

UNIVERSIDADE DO VALE DO RIO DOS SINOS – UNISINOS
UNIDADE ACADÊMICA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM GEOLOGIA
NÍVEL MESTRADO

DANIEL WOJAHN

PARÂMETROS HIDROGEOLÓGICOS DO SISTEMA AQUÍFERO GUARANI NA
SUB-BACIA DO ARROIO PORTÃO/RS.

SÃO LEOPOLDO
2011

Daniel Wojahn

PARÂMETROS HIDROGEOLÓGICOS DO SISTEMA AQUÍFERO GUARANI NA
SUB-BACIA DO ARROIO PORTÃO/RS.

Dissertação apresentada como requisito parcial
para a obtenção do título de Mestre, pelo
Programa de Pós-Graduação em Geologia da
Universidade do Vale do Rio dos Sinos –
UNISINOS

Área de atuação: Geologia Sedimentar

Orientador: Dr. Osmar Gustavo Wöhl Coelho
Co-orientador: Dr. Ernesto Luiz Correa Lavina

São Leopoldo
2011

W847p Wojahn, Daniel.
 Parâmetros hidrogeológicos do Sistema Aquífero
 Guarani na sub-bacia do Arroio Portão/RS / por Daniel
 Wojahn. – 2011.
 125 f.: il. ; 30 cm.

 Dissertação (mestrado) — Universidade do Vale do
 Rio dos Sinos, Programa de Pós-Graduação em Geologia,
 São Leopoldo, RS, 2011.

 “Orientação: Prof. Dr. Osmar Gustavo Wöhl Coelho ;
 co-orientação: Prof. Dr. Ernesto Luiz Correa Lavina”.

 1. Hidrologia. 2. Aquífero Guarani. I. Título.

 CDU: **556.33**

 Catalogação na Publicação:
 Bibliotecária Fabiane Pacheco Martino - CRB 10/1256

Dedicatória

Dedico este trabalho a todas as pessoas que eu amo de coração, principalmente a minha família: minha esposa, *Daniela Campani Wojahn*, meu pai, *Rubem Wojahn*, minha mãe, *Margaret Fensterseifer Wojahn*, e minha irmã, *Sarah Wojahn*.

Não posso deixar de dedicar a todos que me ajudaram durante estes dois anos de estudo, que consegui terminar graças à vontade de DEUS, que me deu oportunidade de transpor mais uma etapa desta vida com muita saúde.

Agradecimentos

Agradeço a DEUS e à FAMÍLIA a oportunidade de poder concretizar este trabalho.

Ao DAGEO (Diretório Acadêmico de Geologia), por ser um local onde pude realizar com meus colegas que cito logo a seguir momentos de confraternização: Celso, Leandro, Claus, Joice, Luciana, João, Ronaldo e todos os outros colegas que aqui não cito para não me estender muito.

Ao meu orientador, Dr. Osmar Gustavo Wöhl Coelho, pela instrução para o desenvolvimento e o término deste trabalho.

Ao co-orientador, Dr. Ernesto Luiz Correa Lavina, pelos ensinamentos em campo e na universidade.

Aos professores Dr. Francisco M. W. Tognoli e Dr. Wilson Wildner, pela revisão das descrições das lâminas petrográficas.

Aos amigos e amigas que colaboraram na aquisição dos dados para o trabalho, Kellen Muradás, Roberta Campani Diedrich, Cássio Roberto Fink, Daiana Campani de Castilhos, Marines Oliveira, Rogério Aguirre Dias e Adriano.

Ao apoio técnico encontrado no LASERCA (Laboratório de Sensoriamento e Cartografia Digital), onde pude contar com os ensinamentos dos amigos Luiz Felipe Nascimento, Marcos Turani e Andre Tauchert.

Ao Laboratório de Laminação Petrográfica da Unisinos pela confecção das lâminas petrográficas.

À CAPES, pois através de uma bolsa PROSUP foi possível completar meus estudos de mestrado.

À Unisinos (Universidade do Vale do Rio dos Sinos).

“Escreve na areia aquilo que dás, grava sobre a rocha o que recebes.”

