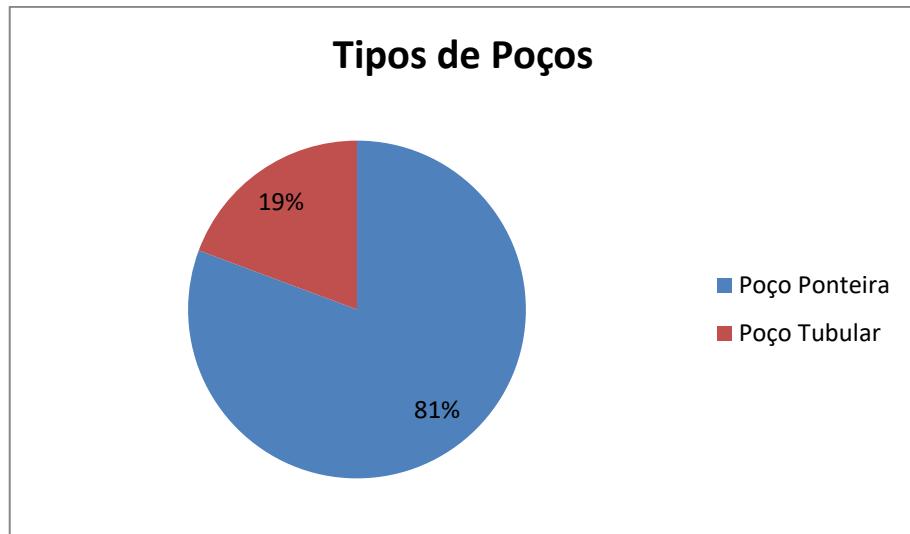


Figura 19 - Percentual de poços por tipo.

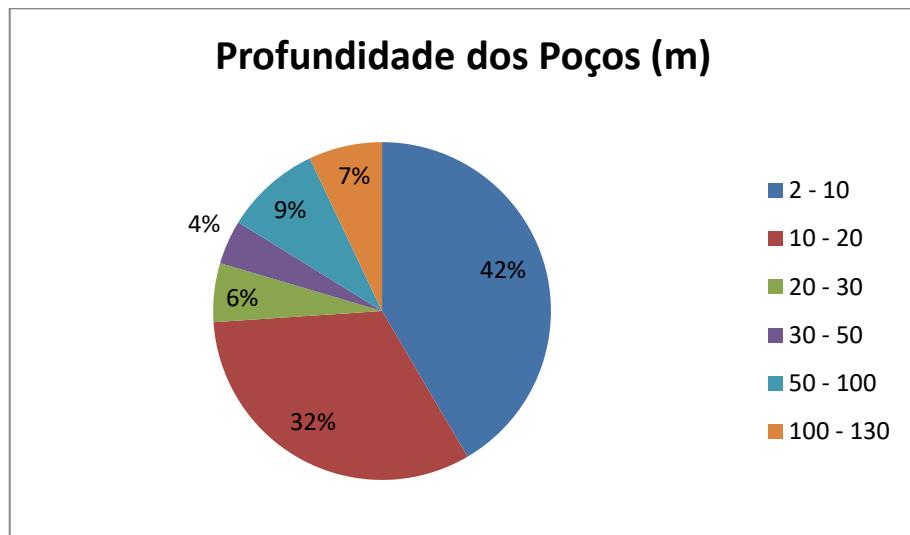


Figura 20 - Intervalos de profundidades de poços.

Os usos da água subterrânea captada destinam-se basicamente ao abastecimento domiciliar e às atividades agropecuárias, das quais se destaca a irrigação. Cabe ressaltar que 18 % dos poços catalogados estão sem uso, apresentando-se parados, abandonados ou selados/tamponados. É importante destacar que poços abandonados que não estejam devidamente selados podem se tornar vetores de contaminação da água subterrânea. A Figura 21 apresenta os diferentes usos dos poços encontrados na área de estudo. Além disso, verificou-se que a maioria dos poços captam pequenas vazões, conforme demonstrado na Figura 22.

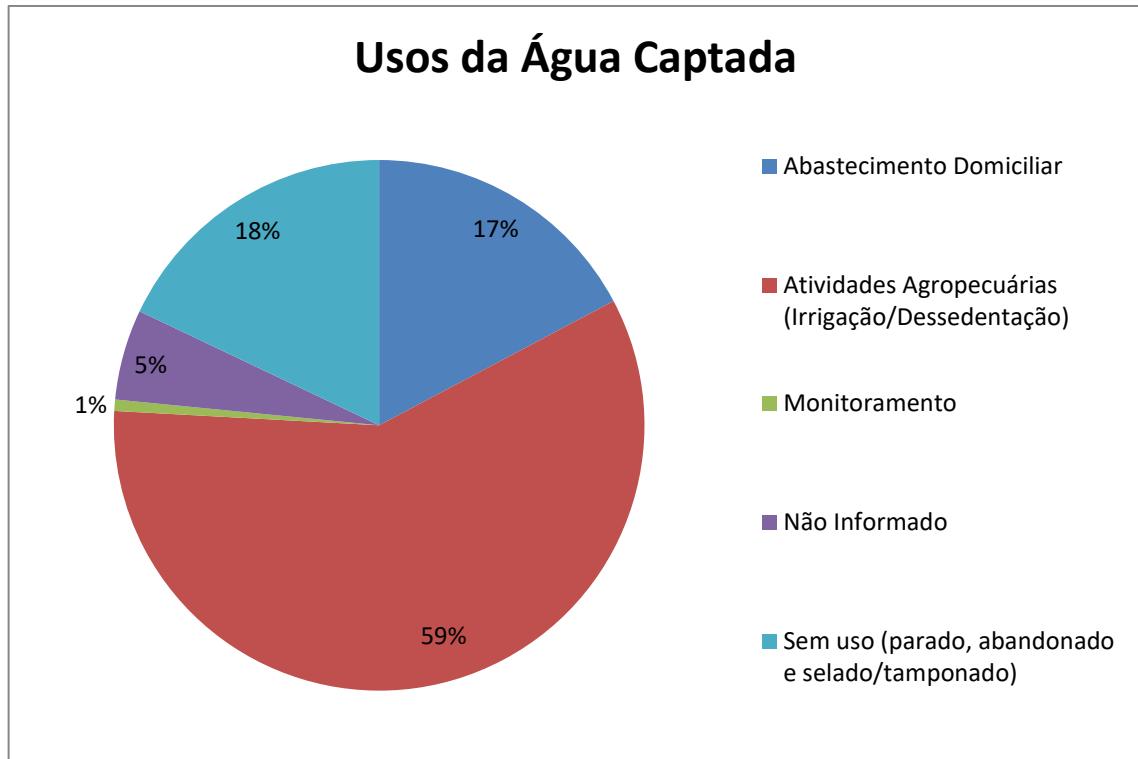


Figura 21 - Diferentes usos da água captada na região de estudo.

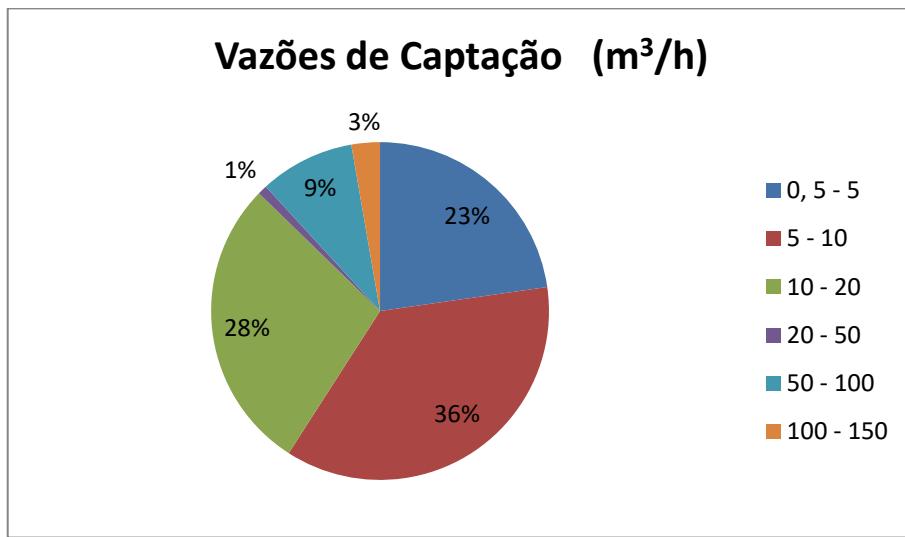


Figura 22 - Vazões captadas pelos poços catalogados.

Com base na análise dos perfis geológicos dos poços (Figura 24), observa-se que, no Perfil 1 (Figura 23), entre a superfície e a profundidades de aproximadamente 40 metros há ocorrência de camadas de areias finas, muito finas de coloração amarelada, cinza e cinza esverdeada intercaladas com camadas de areias siltosas e argilosas. Próximo ao litoral (perfil do poço 132), há uma diminuição da espessura dessas camadas. Entre 38 m (poço 133), 45m (poço 123), 39 m (poço 120) e 16 m (poço 132) há ocorrência de camadas argilosas que apresentam espessuras variáveis. Abaixo das camadas argilosas há nova ocorrência de camadas de areias finas, médias e grossas de coloração acinzentada. Com base nessa caracterização, pode-se interpretar que na região há ocorrência de aquíferos granulares livres a semi-confinados, localizados em camadas de sedimentos arenosos que foram depositados acima das camadas argilosas de maior espessura. Além disso, há aquíferos granulares confinados localizados nas camadas de areia depositadas abaixo das camadas argilosas.

Com base nas análises dos perfis geológicos (Figura 26), observa-se no Perfil 2 (Figura 25) a ocorrência de camadas de areia fina, muito fina de coloração clara intercaladas com camadas de areia argilosas, entre a superfície e as profundidades de 28 a 31 metros. Abaixo das camadas de areia, há ocorrência de camadas de argila e argila siltosa que apresentam espessuras variadas. Após as camadas argilosas (poço 134), observa-se a ocorrência de areia fina intercaladas com camadas de argila. Essa estratificação permite definir que acima das camadas argilosas há ocorrência de aquíferos granulares livres a semi-confinados localizados nas camadas de areias e que, abaixo das camadas argilosas ocorrem aquíferos granulares confinados. Essa caracterização é a mesma observada no Perfil 1, evidenciando que na área de estudo há ocorrência desses tipos de aquíferos.

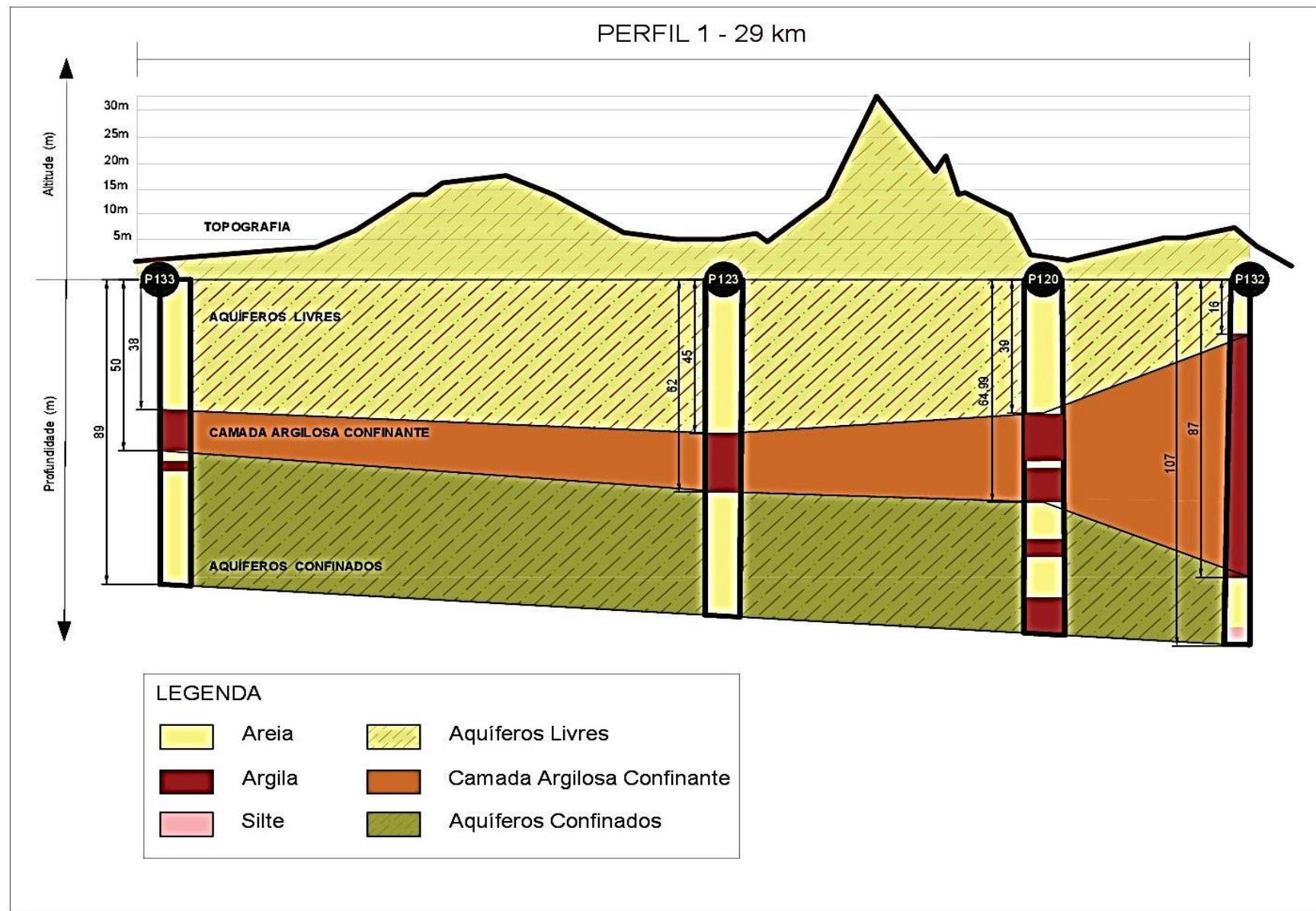


Figura 23 - Perfil hidroestratigráfico 1.