Resumo

O comportamento da porosidade e da permeabilidade das litologias constituintes do Sistema Aquífero Guarani (SAG) está diretamente condicionado pelas suas características físicas e mineralógicas, estruturas internas, fraturas e falhamentos. O presente estudo analisa a permo-porosidade dos arenitos pertencentes ao SAG na sub-bacia do Arroio Portão, nos municípios de Portão e Estância Velha/RS. Com este objetivo, foi executado o mapeamento geológico da área em escala 1:50.000. Foram elaboradas seções geológicas, análises de paleocorrentes e lineamentos tectônicos, descrições petrográficas e análises granulométricas. Além disso, foram determinadas as porosidades total e efetiva e a permeabilidade a carga constante em amostras de arenitos coerentes e friáveis das formações Pirambóia e Botucatu. Os resultados permitiram identificar variações de intensidade e natureza do material cimentante dos arenitos, verificando-se a ocorrência de cimentação carbonática, silicosa, ferruginosa e caulínica. A caulinitização dos feldspatos é um processo relevante nessas litologias por alterar a sua porosidade e sua permeabilidade originais. O SAG na área de estudo apresentou anisotropia, pois a porosidade e permeabilidade ocorrem com uma distribuição espacial heterogênea, sendo seus valores obtidos através de equações estimadoras estabelecidas por correlação estatística com a fração fina (argila+silte). Os valores estimados indicam permeabilidades da ordem de $2,32 \times 10^{-5}$ cm/s e $3,53 \times 10^{-4}$ cm/s para os aquíferos Pirambóia e Botucatu, o que os caracteriza como aquíferos pobres com alguma impermeabilidade. Entretanto, verifica-se um significativo aumento dos valores da permeabilidade e da porosidade nas proximidades dos lineamentos tectônicos, indicando um condicionamento estrutural sobre as características hidrogeológicas e o próprio fluxo subterrâneo do SAG. Para futuros modelos de fluxo, planejamento e proteção do aquífero nesta região, recomenda-se, com base nas características da fração fina (argila+silte) dos arenitos e na proximidade dos lineamentos tectônicos, utilizar diferentes valores de porosidade e permeabilidade para as rochas constituintes do SAG.

Abstract

The porosity and permeability behaviors of the Guarani Aquifer System (SAG) lithologies are linked directly to its physical and mineralogical characteristics, internal structures, fractures and faults. The permo-porosity of SAG sandstones in the Arroio Portão catchment, which is located in Portão and Estância Velha/RS municipalities, is here analyzed. Therefore, it was carried out a geological mapping 1:50.000, as well geological sections, petrographic descriptions, grain size, paleocurrents and tectonic lineaments analysis. Moreover, the total and effective porosities of the coherent and friable sandstones of Botucatu and Pirambóia formations were assessed by saturation and drying tests. The sandstone permeability was measured by constant load permeability tests. The outworked findings allowed the identification of sandstone cementing nature and intensity. As cementing materials were found carbonate, siliceous, iron oxides and kaolinite. The kaolinization of feldspar is an important process in these lithologies, modifying its original porosity and permeability. The SAG appears to be anisotropic, following the eolian paleocurrents patterns. So far, the porosity and permeability occurs with a heterogeneous spatial distribution. Predicting equations, established by statistical correlation with the clay and silt fractions, were used to estimate porosity and permeability values. In this way, permeabilities around $2,32 \times 10^{-5}$ cm/s and $3,53 \times 10^{-4}$ cm/s were found Pirambóia and Botucatu aquifers, characterizing the sandstones as poor aquifers with some impermeability. Analysing geological constraints, increasing permeability and porosity values were found nearby the tectonic lineaments, indicating a structural influence on SAG's hydrogeological characteristics and its groundwater flow system. Finally, in order to build flow models, as well to design aquifer planning and protection schemes, estimated values of rock porosity and permeability should be considered. The estimation of these hydrogeological parameters, mainly near structural lineaments, should be done based on the clay + silt fraction of sandstones.

Índice de ilustrações

CAPÍTULO 2

- Figura 01 – Desenho esquemático comparando grãos de uma amostra de quartzo com porosidade primária (A) com muitos espaços porosos X porosidade secundária (B), onde a mesma amostra passou por processos diagenéticos onde foi precipitado um cimento, reduzindo sua porosidade. 23
- Figura 02 – Porosidade intergranular em arenito quartzoso fino a médio ressaltada pela cor azul da impregnação – Formação Botucatu (RS). LN – 4X. 24
- Figura 03 – (A) Porosidade pot fraturas em rochas ígneas – Pedreira Brasília Guaíba (UTM = E 474.600 / N 6.718.650). (B) Detalhe da fratura subvertical com circulação de água. 24
- Figura 04 – Experimento de Darcy para a condutividade hidráulica. .. 26
- Figura 05 – (A) Permeâmetro de parede flexível. (B) Permeâmetro de parede rígida. 27
- Figura 06 – (A) Permeâmetro com carga constante. (B) Permeâmetro com carga variável.. 29
- Figura 07 – Diagrama mostrando a diferença conceitual entre condutividade hidráulica e transmissividade. 30
- Figura 08 – Perfilagem geofísica e características litoestratigráficas do poço tubular profundo COR IV 28. 33
- Figura 09 – Síntese do ordenamento das quatro camadas que formam o arcabouço do SAG em Ivoti/RS. 34
- Figura 10 – Características das camadas hidrogeológicas para o Sistema Aquífero Guarani em Ivoti/RS. 35
- Figura 11 – Porosidade total, retenção específica e vazão específica X granulometria. 37
- Figura 12 – Relação entre porosidade e permeabilidade em arenitos com diferentes tamanhos de grãos. 37

CAPÍTULO 3

- Figura 13 – Fluxograma das técnicas de determinações de parâmetros hidrogeológicos. 39
- Figura 14 – A) Soquete e amostrador na forma de um cilindro de cravação oco. Detalhe das medidas do cilindro cortante (B) altura e (C) diâmetro. (D) Coleta em campo com o cilindro cortante. (E) Amostra saturando sobre pedra-pomes. (F) Amostra secando em estufa. (G) Amostra sendo pesada com balança de precisão. 42
- Figura 15 – (A) Amostra imersa na água. (B) Amostra sendo pesada para determinação do seu peso seco. 43

Figura 16 – (A) Coleta de amostra deformada em afloramento. (B) Amostra sendo preparada para o ensaio de permeabilidade em laboratório no sentido longitudinal. (C) Permeâmetro com parede rígida	44
Figura 17 – Classificação dos valores de porosidade total utilizando valores granulométricos.....	46
Figura 18 – Gráfico mostrando a relação da condutividade hidráulica com o diâmetro dos grãos de sedimentos texturalmente diferentes.	48

CAPÍTULO 4

Figura 19 – Localização da área da sub-bacia do Arroio Portão na América do Sul e no Rio Grande do Sul.....	50
Figura 20 – Compartimentação do SAG no Estado do Rio Grande do Sul, com a coluna estratigráfica regional. A área de estudo está demarcada no retângulo em vermelho na parte sul do Bloco Leste.	51
Figura 21 – (Lineamentos estruturais da Bacia do Rio dos Sinos (composição colorida LANDSAT - TM 3/4/5), e o diagrama de roseta com a distribuição de frequência do número de lineamentos.....	53
Figura 22 – Seção Geológica E - W da Bacia Hidrográfica do Rio dos Sinos, observando-se as variações de espessura das formações Botucatu e Pirambóia.	54
Figura 23 – (A) Formação Pirambóia com estratificação cruzada (UTM = E 484.174 / N 6.712.031 no município de Portão/RS). (B) Formação Botucatu com estratificação cruzada de grande porte (UTM = E 484.273 / N 6.719.623, município de Estância Velha/RS). (C) Rochas basálticas da Formação Serra Geral (UTM = E 485.624 / N 6.722.119 - Pedreira da Incopel, município de Estância Velha/RS).....	57
Figura 24 – (A) Arenito com intercalações de níveis argilosos e arenosos no Aquífero Pirambóia (UTM = E 480.991 / N 6.709.318). (B) Arenito silicificado no topo do Aquífero Botucatu em contato com o Aquífero Serra Geral (UTM = E 474.539 / N 6.719.410). (C) Zona de falha, no Aquífero Serra Geral intensamente alterada e fraturada, com predominância de fraturas subverticais (UTM = E 474.600 / N 6.718.650).....	59

CAPÍTULO 5

Figura 25 – Mapa geológico da sub-bacia do Arroio Portão, com indicação dos pontos de amostragem, localização de poços tubulares e sondagens rotativas.....	61
Figura 26 – Seção geológica A – A'	62

Figura 27 – Coluna estratigráfica para área da sub-bacia do Arroio Portão.	63
Figura 28 – (A) Arenitos avermelhados com estratificação cruzada acanalada da Formação Pirambóia. Observam-se níveis esbranquiçados coincidentes com a estrutura interna da rocha, os quais são atribuídos à alteração dos feldspatos (UTM = E 484.755 / N 6.711.604 - município de Portão/RS). (B) Caulinitização de feldspatos nos arenitos da Formação Pirambóia. Observa-se o contato de grãos arredondados e bem selecionados, com grãos angulosos e com seleção moderada. Ao centro da micrografia (LP 10X), observa-se intensa alteração de um grão de feldspato (UTM = E 480.991 / N 6.709.318 amostra AM – 18, município de Portão/RS).	65
Figura 29 – (A) Na Formação Pirambóia, ocorre uma intercalação de níveis arenosos e níveis silto-argilosos. A erosão superficial remove mais intensamente os níveis de granulometria mais fina (UTM = E 480.991 / N 6.709.318 - município de Portão/RS). (B) Contato de estratos com diferentes tamanhos de grão, caracterizando a bimodalidade granulométrica dos arenitos (LN 4X). Os estratos mais grossos têm grãos bem arredondados, de tamanho areia média a grossa, em contato com estratos de areia fina e silte com grãos predominantemente angulosos e de seleção moderada. A cimentação é dada por películas de óxido de ferro de cor marrom-avermelhada envolvendo os grãos (UTM = E 481.547 / N 6.718.332, município de Portão/RS).	67
Figura 30 – (A) Arenitos finos e friáveis da Formação Pirambóia com estratificação cruzada de grande porte. Observam-se níveis esbranquiçados ao longo da estratificação (UTM = E 484.174 / N 6.712.031 - município de Portão/RS). (B) Arenitos finos com níveis silto-argilosos. A ausência de cimentação torna essas rochas friáveis e vulneráveis à erosão hídrica superficial (UTM = E 476.276 / N 6.716.645 - município de Portão/RS).	68