Perfis Geológicos e Construtivos dos Poços Tubulares Selecionados para a Seção Geológica I

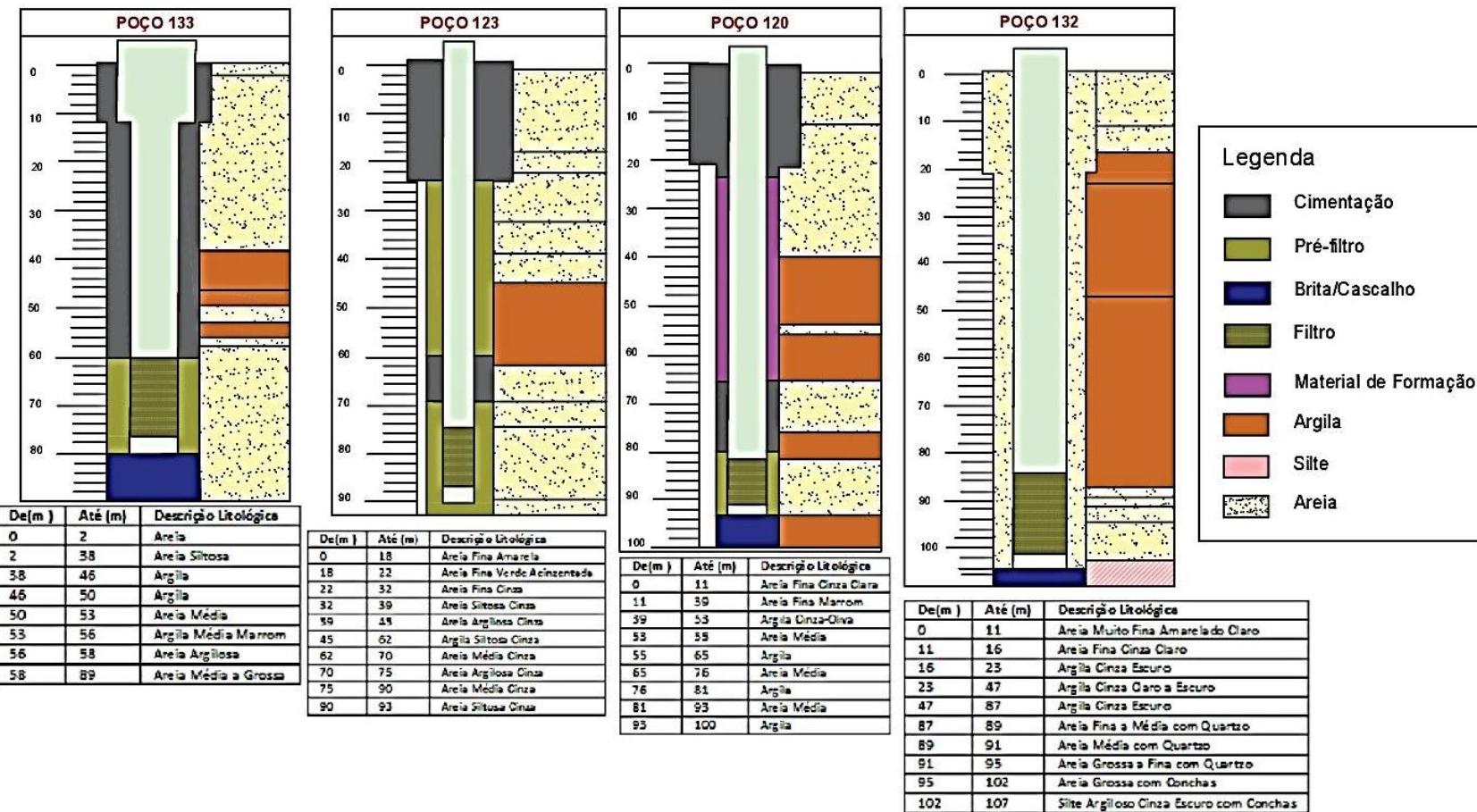


Figura 24 - Perfis geológicos e construtivos dos poços tubulares selecionados para seção geológica I.

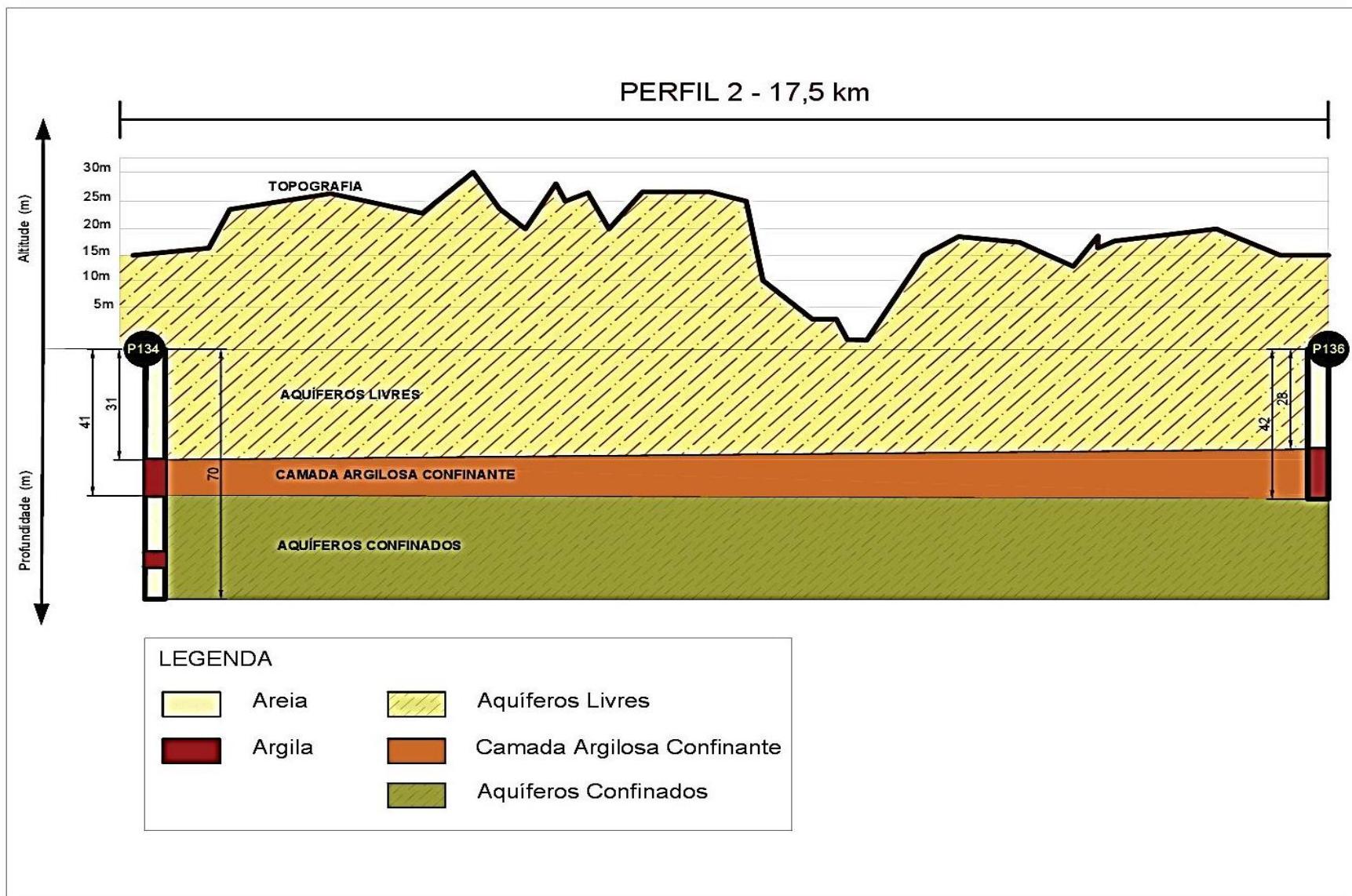


Figura 25 - Perfil hidroestratigráfico 2.

Perfis Geológicos e Construtivos dos Poços Tubulares Selecionados para a Seção Geológica II

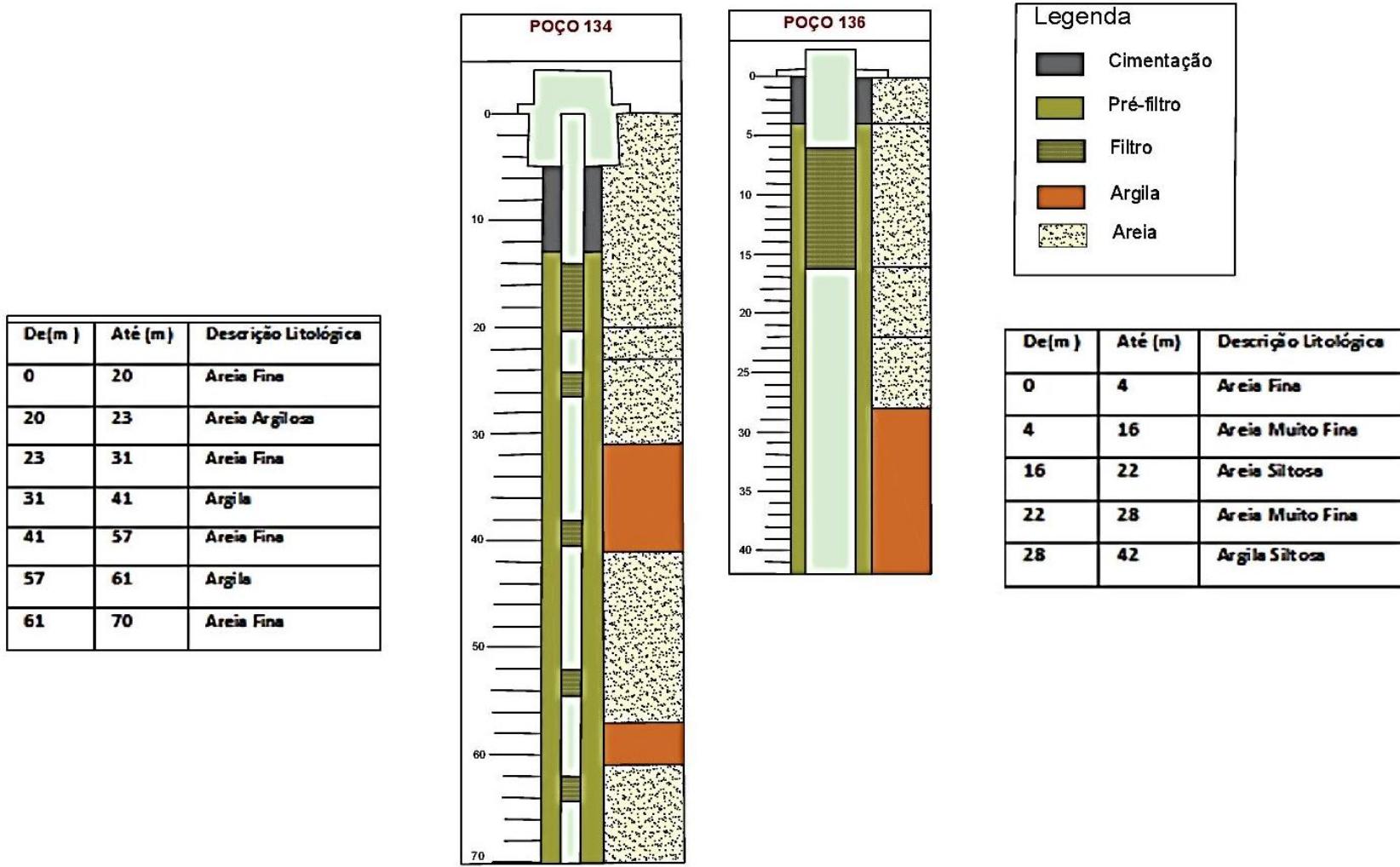


Figura 26 - Perfis geológicos e construtivos dos poços tubulares selecionados para seção geológica II.