Figura 31 – (A) Arenito fino a médio, rosa-avermelhado, com estratificação cruzada de grande porte e paleocorrente para NE. Observam-se níveis esbranquiçados ao longo da estratificação (UTM = E 474.358 / N 6.718.277 - município de Portão/RS). (B) Observa-se a distribuição granulométrica bimodal com intercalação de níveis de areia média e de areia fina. Os grãos maiores apresentam-se bem selecionados e com bom arredondamento, sendo os grãos menores angulosos e de seleção moderada (LN 4X). A amostra apresenta um empacotamento normal com contato pontual e na maioria dos grãos reto (UTM = E 483.700 / N 6.722.239 amostra AM – 05 município de Estância Velha/RS). (C) Arenito bimodal com estratificação cruzada acanalada (Formação Botucatu). Observam-se níveis esbranquiçados correspondentes à alteração dos feldspatos (UTM = E 483.700 / N 6.722.39 AM – 05 município de Estância Velha/RS)..... 70

Figura 32 – (A) Contato entre os arenitos da Formação Botucatu e as rochas vulcânicas da Formação Serra Geral (UTM = E 474.539 / N 6.719.410 – Pedreira da Sultepa, município de Estância Velha/RS). (B) Arenito “intertrap” da Formação Botucatu preservado entre as efusivas da Formação Serra Geral, próximo ao contato dessas duas formações. A orientação geral da face do afloramento é N 15° W da direita para esquerda, (UTM = E 485.624 / N 6.722.119 - Pedreira da Incopel, município de Estância Velha/RS). 72

Figura 33 – (A) Contato da Formação Botucatu com a Formação Serra Geral. Os arenitos sofreram efeito térmico, ocorrendo recristalização dos grãos de quartzo e o endurecimento da rocha (UTM = E 474.498 / N 6.718.853 Pedreira da Brasília Guaíba - Portão/RS). (B) Arenito fino quartzoso, com pouco feldspato alcalino, plagioclásio e fragmentos líticos. Os grãos se apresentam bem selecionados com uma redução da porosidade intergranular; pois os grãos estão sendo envolvidos por uma cimentação silicosa dada pelo sobrecrecimento do quartzo (Qz) (LP 10X) (UTM = E 474.357 / N 6.722.811 amostra AM – 19). (C) Grãos envolvidos por uma cimentação carbonática (Ca) (LN 4X) (UTM = E 480.602 / N 6.709.378 - município de Estância Velha/RS)..... 73

Figura 34 – (A) Arenito coerente com estratificação cruzada de grande porte (UTM = E 485.624 / N 6.722.119 - município de Estância Velha/RS). (B) Arenito friável com estratificação cruzada de grande porte pouco perceptível (UTM = E 473.871 / N 6.718.962 - município de Portão/RS). 74

Figura 35 – Limites máximos e mínimos (linha cheia) e valor médio (linha tracejada) das distribuições granulométricas. Observa-se que os arenitos da Formação Pirambóia mostram maior teor de finos, (fração argila entre 0% e 6%), bem como predominância de grãos entre 0,05mm e 0,74mm.	76
Figura 36 – Os arenitos da Formação Botucatu (A) mostram predominância (>50%) de teores de silte + argila entre 0% e 10%, enquanto para os arenitos da Formação Pirambóia (B) predominam teores silte + argila entre 15% e 20%.	76
Figura 37 – (A) Rochas basálticas da Formação Serra Geral recobrimdo os arenitos da Formação Botucatu (UTM = E 485.621 / N 6.721.980 Pedreira da Incopel - Estância Velha/RS). (B) Basalto amigdaloidal caracterizando o topo dos derrames basálticos na região (UTM = E 484.809 / N 6.722.355 Pedreira Sultepa: SR – 03 Caixa 01 trecho de 3,40m à 5,20m). (C) Basalto amigdaloidal caracterizando a base dos derrames basálticos em contato com o arenito Botucatu (UTM = E 484.592 / N 6.722.246 Pedreira Sultepa: SR – 05 Caixa 12 contato com 61,20m).	78
Figura 38 – <i>Sill</i> de diabásio com disjunção colunar, coloração cinza e textura afanítica (UTM = E 474.498 / N 6.718.853 Pedreira da Brasília Guaíba - Portão/RS).	79
Figura 39 – (A) Textura subofítica, com cristais de plagioclásio (Pl), piroxênio (Px), pontualmente com vidro vulcânico (Vv) intersetal e vesículas sendo preenchidas por celadonita (Cl) (LN 4X) (UTM = E 484.560 / N 6.722.048 Pedreira da Sultepa - Estância Velha/RS). (B) Cristais euédricos e subeuédricos de Plagioclásio (Pl) e anédricos de piroxênio (Px) e vidro vulcânico (Vv) intersetal (LN 10X) (UTM = E 484.560 / N 6.722.048 Pedreira da Sultepa - Estância Velha/RS).	80
Figura 40 – Mapa geológico com lineamentos tectônicos.	82
Figura 41 – Diagramas de orientação dos lineamentos detectados em fotografias aéreas e imagens de satélite. Os diagramas de frequência simples referem-se apenas ao número de lineamentos detectados, enquanto os diagramas frequência X extensão referem-se ao comprimento em cada intervalo de classe (orientação) em relação ao comprimento total de todos os lineamentos.	84
Figura 42 – (A) Dique de diabásio vertical, com orientação 335°, atravessando as rochas vulcânicas com disjunção colunar (UTM = E 485.624 / N 6.722.119 - Pedreira da Incopel, município de Estância Velha/RS). (B) Dique de diabásio vertical, com orientação 340°, atravessando as rochas vulcânicas com disjunção colunar (UTM = E 485.644 / N 6.722.122 - Pedreira da Incopel, município de Estância Velha/RS).	86

Figura 43 – (A) Dique de diabásio vertical, com orientação 290°, cortando as rochas sedimentares da Formação Botucatu (UTM = E 474.746 / N 6.720.533 – AM – 03, município de Portão/RS). (B) Dique de diabásio alterado, com orientação 340°, cortando as rochas sedimentares da Formação Pirambóia (UTM = E 476.276 / N 6.716.645 – AM – 11, município de Portão/RS).	87
Figura 44 – (A) Comportamento geral das paleocorrentes da Formação Botucatu, considerando um total de 60 medidas de campo com predominância para o quadrante NE. (B) Comportamento geral das paleocorrentes da Formação Pirambóia, considerando 45 medidas de campo. Verifica-se uma bimodalidade NE e SE.....	89
Figura 45 – Variação vertical das paleocorrentes.....	90
Figura 46 – (A) Redução do espaço poroso devido à caulinitização dos feldspatos em arenitos da Formação Pirambóia, micrografia (LP 4X). Observa-se o contato de grãos angulosos e moderadamente selecionados, com granulometria de areia fina a areia média (UTM = E 484.755 / N 6.711.604 amostra AM – 07, município de Portão/RS). (B) Redução da porosidade do arenito fino quartzoso, sendo que os grãos se apresentam bem selecionados com uma redução da porosidade intergranular, devido à cimentação silicosa dada pelo sobrecrecimento do quartzo (LP 10X) (UTM = E 483.700 / N 6.722.239 amostra AM – 05, município de Estância Velha/RS).....	93
Figura 47 – (A) Porosidade nula devido à cimentação carbonática (Ca) em arenito da Formação Botucatu no contato com a Formação Serra Geral. Arenito quartzoso (Qz); os grãos se apresentam bem selecionados com pouco feldspato alcalino (Fk) e fragmentos líticos (Fl) (LP 10X) (UTM = E 485.644 / N 6.722.122 amostra AM – 28 - Pedreira da Incopel, município de Estância Velha/RS). (B) Redução da porosidade intergranular devido à cimentação ferruginosa. Arenito friável quartzoso, com pouco feldspato alcalino, plagioclásio e fragmentos líticos, sendo que os grãos se apresentam bem selecionados (LN 4X) (UTM = E 481.514 / N 6.718.800, município de Estância Velha/RS).....	94
Figura 48 – (A) Arenito coerente com estratificação cruzada de grande porte, na Formação Botucatu (UTM = E 485.624 / N 6.722.119 - município de Estância Velha/RS). (B) Arenito friável da Formação Pirambóia com sulcos de erosão. Observam-se as cores avermelhadas devido à pigmentação ferruginosa, bem como horizontes esbranquiçados devido ao processo de caulinitização (UTM = E 476.276 / N 6.716.645 – AM – 11, município de Portão/RS)...	95