4.3 AVALIAÇÃO DA VULNERABILIDADE

A avaliação de vulnerabilidade realizada, por meio da aplicação do método GOD, destinou-se a dois grupos de aquíferos, isto é, os aquíferos livres e os aquíferos confinados, os quais ocorrem separados pelas camadas de argila de maior espessura.

Em função disso os poços identificados na área de estudo foram avaliados procurando identificar o tipo de aquífero que estava sendo captado pelos mesmos. Com isso foi gerado um banco de dados de poços que captavam água dos aquíferos livres a semi-confinados (que ocorrem acima das camada de argila de maior espessura) e de poços que captavam água de aquíferos confinados (localizados abaixo da camada de argila).

4.3.1 PARÂMETRO G

O parâmetro G indica o grau de confinamento da água subterrânea. No caso dos aquíferos livres, os poços selecionados estão na categoria de não confinamento. Com relação aos poços do tipo ponteira, como não possuem o perfil construtivo e como possuem profundidades pequenas (profundidade média de 10 metros), para esses poços foi considerado o valor de 1,0, que representa o máximo grau de vulnerabilidade.

Já os poços tubulares que captam água dos aquíferos livres localizados acima da camada de argila confinante e que possuíam perfil geológico, tiveram diferentes valores para este parâmetro. A presença de diferentes camadas acima do ponto de captação e suas diferentes capacidades de contenção da água ou permeabilidades determinou variações no parâmetro G. Por exemplo, nos casos em que ocorriam intercalações de camadas de areia fina a média, determinou-se o valor de 0,9. Em pontos nos quais havia ocorrência de camadas de areia muito fina e fina, usou-se o peso de 0,8. Observa-se que quanto maior a permeabilidade de camadas intercaladas, maior o valor do parâmetro. Nos poços que apresentavam uma pequena camada de argila mais acima, aplicou-se o valor de 0,6, considerado como não confinado coberto na metodologia GOD.

No grupo de aquíferos confinados, a captação é realizada somente por poços tubulares, pois esses aquíferos ocorrem em maiores profundidades. Nesse caso, definiram-se valores entre 0,2 e 0,5, sendo que a distribuição dos pesos foi dada com base na análise do perfil geológico do poço e com base na profundidade de instalação dos filtros. Para os poços que

captam água somente de aquíferos localizados em camadas de areia situadas abaixo da camada principal de argila foi definido um peso de 0,2, que representa a categoria de confinamento. Por outro lado, em poços que ocorria captação dos aquíferos confinados e também dos livres, foi considerado como estando na categoria de semi-confinado, logo o peso utilizado foi de 0,4. Em poços que captam acima da principal camada de argila, porém há uma espessa camada de areia argilosa que passa a ser um aquitardo e consequentemente influencia no confinamento, usou-se o valor de 0,3 , que é intermediário a um aquífero confinado e semi-confinado. Nos poços que captam acima da camada argilosa principal, mas há uma camada de areia fina e silte que pode influenciar no confinamento, optou-se pelo valor de 0,5.

4.3.2 PARÂMETRO O

O parâmetro O representa a ocorrência de estratos de cobertura, isto é, característica litológica e grau de consolidação da zona vadosa ou camada confinante. Para os poços ponteira que captam água dos aquíferos livres verificou-se a localização de cada ponto, no mapa geológico, bem como foi identificado em qual tipo de depósito que estava associado a esse ponto e atribuído um peso, conforme apresentado na Tabela 2.

Tabela 2.Parâmetros O para diferentes litologias dos poços ponteiras.

Depósitos de Sedimentos	Valores do Parâmetro O
Depósitos Praiais e Eólicos	0,7
Depósitos de Crista e Praias Lagunares ou de Praias e Cristas Lagunares	0,6
Depósitos de Planície Lagunar	0,5
Depósitos Aluviais	0,7
Depósitos Deltaicos	0,5
Depósitos Eólicos e de Retrabalhamento Eólico	0,8
Turfas	0,4

Para os poços tubulares que captavam água dos aquíferos livres e que possuíam perfil geológico, foi avaliado o tipo de camadas de sedimentos existentes acima das zonas filtrantes. Com base nisso, foram definidos valores entre 0,4 e 0,7, dependendo da existência de

camadas de argila, silte, areia eólica ou aluvial. No caso dos poços selecionados para os aquíferos confinados, identificou-se a litologia da camada acima da principal camada argilosa confinante. Portanto, foram atribuídos os valores de 0,4 (presença de argila), 0,5 (presença de silte) e 0,6 (presença de areia eólica).

4.3.3 PARÂMETRO D

O parâmetro D representa a distância até o lençol freático ou o teto do aquífero confinado. Nesse caso, para os aquíferos livres, usou-se o nível estático da água de cada poço, a fim de determinar as faixas de valores para este parâmetro. Nos poços selecionados para os aquíferos livres, o parâmetro D foi 0,9 (profundidades do nível estático menores de 5m) ou 0,8 (profundidades do nível estático entre 5 e 20 m). Com relação aos poços que captam água dos aquíferos confinados, utilizou-se a profundidade do teto da camada argilosa confinante. Sendo que a mesma estava situada em diferentes profundidades entre 16 e 76m, os valores definidos para esses poços variaram entre 0,6 e 0,8.,

4.3.4 AVALIAÇÃO DA VULNERABILIDADE

Vários testes foram realizados para definir o interpolador a ser usado para a geração dos mapas de vulnerabilidade. Constatou-se que o interpolador “TIN“ e o “Vizinho Natural“ não seriam eficientes, levando em consideração a distribuição geométrica dos pontos, bem como o fato de não extrapolarem a área abrangida. O interpolador que leva em consideração o inverso da distância também foi testado para diferentes expoentes (valores entre 1 e 2), contudo não gerou um desenho orgânico entre os pontos interpolados, bem como resultou na formação de “olhos de boi“. Por isso, optou-se pelo uso do interpolador *Topo to Raster* do ArcGIS, o qual apresentou um desenho orgânico.

A fim de validar a utilização do interpolador *Topo to Raster*, foi realizado um teste de verificação usando os valores do parâmetro O dos pontos selecionados para os aquíferos livres, visto ser o universo com maior número de pontos e maior variabilidade. Para isso, gerou-se aleatoriamente no software ArcGIS uma amostra com 90 % dos pontos para realizar a interpolação, bem como se separou 10 % dos pontos restantes para se fazer a verificação. Compararam-se os valores interpolados com os valores reais nos pontos de verificação,

obtendo-se os resultados apresentados na Tabela 3. Obteve-se um erro relativo médio de 4,87%, considerado razoável para a quantidade de pontos disponíveis e sua distribuição geométrica.

Tabela 3. Validação do interpolador *Topo to Raster*.

Ponto	Parâmetro "O" Interpolado	Parâmetro "O" Real	Erro Relativo
1	0,695	0,700	-0,79%
2	0,672	0,500	25,62%
3	0,683	0,700	-2,44%
4	0,690	0,700	-1,46%
5	0,774	0,800	-3,34%
6	0,622	0,700	-12,62%
7	0,694	0,700	-0,86%
8	0,576	0,500	13,15%
9	0,697	0,700	-0,43%
10	0,597	0,500	16,28%
11	0,658	0,600	8,77%
12	0,466	0,400	14,08%
13	0,648	0,600	7,38%
Erro Relativo Médio do Interpolador "<i>Topo to Raster</i>"			4,87%

As Figuras 27, 28, 29, 30, 31 e 32 apresentam as interpolações para cada parâmetro do método GOD para os grupos de aquíferos estudados. As Figuras 33 e 34 apresentam a vulnerabilidade, gerada por álgebra de mapas no software ArcGIS. Cabe informar que os intervalos dos parâmetros e dos graus de vulnerabilidade dos mapas apresentados foram definidos com base no padrão do método GOD, a fim de facilitar o entendimento.

Também se obteve, no software ArcGIS, os percentuais em área relativos ao município, de cada classe de vulnerabilidade para cada grupo de aquíferos (Tabela 5 e Tabela 6). Apesar de todos os polígonos das classes de vulnerabilidade terem sido recortados pelo limite municipal do IBGE, constata-se uma pequena variação no somatório das áreas, que representa a área total do município, em função dos valores computados automaticamente pelo software utilizado. Considerou-se que essas variações de área são insignificantes para o propósito do trabalho.

Tabela 4. Classes de vulnerabilidade dos aquíferos livres e seus percentuais em área relativos ao município.

Vulnerabilidade dos Aquíferos Livres		
Classe	Área (hectares)	Percentual
Vulnerabilidade Média	14.633	15
Vulnerabilidade Alta	79.906	85
Total	94.539	100

Tabela 5. Classes de vulnerabilidade dos aquíferos confinados e seus percentuais em área relativos ao município.

Vulnerabilidade dos Aquíferos Confinados		
Classe	Área (hectares)	Percentual
Vulnerabilidade Insignificante	45.496	48
Vulnerabilidade Baixa	49.042	52
Total	94.538	100

Observou-se que os aquíferos livres do município de Palmares do Sul apresentam majoritariamente vulnerabilidade alta, ao passo que os aquíferos confinados apresentam vulnerabilidade baixa e insignificante. É importante entender que a interpolação de vulnerabilidade para os aquíferos confinados na região sul, na qual se obteve vulnerabilidade baixa, foi prejudicada em função da falta de pontos. Esse fato resultou numa linha divisória que não representa adequadamente a natureza da hidrogeologia local. Levando em consideração valores interpolados na região sul, os quais estão bem próximos da categoria insignificante, pode-se entender que os aquíferos confinados da área apresentam basicamente vulnerabilidade insignificante. A existência de mais dados, melhor distribuídos, geraria um resultado mais assertivo.

Observa-se que a maioria dos poços ponteiras do município, que captam água de aquíferos livres, está localizada em área de vulnerabilidade alta. Em contrapartida, a maioria dos poços tubulares, os quais captam de aquíferos confinados, está em áreas de vulnerabilidade insignificante (norte do município). Em função disso, constata-se que a água captada por poços tubulares da CORSAN apresenta sua qualidade mais protegida e garantida que a água captada por poços ponteiras de proprietários individuais.

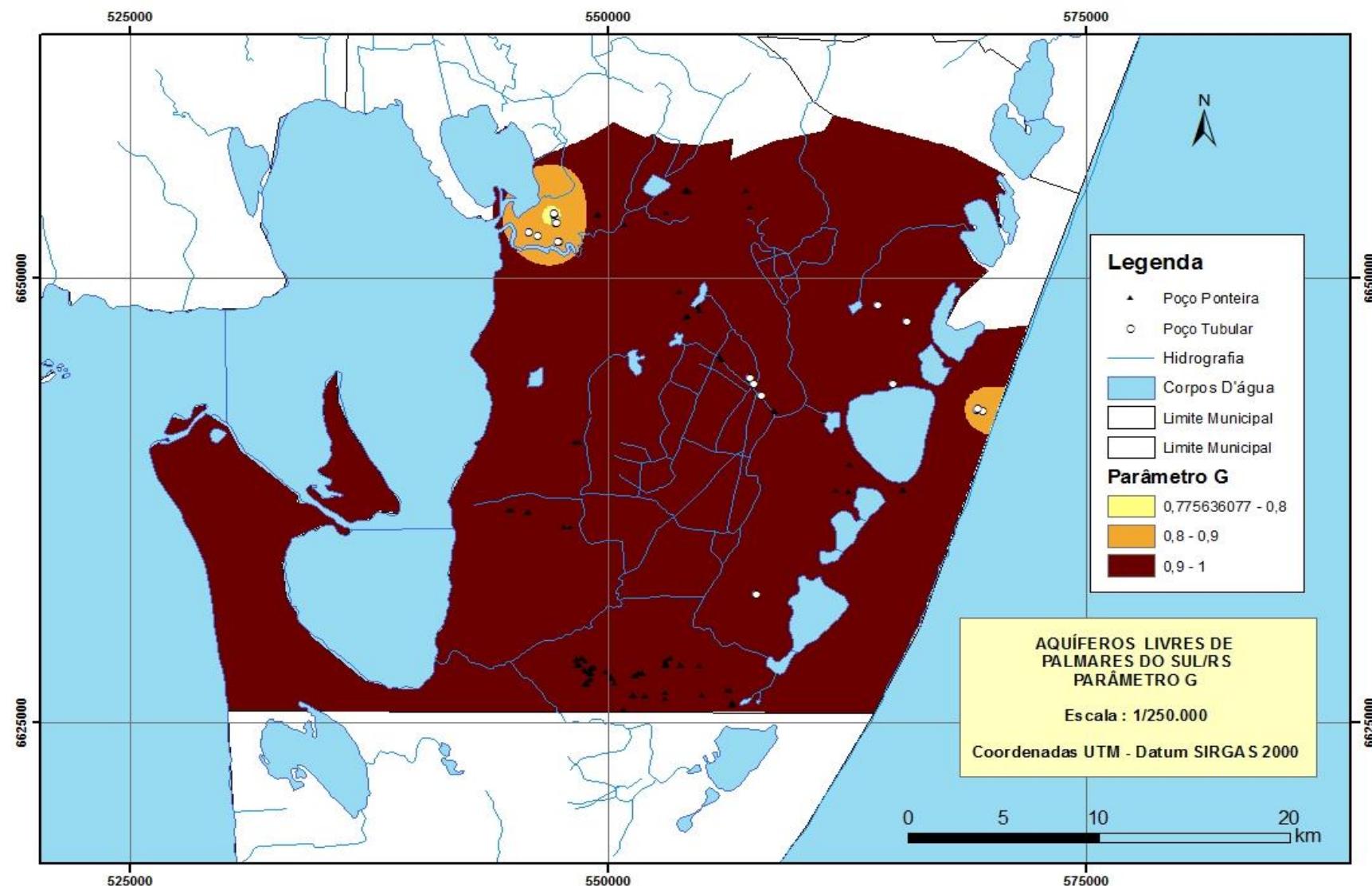


Figura 27 – Mapa do parâmetro G para aquíferos livres.

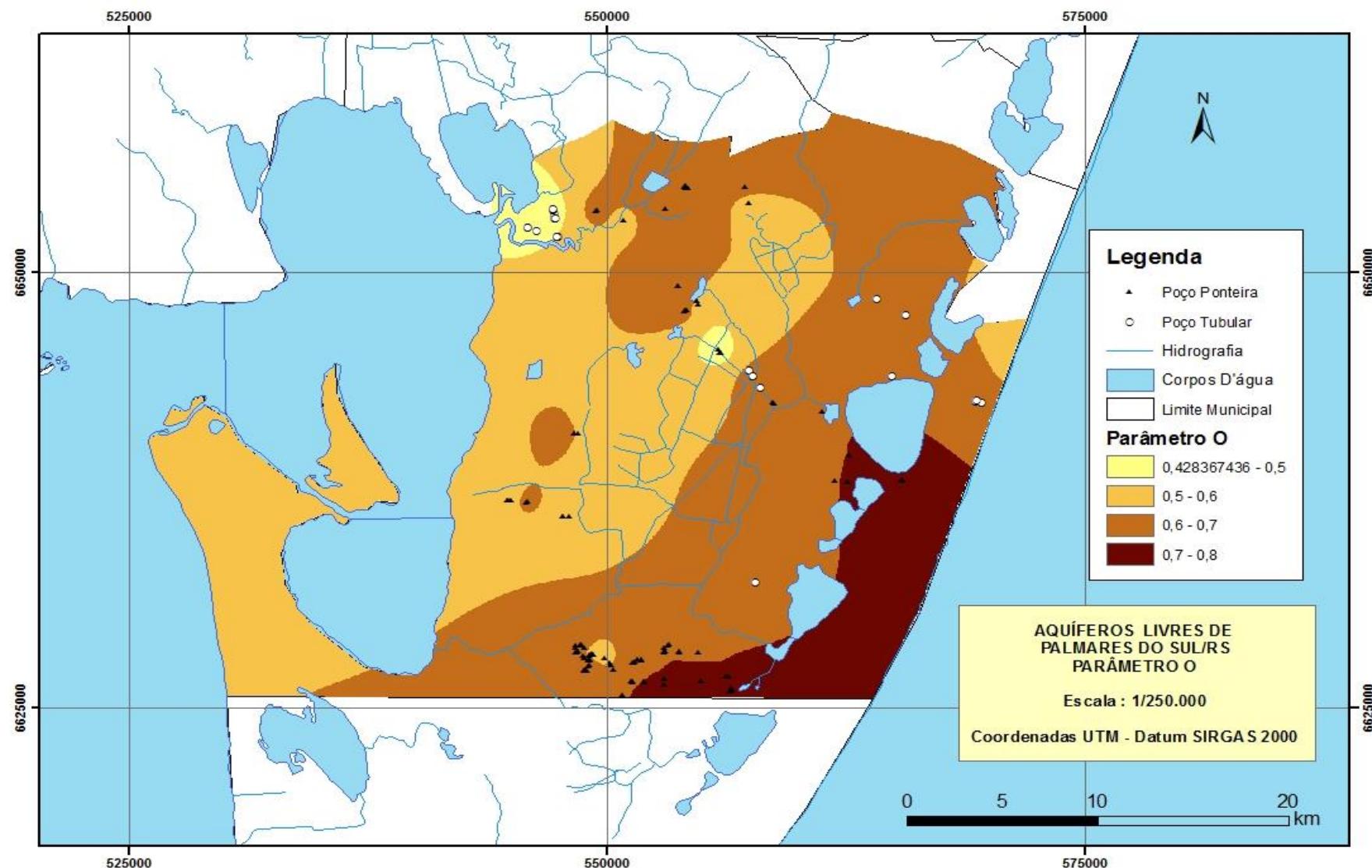


Figura 28 – Mapa do parâmetro O para aquíferos livres.

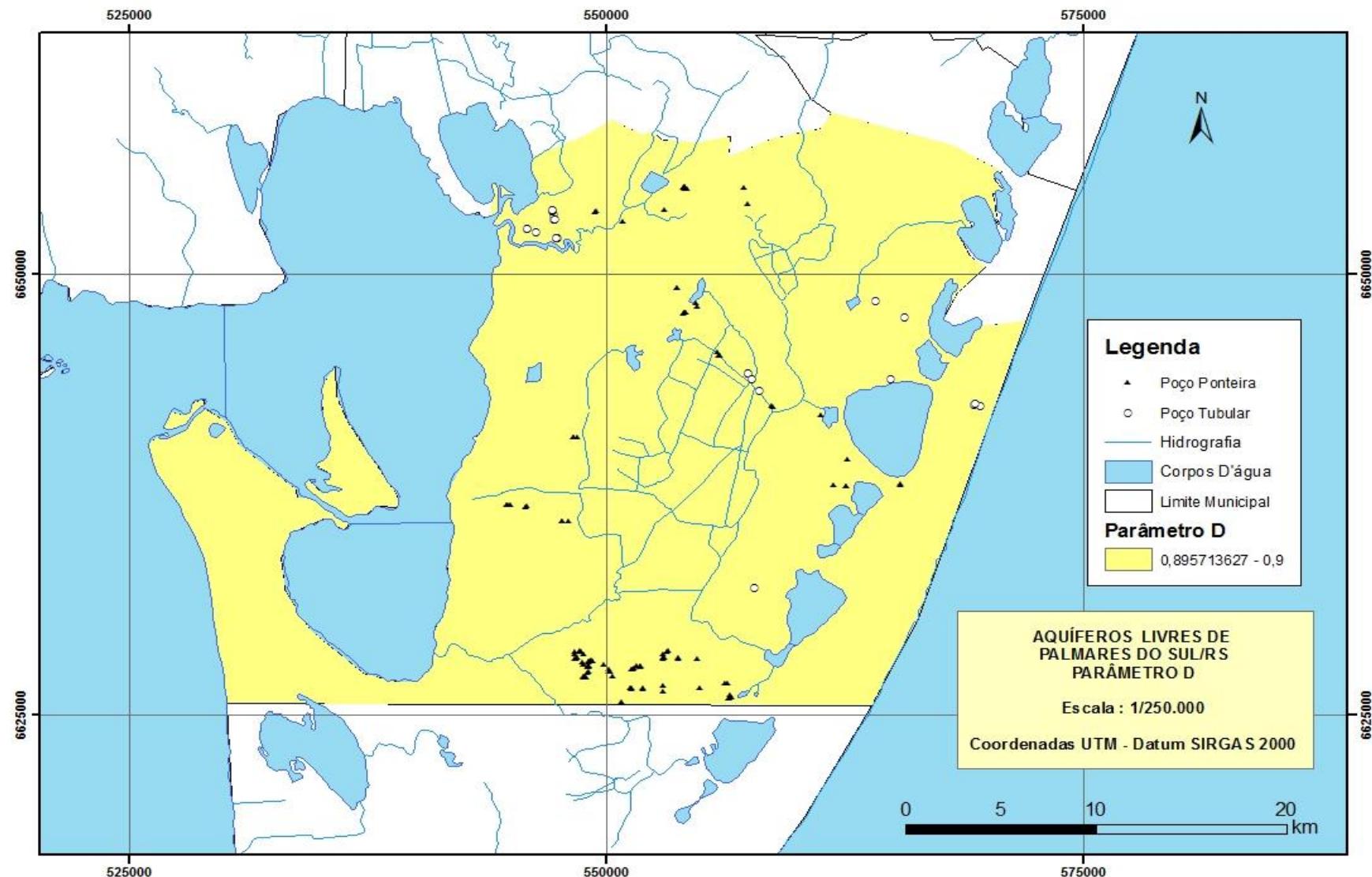


Figura 29 – Mapa do parâmetro D para aquíferos livres.

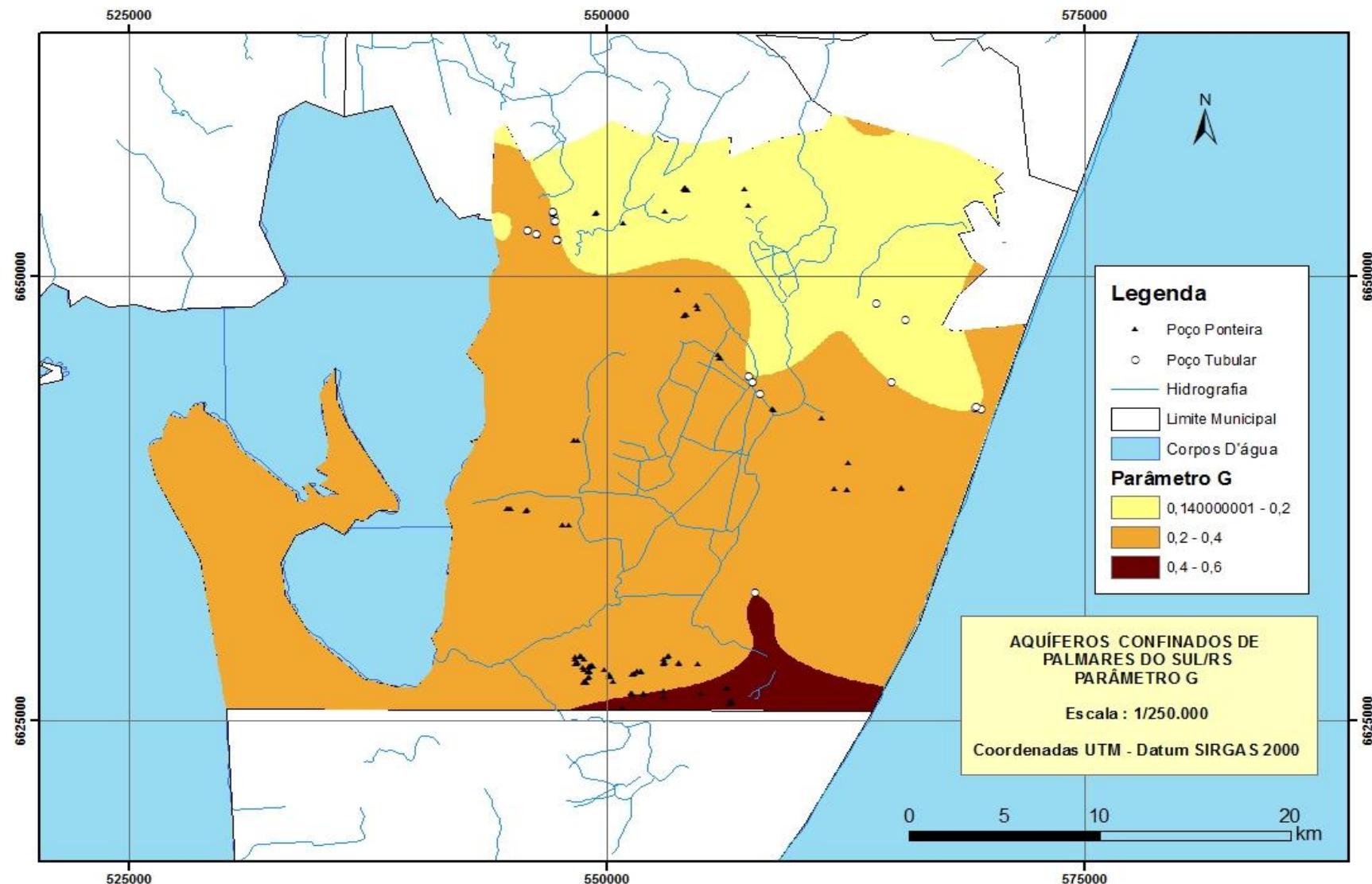


Figura 30 – Mapa do parâmetro G para aquíferos confinados.