Figura 49 – Relação da razão porosidade efetiva (η_{ec}) / porosidade total (η_{tc}) com o teor de finos (argila + silte) dos arenitos friáveis. As porosidades foram determinadas pelo método do cilindro cortante.....	97
Figura 50 – (A) Lâmina mostrando a porosidade (em azul) em amostra do arenito Botucatu com valor na razão $\eta_e / \eta_t = 0,83$ e (B) lâmina da Formação Pirambóia com um aumento considerável na quantidade de cimento argiloso com valor na razão $\eta_e / \eta_t = 0,88$	97
Figura 51 – Arenito bimodal com estratificação cruzada acanalada (Formação Botucatu). Observam-se níveis esbranquiçados correspondentes à alteração dos feldspatos (UTM = E 483.700 / N 6.7222.39 AM – 05, município de Estância Velha/RS).	98
Figura 52 – Correlação entre a razão porosidade efetiva (η_e) / porosidade total (η_t) e o teor de finos (argila + silte) dos arenitos coerentes e friáveis. As porosidades foram determinadas no testemunho de sondagem (arenitos coerentes) e pelo cilindro cortante (arenitos friáveis).	98
Figura 53 – A porosidade total estimada granulometricamente (η_{tg}) reduz-se progressivamente para baixos teores de finos (argila + silte).	100
Figura 54 – A porosidade total estimada granulometricamente (η_{tg}) é próxima à porosidade total determinada pelo cilindro cortante (η_{tc}) para baixos teores de finos. Com o aumento de finos dos arenitos friáveis, a taxa η_{tg} / η_{tc} reduz-se progressivamente.	100
Figura 55 – A taxa da porosidade efetiva (η_{ec}) estimada granulometricamente pela técnica do triângulo de Johnson (η_{tg}) é variável com o teor de finos (argila + silte) dos arenitos friáveis.....	101
Figura 56 – Os arenitos friáveis são representados pela porosidade efetiva do cilindro cortante (η_{ec}) e os arenitos coerentes são representados pela porosidade efetiva dos testemunhos de sondagem (η_{et}) bastante inferior à porosidade total estimada granulometricamente pela técnica do triângulo de Johnson (η_{tg}).	101
Figura 57 – A porosidade total estimada granulometricamente (η_{tg}) é próxima à porosidade total determinada pelo cilindro cortante (η_{tc}) para baixos teores de finos. Com o aumento de finos dos arenitos friáveis, a taxa η_{tg} / η_{tc} reduz-se progressivamente.	102
Figura 58 – Relação entre as técnicas A e B para estimativa da porosidade efetiva (η_e) dos arenitos friáveis.....	103
Figura 59 – Porosidade total e efetiva determinada em amostras com cilindro cortante (η_{tc} - azul) e (η_{ec} - vermelho) e estimada pela lâmina petrográfica (η_{tl} - verde).....	104

Figura 60 – Teor de finos (argila + silte) e porosidades totais e efetivas determinada em amostras com cilindro cortante (η_{tc} e η_{ec}) e estimadas pela técnica B ao longo do perfil colunar do SAG na sub-bacia do Arroio Portão.....	106
Figura 61 – (A) Distribuição dos valores de porosidade total pela granulometria (η_{tg}) dos arenitos friáveis determinados em amostras de superfície. Observa-se que a porosidade total aumenta nas proximidades dos lineamentos tectônicos. (B) Distribuição espacial do teor de finos (argila + silte) dos arenitos friáveis. Observa-se que teor de finos diminui nas proximidades dos lineamentos tectônicos..	108
Figura 62 – Gráfico dos intervalos de valores de condutividade hidráulica estimado pelo d_{20} X porcentagem do número de amostras para as formações Pirambóia e Botucatu.....	110
Figura 63 – (A) Permeabilidades longitudinais (K_L) e transversais (K_T) à estratificação. (B) Os valores de K_L são sempre iguais ou maiores que K_T . As permeabilidades da Formação Pirambóia são inferiores às da Formação Botucatu..	111
Figura 64 – Variação da anisotropia da permeabilidade nas formações Botucatu e Pirambóia.....	112
Figura 65 – Variação da anisotropia da permeabilidade em relação ao teor de finos (argila + silte) nas formações Botucatu e Pirambóia.....	112
Figura 66 – Relações da permeabilidade transversal (K_T) com d_{20} (diâmetro para 20% passante).	114
Figura 67 – Relações da permeabilidade transversal (K_T) com o teor de finos (argila + silte).....	114
Figura 68 – Valores estimados para a permeabilidade transversal (K_T) com o teor de finos (argila + silte) para arenitos friáveis e coerentes.	116
Figura 69 – Valores estimados para a permeabilidade transversal (K_T) com a porosidade total estimada granulometricamente pela técnica de Johnson (η_{tg}) para arenitos friáveis e coerentes.....	116
Figura 70 – Distribuição espacial dos valores estimados de permeabilidade transversal a estratificação (K_T). As maiores permeabilidades ocorrem nas proximidades dos lineamentos tectônicos.....	118
Figura 71 – Distribuição espacial da capacidade específica de poços tubulares. Os maiores valores encontram-se no cruzamento de lineamentos tectônicos, principalmente lineamentos NW.	119