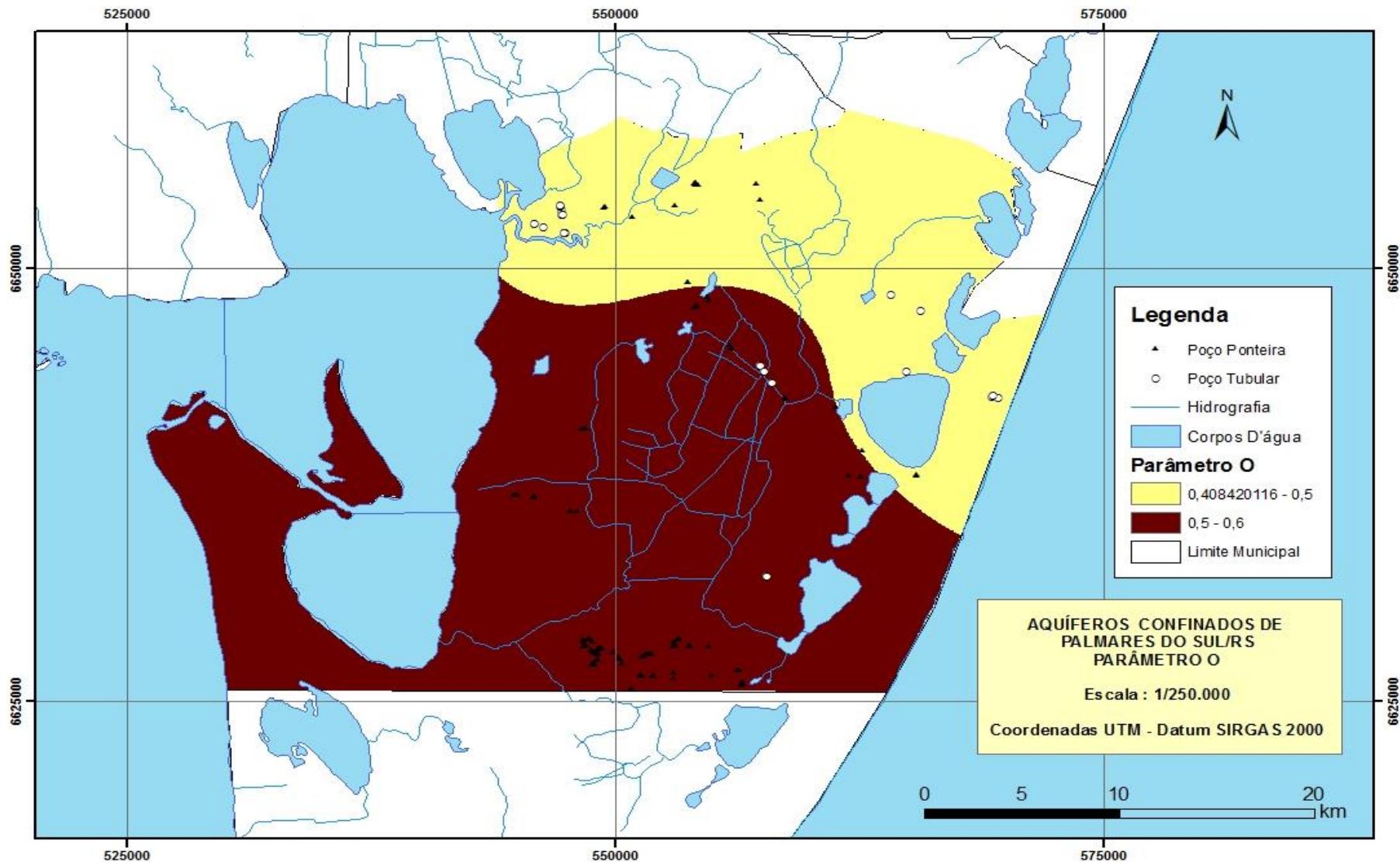


Figura 31 – Mapa do parâmetro O para aquíferos confinados.

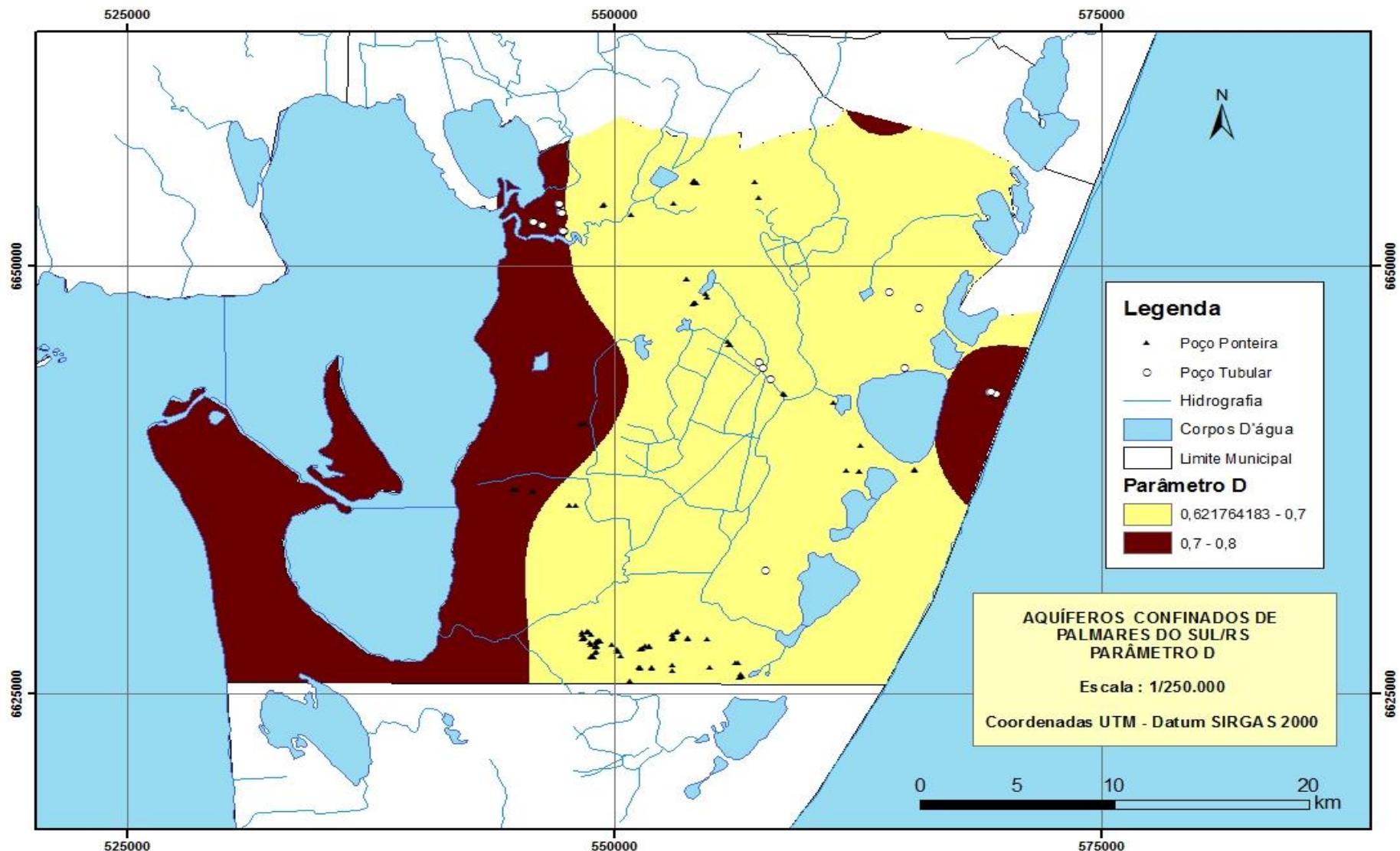


Figura 32 – Mapa do parâmetro D para aquíferos confinados.

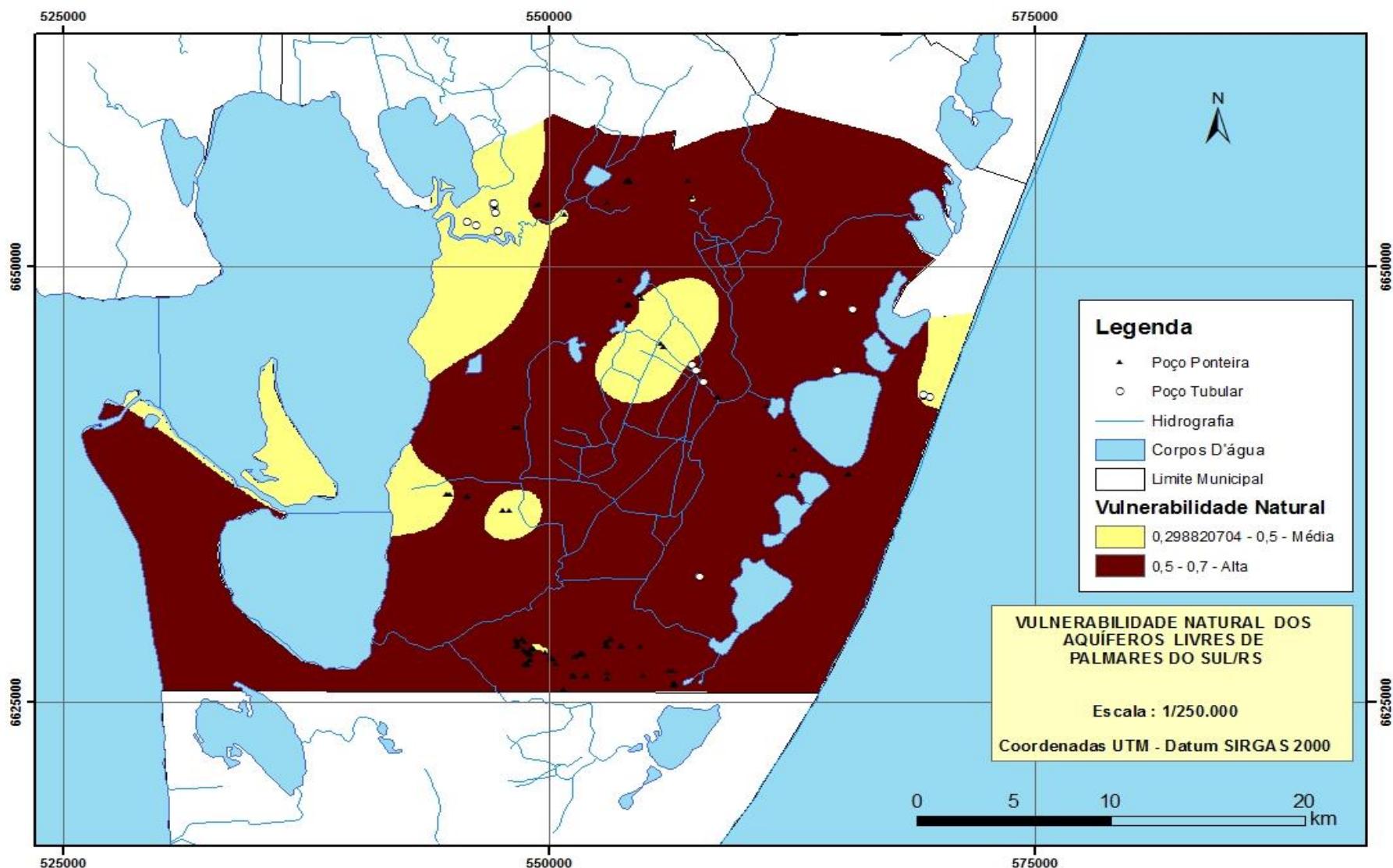


Figura 33 - Mapa de vulnerabilidade para aquíferos livres de Palmares do Sul/RS.

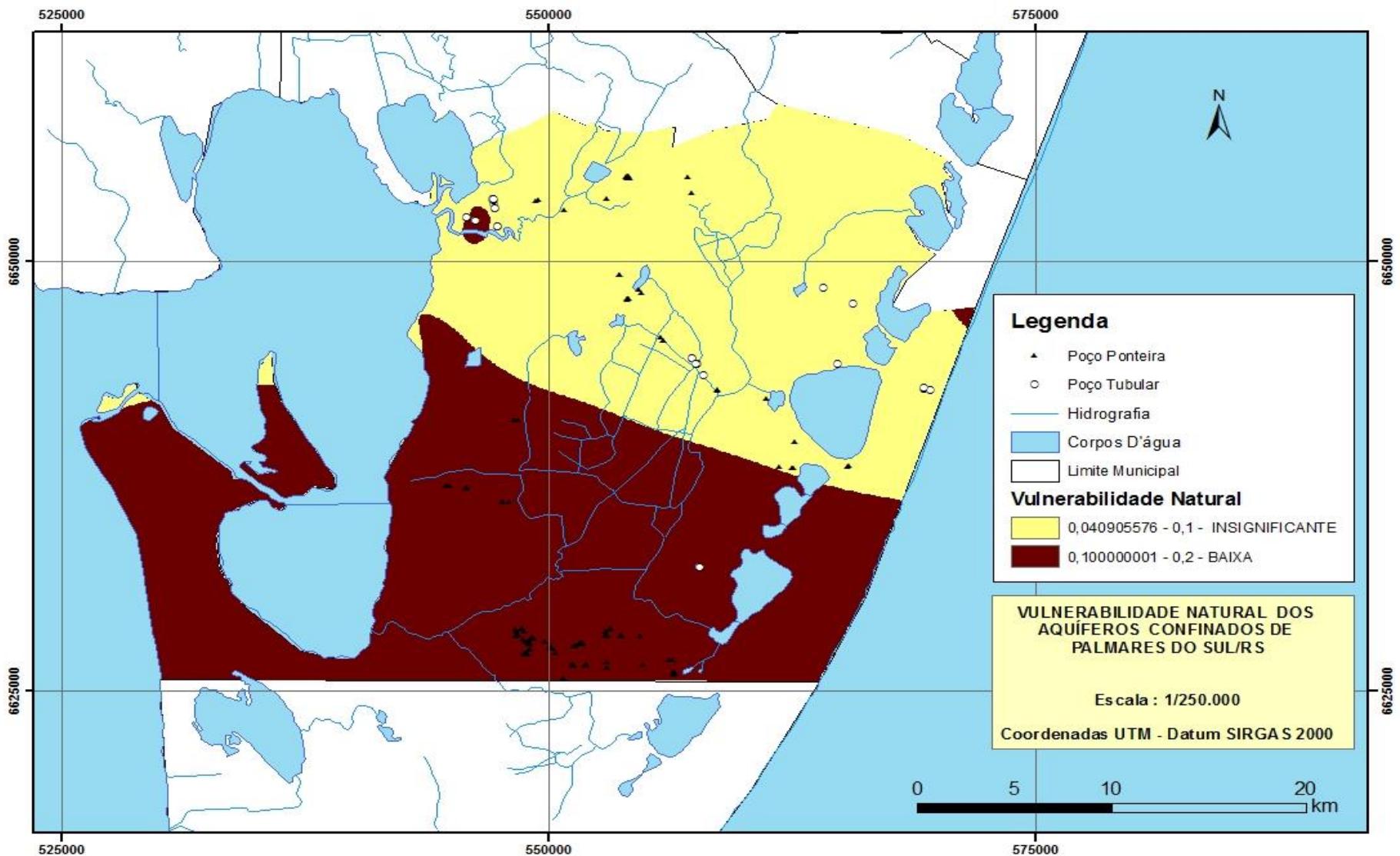


Figura 34 - Mapa de vulnerabilidade para aquíferos confinados de Palmares do Sul/RS.

4.4 ANÁLISE DO USO E OCUPAÇÃO DO SOLO E SUA RELAÇÃO COM A VULNERABILIDADE DOS AQUÍFEROS

Usando o software ArcGIS e o shapefile do IBGE (2004), escala 1/250.000, que apresenta o uso do solo na região , obteve-se as áreas para cada classe de uso do solo (Figura 35), presente no município de estudo (Tabela 4). A Figura 35 apresenta o uso do solo na região. As Figuras 36 e 37 apresentam o cruzamento da vulnerabilidade de cada grupo de aquíferos com o uso do solo na região.

Tabela 6.Uso do Solo no Município de Palmares do Sul.

Uso do Solo no Município de Palmares do Sul		
Classe	Área (hectares)	Percentual
Agricultura	33.113	35
Agropecuária	16.728	18
Corpos D'água	9.031	10
Dunas	5.881	6
Floresta Estacional Semi-decidual	1.049	1
Formações Pioneiras	16.679	18
Influência Urbana	603	1
Reflorestamento	11.415	12
Total	94.498	100

Observa-se que o município é ocupado majoritariamente por atividades agrícolas e agropecuárias (53 %), conforme Tabela 4. Poucas áreas apresentam influência urbana, de acordo com dados de 2004. Uma porção considerável (12 %) é ocupada por reflorestamento, atividade econômica importante no município, especialmente próximo a corpos d'água. Também nota-se que 6 % do município é ocupado por dunas (na costa do oceano Atlântico principalmente), bem como 18 % por formações vegetais pioneiras.

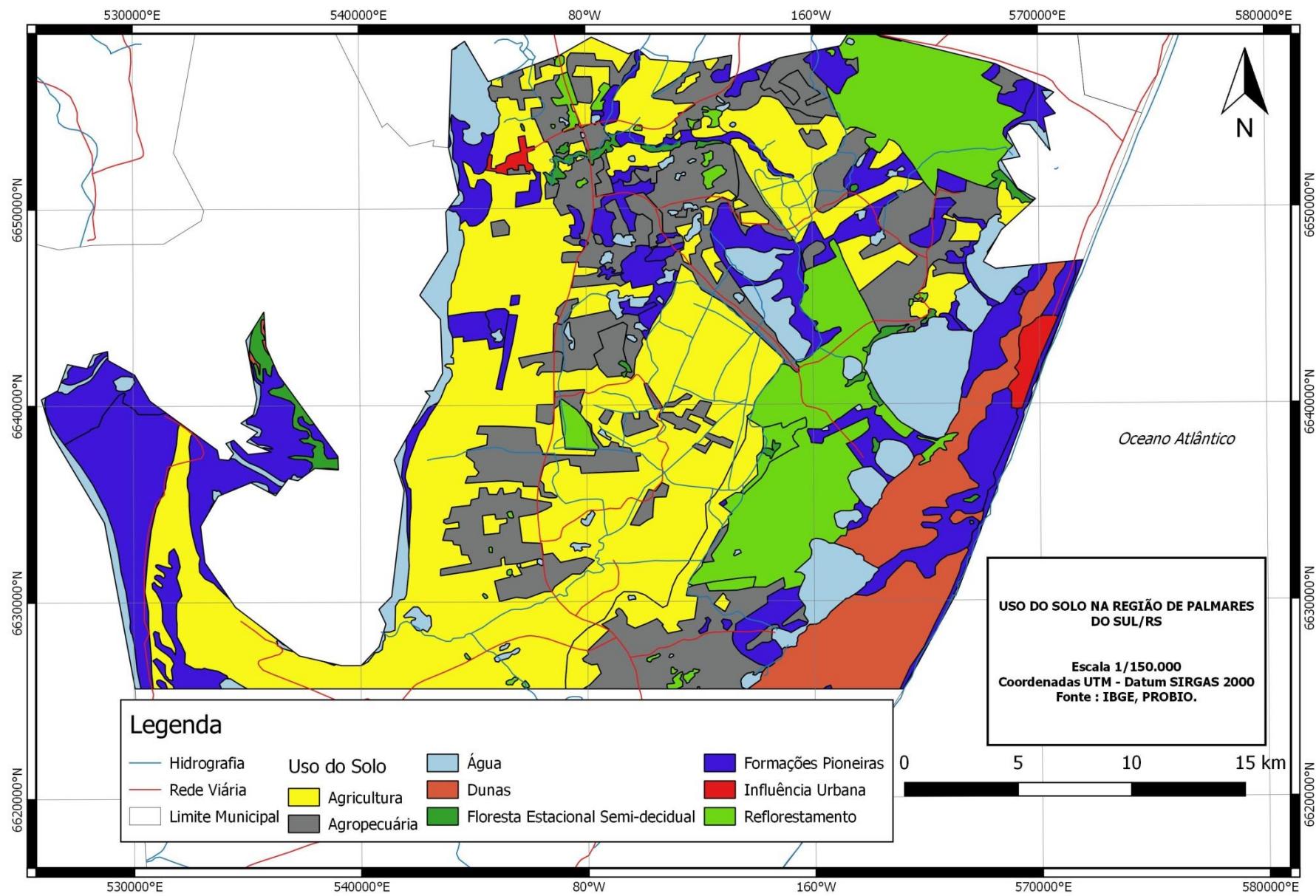


Figura 35 - Mapa de uso do solo de Palmares do Sul/RS

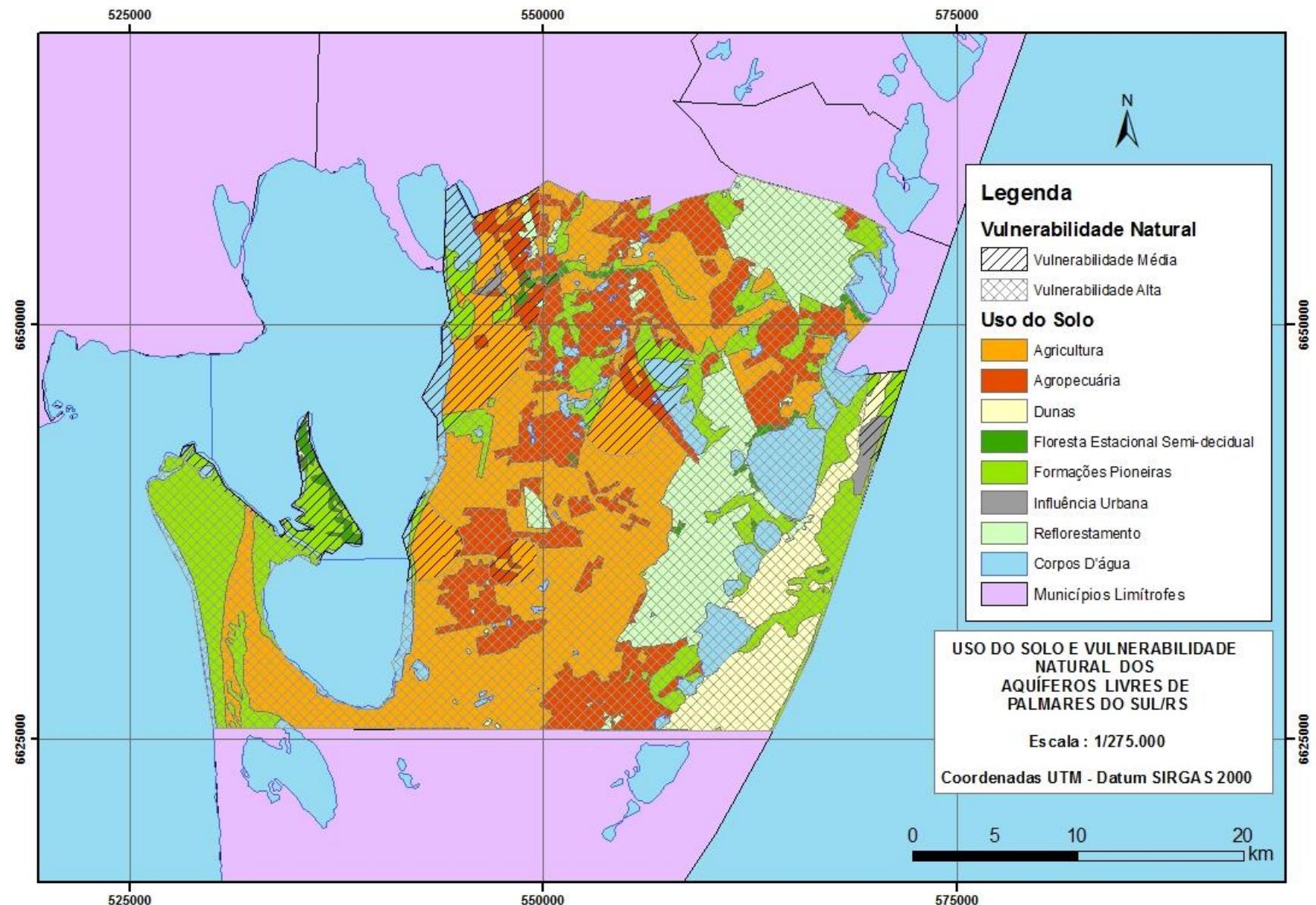


Figura 36 – Mapa de uso do solo e vulnerabilidade de aquíferos livres.