Índice de tabelas

CAPÍTULO 2

Tabela 01 – Vazão específica conforme a granulometria dos materiais geológicos. 25

CAPÍTULO 5

Tabela 02 – Características granulométricas dos arenitos da Formação Pirambóia (15 amostras). d_{10} = Diâmetro máximo correspondente a 10% em peso da amostra total. Analogamente, d_{20} , d_{50} e d_{60} correspondem ao diâmetro máximo das frações de 20%, 50% e 60% em peso da amostra total. O coeficiente de uniformidade é definido por $CU = d_{60} / d_{10}$. Observa-se um elevado desvio-padrão para o coeficiente de uniformidade e para a fração argila. 66

Tabela 03 – Características granulométricas dos arenitos da Formação Botucatu (15 amostras). d_{10} = diâmetro máximo correspondente a 10% em peso da amostra total. Analogamente, d_{20} , d_{50} e d_{60} correspondem ao diâmetro máximo das frações de 20%, 50% e 60% em peso da amostra total. O coeficiente de uniformidade é definido por $CU = d_{60} / d_{10}$. 69

Tabela 04 – Orientação, extensão e frequência dos lineamentos identificados na área. Os números em vermelho representam as maiores extensões acumuladas para cada formação. . 83

Tabela 05 - Valores de porosidade de arenitos friáveis e coerentes, determinados pelo cilindro cortante (η_{tc} e η_{ec}) e lâminas petrográficas (η_{tl}). 104

Tabela 06 – Porosidades total e efetiva obtidas pelas técnicas A e B para a Formação Pirambóia (cor vermelha) e para a Formação Botucatu (cor preta). 105

Tabela 07 – Valores de permeabilidade na transversal (K_T), permeabilidade na longitudinal (K_L), permeabilidade na transversal estimado por d_{20} , diâmetro máximo correspondente a 20% em peso da amostra total (d_{20}), granulometria (argila +silte) e porosidade total pela granulometria obtidos para os arenitos da Formação Botucatu e Pirambóia. 109

Índice de quadros

CAPÍTULO 2

Quadro 01 – Relações entre as classificações hidrogeológicas e de permeabilidade..... 29

CAPÍTULO 3

Quadro 02 – Descrição das etapas de trabalho, dados, processos e resultados obtidos. 40

CAPÍTULO 5

Quadro 03 – Valores de porosidade total (η_t) determinados (DET): (η_{tc}) porosidade total pelo cilindro cortante (η_{tt}), porosidade total pelo testemunho de sondagem e estimados (EST): (η_{tg}) porosidade total pela granulometria lâmina e (η_{tl}) porosidade total pela lâmina petrográfica em amostras da Formação Pirambóia (cor vermelha) e Formação Botucatu (cor preta). 91

Quadro 04 – Valores de porosidade efetiva (η_e) determinados (DET): (η_{ec}) porosidade efetiva pelo cilindro cortante e (η_{et}) porosidade efetiva pelo testemunho de sondagem em amostras da Formação Pirambóia (cor vermelha) e Formação Botucatu (cor preta).. 91

Quadro 05 – Técnicas de estimativa da porosidade efetiva para arenitos friáveis. 103

Quadro 06 – Classificação do SAG para a sub-bacia do Arroio Portão (modificado de DAEE/USP 1992). 109

Lista de abreviaturas e siglas

- A – Área da amostra
- ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas
- CETESB – Companhia Estadual de Tecnologia e Saneamento Ambiental
- cm – Centímetro
- cm³ – Centímetro cúbico
- cm/s – Centímetro por segundo
- CORSAN – Companhia Riograndense de Saneamento
- CO₂ – Dióxido de carbono
- CPRM – Serviço Geológico do Brasil (Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais)
- Cu – Coeficiente de Uniformidade
- d – Diâmetro efetivo do grão
- DNPM – Departamento Nacional de Produção Mineral
- E – Leste
- h – Altura
- K – Condutividade hidráulica
- K_T – Condutividade hidráulica transversal à estratificação
- K_L – Condutividade hidráulica longitudinal à estratificação
- km – Quilômetro
- LASERCA – Laboratório de Sensoriamento Remoto e Cartografia Digital
- L – Medida de distância
- Ma – Milhões de anos
- m – Metro
- m/d – Metro por dia
- m²/s – Metro quadrado por segundo
- m²/dia – Metro quadrado por dia
- m³/h – Metro cúbico por hora
- m³/h/m – Metro cúbico por hora por metro
- m/s – Metro por segundo
- mm – Milímetro
- N – Norte
- NBR – Norma Brasileira Registrada
- NE – Nordeste