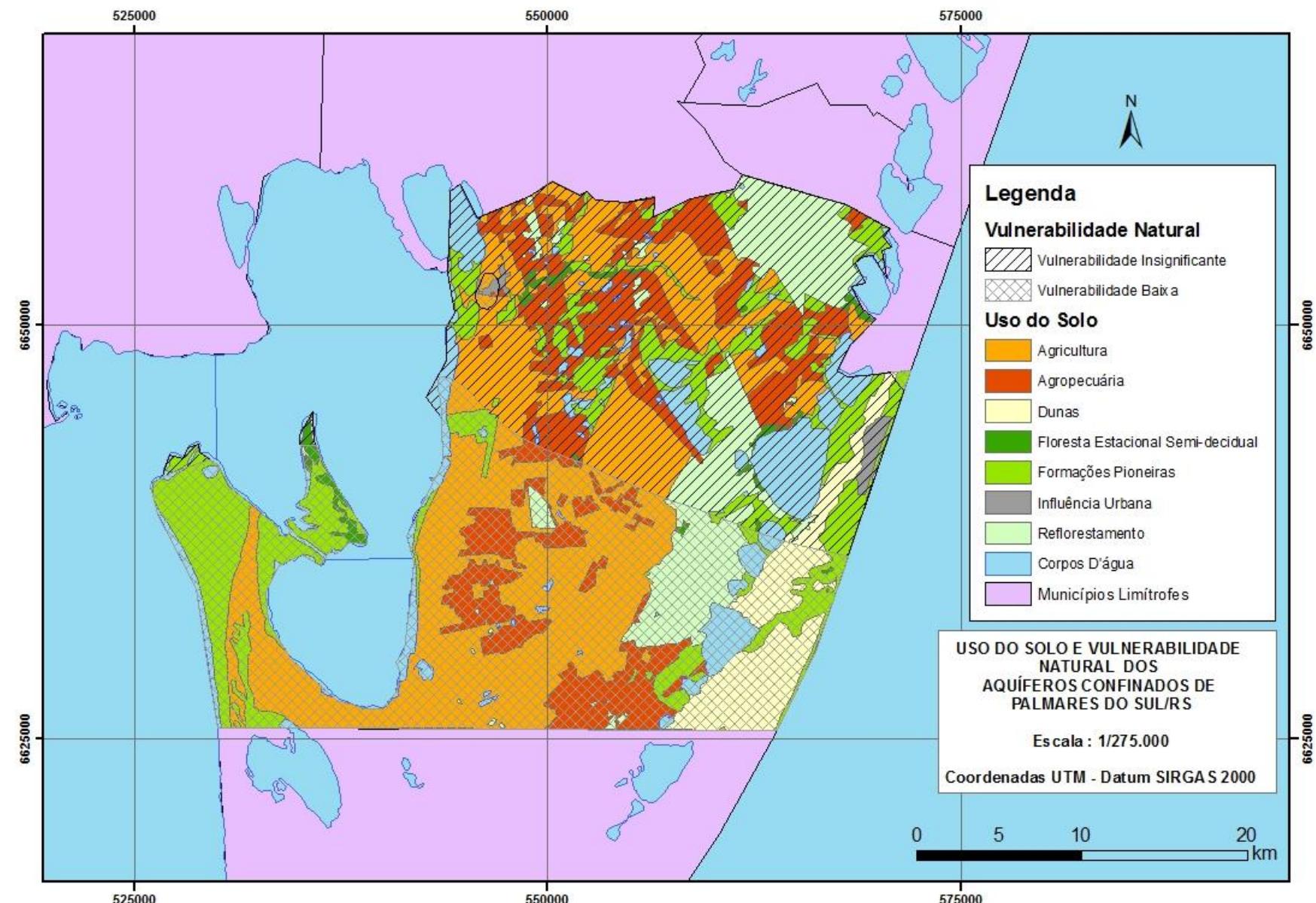


Figura 37 – Mapa de uso do solo e vulnerabilidade de aquíferos confinados.

Foram computadas as áreas em hectares e seus percentuais relativos para cada classe de uso do solo, dentro de cada categoria de vulnerabilidade natural dos aquíferos confinados e livres, no software ArcGIS. Os valores estão apresentados nas Tabela 7, 8, 9 e 10.

Tabela 7 - Classes de uso do solo e percentuais relativos de área na região de vulnerabilidade insignificante dos aquíferos confinados.

Aquíferos Confinados - Vulnerabilidade Insignificante		
Classe de Uso	Área (hectares)	Percentual
Agricultura	12.248	27
Agropecuária	9.972	22
Corpos D'água	5.744	13
Dunas	1.142	3
Floresta Estacional Semi-decidual	644	1
Formações Pioneiras	7.775	17
Influência Urbana	531	1
Reflorestamento	7.419	16
Total	45.475	100

Tabela 8 - Classes de uso do solo e percentuais relativos de área na região de vulnerabilidade baixa dos aquíferos confinados.

Aquíferos Confinados - Vulnerabilidade Baixa		
Classe de Uso	Área (hectares)	Percentual
Agricultura	20.862	43
Agropecuária	6.755	14
Corpos D'água	3.273	7
Dunas	4.739	10
Floresta Estacional Semi-decidual	405	1
Formações Pioneiras	8.896	18
Influência Urbana	71	0
Reflorestamento	3.996	8
Total	48.997	100

Tabela 9 - Classes de uso do solo e percentuais relativos de área na região de vulnerabilidade média dos aquíferos livres.

Aquíferos Livres - Vulnerabilidade Média		
Classe de Uso	Área (hectares)	Percentual
Agricultura	5.999	41
Agropecuária	1.795	12
Corpos D'água	2.141	15
Dunas	301	2
Floresta Estacional Semi-decidual	563	4
Formações Pioneiras	3.244	22
Influência Urbana	424	3
Reflorestamento	156	1
Total	14.624	100

Tabela 10 - Classes de uso do solo e percentuais relativos de área na região de vulnerabilidade alta dos aquíferos livres.

Aquíferos Livres - Vulnerabilidade Alta		
Classe de Uso	Área (hectares)	Percentual
Agricultura	27.111	34
Agropecuária	14.932	19
Corpos D'água	6.878	9
Dunas	5.580	7
Floresta Estacional Semi-decidual	486	1
Formações Pioneiras	13.429	17
Influência Urbana	179	0
Reflorestamento	11.259	14
Total	79.851	100

Cabe destacar que as áreas com maior vulnerabilidade natural, isto é, classe alta de vulnerabilidade, são ocupadas majoritariamente por agricultura, agropecuária e reflorestamento. Em função disso, ressalta-se o risco de poluição inerente a essas práticas, como contaminação por fertilizantes, agrotóxicos e matéria orgânica de origem animal. Essas atividades podem elevar os níveis de carbono, nitrogênio, fósforo e pesticidas da água subterrânea, representando risco à saúde da população que consome esse recurso.

Nota-se também que a maioria dos corpos d'água está localizada em áreas de vulnerabilidade alta dos aquíferos livres, próximos de áreas ocupadas por atividade de agropecuária, agricultura e reflorestamento. Esse fato nos mostra a importância do controle da qualidade da água superficial, a qual pode influenciar consideravelmente a qualidade da água subterrânea, especialmente de aquíferos livres.

É importante acrescentar que o mapeamento das áreas de maior vulnerabilidade natural dos aquíferos é uma importante ferramenta para a gestão do uso e ocupação do solo, bem como na tomada de decisões para a localização de poços de captação de água para abastecimento.

5 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

No município de Palmares do Sul a geologia é caracterizada por depósitos de sedimentos (areias, siltes, argilas e matéria orgânica) de origem eólica, lagunar, praial, marinho, deltaico, aluvial e paludal que estão associados aos Sistemas Laguna-Barreira II, III e IV. Com relação a hidrogeologia a região é caracterizada pela ocorrência do Sistema Aquífero Quaternário Costeiro I, sendo que com base na análise dos perfis dos poços foi possível identificar a ocorrência de aquíferos livres, semi-confinados e confinados. Como na região há ocorrência de camadas de argila de maior espessura e continuidade, localizadas em profundidades variáveis, dependendo da região, entre 16 e 45 metros, foi possível identificar que os aquíferos livres a semi-confinados ocorrem acima dessas camadas de argila e os aquíferos confinados abaixo.

Foram catalogados 145 poços na região de estudo, dos quais 117 são poços ponteiras e 28 são tubulares. Constatou-se que a água subterrânea tem grande importância para o município, sendo que a área urbana é abastecida por água subterrânea captada por poços tubulares de propriedade da CORSAN e na área rural o abastecimento é realizado por poços ponteiras que captam água de aquíferos livres a semi-confinados. Os usos da água subterrânea captada destinam-se basicamente ao abastecimento domiciliar e às atividades agropecuárias, das quais se destaca a irrigação. Cabe ressaltar que 18 % dos poços levantados estão sem uso, apresentando-se parados, abandonados ou selados/tamponados. É fundamental afirmar que poços abandonados que não estejam devidamente selados podem se tornar vetores de contaminação da água subterrânea.

Observou-se que o grupo de aquíferos livres do município de Palmares do Sul apresenta majoritariamente vulnerabilidade alta, ao passo que os aquíferos confinados apresentam vulnerabilidade baixa e insignificante. Constatou-se que a maioria dos poços ponteiras do município, os quais captam água dos aquíferos livres, estão localizados em área de vulnerabilidade alta. Por outro lado, a maioria dos poços tubulares, os quais captam água de aquíferos confinados, estão em áreas de vulnerabilidade natural insignificante (norte do município). Portanto, a qualidade da água subterrânea captada pelos poços tubulares da

CORSAN está mais protegida e garantida que a qualidade da água captada pelos poços ponteiras de proprietários individuais.

Deve-se destacar também que as áreas com maior vulnerabilidade natural são ocupadas majoritariamente por agricultura, agropecuária e reflorestamento. Por isso, ressalta-se o risco de poluição oriundo dessas práticas, como contaminação por fertilizantes, agrotóxicos e matéria orgânica de origem animal. Sabe-se que essas atividades podem elevar os níveis de carbono, nitrogênio, fósforo e pesticidas da água subterrânea.

Ressalta-se os riscos do uso da água captada por poços ponteiras, especialmente pelo fato de captarem em aquíferos de vulnerabilidade alta associados ao uso do solo por atividades com potencial poluidor. Sugere-se que mais estudos sejam feitos para dimensionar a população atendida por poços ponteiras, bem como analisar a qualidade da água fornecida a essas comunidades.

6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AHLERT, S.; REGINATO, P. A. R. **Utilização de geoprocessamento na avaliação da vulnerabilidade dos sistemas aquíferos Serra Geral e Guarani na região nordeste do estado do Rio Grande do Sul.** Anais XV Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto - SBSR, Curitiba, PR, Brasil, 30 de abril a 05 de maio de 2011, INPE p.5402.
- ALLER, L.; BENNET, T.; LEHR, J.H.; PETTY, R.; HACKETT, G. **DRASTIC: a standardized system for evaluating groundwater pollution potential using hydrogeologic settings.** US EPA, 1987. 600p.
- ANA (Agência Nacional de Águas). **Atlas Brasil: abastecimento urbano de água: panorama nacional.** Agência Nacional de Águas; Engecorps/Cobrape – Brasília : ANA : Engecorpos/ Cobrape, 2010. Volume 1.
- ANA (Agência Nacional de Águas). **Projeto Aquífero Guarani,** 2001.
- BOSCARDIN BORGHETTI, N. R.; BORGHETTI, J. R.; ROSA FILHO, E. F. **Aquífero Guarani: a verdadeira integração dos países do Mercosul.** Curitiba, 2004.
- BRITO, D. O. **Avaliação do perigo de contaminação da água subterrânea por fontes pontuais na macrozona círdica radiocêntrica de Porto Alegre, Rio Grande do Sul.** Porto Alegre, 2013.
- BROWN, L. **Queda dos lençóis freáticos.** : uma nova economia para a Terra, 2003.
- CABRAL, J.S.P.; LOBO FERREIRA, J.P.C.; MONTENEGRO, S.M.G.L.; COSTA, W.D. **Água Subterrânea: aquíferos costeiros e aluviões, vulnerabilidade e aproveitamento.** Tópicos Especiais em Recursos Hídricos. Vol. 4. Editora da Universidade Federal de Pernambuco, 2004. 447p.
- CARVALHO, D. F.; DA SILVA, L. D. B. **Hidrologia.** 2006.
- CEPIS (Centro Pan-Americano de Engenharia Sanitária e Ciências do Ambiente). **Capítulo I: a água para o século XXI no mundo e em nossa região,** 2000. Elaborado por Eloísa Tréllez Solís.
- CPRM (Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais – Serviço Geológico do Brasil) **Perspectivas do meio ambiente para o Brasil: uso do subsolo,** 2002.

CPRM. 2005. **Mapa hidrogeológico do estado do Rio Grande do Sul.** Rio de Janeiro.
CPRM. Escala 1:750.000.

CUTRIM, A.; CAMPOS, J. **Avaliação da vulnerabilidade e perigo à contaminação do aquífero Furnas na cidade de Rondonópolis (MT) com aplicação dos métodos GOD e POSH.**, 2011. Geociências, UNESP, São Paulo. V39, p. 401-411.

CUTRIM, A.O.; CAMPOS, J.E.G. **Avaliação da vulnerabilidade e perigo à contaminação do Aquífero Furnas na cidade de Rondonópolis (MT) com aplicação dos métodos GOD e POSH.** Geociências, UNESP, São Paulo. v.39, p. 401-411, 2010a.

DELGADO, C. D.; ANTÓN, D. **Séquia em um mundo de água**, 2002.

DILLENBURG, S. R.; TOMAZELLI, L.J.; MARTINS, L.R.; BARBOZA, E.G. **Modificações de longo período da linha de costa das barreiras costeiras do Rio Grande do Sul.** Centro de Estudos de Geologia Costeira e Oceanica – CECO/IG/UFRGS, 2005.

FERON, G. L.; REGINATO, P. A. R. **Avaliação da vulnerabilidade de aquíferos localizados na região central de Canoas – RS.** Águas Subterrâneas (2014) 28(2): 1-13.

FOSTER, S. e HIRATA, R. **Groundwater pollution risk evaluation:** the methodology using available. Lima: CEPIS/PAHO/WHO, 1998. 78p.

FOSTER, S.; HIRATA, R.; GOMES, D.; D'ELIA, M.; PARIS, M. **Proteção da qualidade da água subterrânea:** um guia para empresas de abastecimento de água, órgãos municipais e agências ambientais. Banco Internacional de Reconstrução e Desenvolvimento/ Banco Mundial, 2006.

FOSTER, S.S.D. (1987) **Fundamental concepts in aquifer vulnerability, pollution risk and protection strategy**, in W. van Duijvendijk and H.G. van Waegenen (eds.), Vulnerability of Soil and Groundwater to Pollution, Proceedings and Information No. 38 of the International Conference held in the Netherlands, in 1987, TNO Committee on Hydrological Research, Delft, The Netherlands.

FOSTER, S; ADAMS, B.; MORALES, M; TENJO, S. **Groundwater protection policy: a guide to requirements.** CEPIS Tech. Report. (WHO-PAHO-CEPIS), Lima, Perú, 1992.

FOSTER, S; HIRATA, R.; GOMES, D.; D'ELIA, M. E PARIS, M. **Groundwater Quality Protection: a guide for water utilities, municipal authorities, and environment agencies.** The World Bank. Washington, D. C., 103 pp., 2002.

FREITAS, M. B.; BRILHANTE, O. M.; ALMEIDA, L. M. **Importância da análise de água para a saúde pública em duas regiões do Estado do Rio de Janeiro: enfoque para coliformes fecais, nitrato e alumínio.** Cad. Saúde Pública, Rio de Janeiro, 17(3):651-660, mai-jun, 2001.

FUNDAJ (Fundação Joaquim Nabuco). **Águas doces no Brasil.** 2003.

GUIGUER, N.; KOHNKE, M. W. **Métodos para determinação da vulnerabilidade de Aquíferos.** XII Congresso Brasileiro de Águas Subterrâneas, 2002.

HIRATA, R. & REBOUÇAS, A. **La protección de los recursos hídricos subterráneos: Una visión integrada, baseada en perímetro de protección de pozos y vulnerabilidad de acuíferos.** Boletín Geológico y Minero. Instituto Tecnológico GeoMinero de España, 1999.

HIRATA, R.; CONICELLI. **Groundwater resources in Brazil: a review of possible impacts caused by climate change.** An. Acad. Bras. Ciênc. Vol.84. Rio de Janeiro June 2012 Epub May 24, 2012.

HUTCHINSON, M. F. **A new procedure for gridding elevation and stream line data with automatic removal of spurious pits.** Journal of Hydrology, v. 106, p. 211-232, 1989.

HUTCHINSON, M. F. **Calculation of hydrologically sound digital elevation models.** Proceedings, Third International Symposium on Spatial Data Handling, Sydney, Columbus: International Geographical Union, p. 117-133. 1988.

<http://www.abas.org>, visitado em 05 de agosto de 2016.

<http://www.cidades.ibge.gov.br/>, visitado em 20 de novembro de 2016.

<http://www.mma.gov.br/agua/recursos-hidricos>, visitado em 05 de agosto de 2016.

IBGE (Fundação Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística), 1994. **Dados sobre Domicílios no Estado do Rio de Janeiro.** Anuário Estatístico do Brasil, v. 54. Rio de Janeiro: IBGE.

LISBOA, N. A.; DANI, N; REMUS, M. V. D. CASTRO, J. **Síntese da ocorrência geológica das águas subterrâneas do Rio Grande do Sul.** XIII Congresso Brasileiro de Águas Subterrâneas, 2004.

LÖBLER, C. A.; SILVA, J. L. S. **Vulnerabilidade à contaminação das águas subterrâneas do município de Nova Palma, Rio Grande do Sul, Brasil.** Rev. Ambient. Água vol. 10 n. 1 Taubaté – Jan. / Mar. 2015.

MARQUEZAN, R. G. **Análise de recursos digitais como ferramentas de avaliação em ações de proteção de aquíferos no trajeto de oleodutos.** 184p. Tese (Doutorado) – Instituto de Pesquisas Hidráulicas, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2008.

MARTINS, L R. 1967. **Aspectos deposicionais e texturas de sedimentos praiais e eólicos da Planície Costeira do Rio Grande do Sul.** Publicação Especial da Escola de Geologia, UFRGS, Porto Alegre.

MEDEIROS, C. M.; RIBEIRO, M. M.; RUFINO, I.A. BARBOSA, D. L. **Mapeamento da vulnerabilidade de parte da Bacia Sedimentar do Baixo Curso do rio Paraíba utilizando o método GOD.** Anais XV Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto - SBSR, Curitiba, PR, Brasil, 30 de abril a 05 de maio de 2011, INPE p.3819.

MELO JÚNIOR, H. R. de. **Mapeamento da vulnerabilidade e análise de risco de contaminação como instrumentos de proteção das águas subterrâneas em áreas industriais: caso da ALBRÁS, Barcarena - PA.** 138 p. Dissertação (Mestrado) - Curso de Pós-graduação em Geologia e Geoquímica, Centro de Geociências, Universidade Federal do Pará, Belém, 2002.

MMA (Ministério de Meio Ambiente). **Plano Nacional de Recursos Hídricos.** Documento base de referência – minuta. Revisão. Secretaria Nacional de Recursos Hídricos e Agência Nacional da Águas. Brasília, DF, 2003.

PINHEIRO, R. J. B. RAUBER, A. C. C. R.; NUMMER, A. V.; SILVA, J. L. S. **Aplicação dos Métodos GOD e POSH para determinação da vulnerabilidade e perigo à contaminação dos aquíferos na cidade de Santa Maria/RS.** REGA, Porto Alegre – Vol. 12, no. 2, p. 61-79, jul./dez. 2015

REBOUÇAS, A. C. **Groundwater in Brazil.** Episodes, v. 11, p 209-214, 1988.

REBOUÇAS, A. C.; BRAGA, B.; TUNDISI, J. G. **Águas doces no Brasil: Capital ecológico, uso e conservação.** 2. Ed. Ver. E ampl. São Paulo: Escrituras, 2002.

REBOUÇAS, A.C.; BRAGA, B. ; TUNDISI, J.G. **Águas doces no Brasil: capital ecológico, uso e conservação.** São Paulo, Acad. Bras. Cien./IEA-USP, 1999.

REGINATO, P. A. R.; BRANCHER, L.; SCHAFER, A. E.; LANZER, R. M. Água subterrânea utilizada para irrigação na planície costeira do rio grande do sul e seu risco a salinização. I International Congresso on Susurface Environment, 2009.

REGINATO, P. A. R.; BRANCHER, L.; SCHAFER, A. E.; LANZER, R. M. Poços como vetores de contaminação: o caso dos aquíferos da planície costeira do Rio Grande do Sul. XV Congresso Brasileiro de Águas Subterrâneas, 2008.

Reginato, P. A. R.; Michalski, E. Z. . . Águas Subterrâneas Na Região Do Balneário Pinhal, Cidreira E Palmares Do Sul. In: LANZER, ROSANE; SCHÄFER, ALOIS; JAHN, MATEUS P.. (Org.). Gestão Dos Recursos Hídricos Dos Municípios De Cidreira, Balneário Pinhal E Palmares Do Sul: Recursos Hídricos E Toxicologia. 1 Ed. Caxias Do Sul, 2013, V. 1, P. 38-72

ROISENBERG, D. S.; ANGHINONI, I; FREITAS, M. A.; MACHADO, J. L. Os recursos hídricos subterrâneos no Rio Grande do Sul: uma visão sobre a saúde das águas e suas implicações na saúde das populações. 2008.

SAMPAT, P. Expondo a poluição freática. In>: WORLDWATCH INSTITUTE **Estado do Mundo**: 2001.

SILVA, A. L. M. S. Águas subterrâneas: critérios em seu uso. Fórum Internacional da Águas, 2003.

TOMAZELLI, L. J. & VILLWOCK, J. A. 2000. O Cenozoico no Rio Grande do Sul: Geologia da Planície Costeira. In: Holz, M. & De Ros, L. F. eds. Geologia do Rio Grande do Sul. Edição CIGO/UFRGS, Porto Alegre, p. 375-406.

TOMAZELLI, L. J. E VILLWOCK, J. A. Mapeamento Geológico de Planícies Costeiras: O Exemplo da Costa do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, 2005.

TOMAZELLI, L. J.; VILLWOCK, J. A. O Cenozóico no Rio Grande do Sul: geologia da planície costeira. 1996.

TOMAZELLI, L.J. e VILLWOCK, J. A. 1991. Geologia do sistema lagunar holocênico do Litoral Norte do Rio Grande do Sul. Pesquisas, 18 (1):13-24.

TRAVESSAS, F. A.; DILLENBURG, S. R.; CLEROT, L. C. P. **Estratigrafia e evolução da Barreira Holocênica do Rio Grande do Sul no trecho Tramandaí-Cidreira.** Boletim Paranaense de Geociências, n. 57, p. 57-73, 2005. Editora UFPR.

TROIAN, G. C.; GOFFERMANN, M.; FREITAS, M. A. **Monitoramento qual-quantitativo do aquífero costeiro no litoral norte do estado do Rio Grande Do Sul.** XVIII Congresso Brasileiro de Águas Subterrâneas, Belo Horizonte, Minas Gerais, Brasil, 14 a 17 de outubro de 2014.

UNESCO. **Programa hidrológico internacional.** Paris, Relatório técnico, 1998, 240 p..

VARGAS, T. **Transferência de elementos maiores, traços e elementos de terras raras no sistema fertilizante – solo- água subterrânea em sedimentos quaternários nas região de Águas Claras, município de Viamão, RS.** 2010.

VILLWOCK, J.A.; TOMAZELLI, L.J. 1995. **Geologia Costeira do Rio Grande do Sul.** Notas Técnicas do CECO-IG-UFRGS, Porto Alegre 8:1-45.

VRBA, J., ZAPOROZEC, **Guidebook on mapping groundwater vulnerability,** IAH publication 16, 1994, 131pg, Hannover, Alemanha.

WREGE, M. Termos hidrogeológicos básicos. **Caderno Técnico ABAS.** São Paulo, 1997.