η – Porosidade

η_t – Porosidade total

η_{tc} – Porosidade total por saturação da amostra do cilindro cortante

η_{tg} – Porosidade total pela análise granulométrica e triângulo de Johnson

η_{tl} – Porosidade total por descrição de lâminas petrográficas

η_{tt} – Porosidade total por saturação do testemunho de sondagem

η_e – Porosidade efetiva

η_{ec} – Porosidade efetiva por saturação da amostra do cilindro cortante

η_{et} – Porosidade efetiva por saturação do testemunho de sondagem

NW – Noroeste

PRÓ-SINOS – Consórcio Público de Saneamento da Bacia Hidrográfica do Rio dos Sinos

Q – Vazão

r – raio

RS – Rio Grande do Sul

SAG – Sistema Aquífero Guarani

Sc – Capacidade específica

SFDC – Sistemas de Falhas Dorsal de Canguçu

SFTA-P – Sistema de Falhas Terra de Areia-Posadas

SIG – Sistema de Informações Geográficas

Sr – Retenção Específica

Sy – Vazão específica ou porosidade específica

T - Medida de tempo

T – Transmissividade

Unisinos – Universidade do Vale do Rio dos Sinos

UTM – Universal Transverse Mercator

V – Volume

V_d – Volume de água que pode ser drenado

V_i – Espaços vazios interconectados

V_r – Volume não drenado da água

V_t – Volume total

V_v – Volume de vazios

W – Oeste

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	21
2 PARÂMETROS HIDROGEOLÓGICOS	22
2.1 ARMAZENAMENTO	22
2.1.1 Porosidade (η)	22
2.1.2 Retenção específica (S_r)	25
2.1.3 Capacidade específica (S_c)	25
2.1.4 Vazão específica (S_y)	25
2.2 PROPRIEDADES DE FLUXO	26
2.2.1 Condutividade hidráulica (K)	26
2.2.2 Transmissividade (T)	30
2.3 POROSIDADE E CONDUTIVIDADE HIDRÁULICA DE ROCHAS SEDIMENTARES COERENTES E FRIÁVEIS	31
2.4 RELAÇÕES ENTRE POROSIDADE, CONDUTIVIDADE HIDRÁULICA, RETENÇÃO ESPECÍFICA E VAZÃO ESPECÍFICA DAS ROCHAS SEDIMENTARES.	36
3 MÉTODO E TÉCNICAS	38
4 LOCALIZAÇÃO E CARACTERIZAÇÃO	49
5 ANÁLISE DOS RESULTADOS	60
5.1 ESTRATIGRAFIA, GEOMETRIA, CARACTERÍSTICAS FÍSICAS E MINERALÓGICAS	60
5.2 ESTRUTURA E TECTÔNICA	82
5.3 PALEOFLUXOS	88
5.4 POROSIDADE E CIMENTAÇÃO	91
5.5 PERMEABILIDADE	109
6 CONCLUSÕES E CONSIDERAÇÕES FINAIS	120
REFERÊNCIAS	122

1 INTRODUÇÃO

O comportamento da porosidade e da permeabilidade do SAG na sub-bacia do Arroio Portão está diretamente condicionado pela geometria e pelas características das formações Pirambóia e Botucatu. Estudos geológicos e hidrogeológicos realizados na região apontaram condicionamento estrutural na recarga do aquífero e problemas de extração intensa para abastecimento público urbano e industrial.

Essa área, altamente industrializada e com elevada densidade demográfica, tem apresentado demanda crescente de água subterrânea para abastecimento urbano-industrial. A intensificação do uso desse recurso hídrico exige maior compreensão do comportamento do aquífero.

Este estudo permitirá maior compreensão da ordem de grandeza, da distribuição espacial e do condicionamento geológico da porosidade e da permeabilidade do Sistema Aquífero Guarani, subsidiando a elaboração de modelos de fluxo e o planejamento e a proteção do uso das águas subterrâneas nessa região.

Objetivos

Avaliar a ordem de grandeza, a distribuição espacial e o condicionamento geológico da porosidade e da permeabilidade do Sistema Aquífero Guarani na sub-bacia do Arroio Portão/RS.

Objetivos Específicos

- Identificar e caracterizar as unidades estratigráficas constituintes do SAG na sub-bacia do Arroio Portão.
- Determinar parâmetros hidrogeológicos das rochas sedimentares do SAG.
- Verificar as possíveis inter-relações entre atributos das rochas sedimentares e as propriedades hidrogeológicas do SAG e estabelecer técnicas de estimativa dessas últimas.
- Analisar a distribuição espacial e o condicionamento geológico da porosidade e da permeabilidade do SAG.

2 PARÂMETROS HIDROGEOLÓGICOS

As principais propriedades hidrogeológicas de uma zona saturada podem ser classificadas de acordo com as características de armazenamento (porosidade, retenção específica, capacidade específica e vazão específica) e com suas propriedades de fluxo (condutividade hidráulica e transmissividade) (CLEARY, 2007).

2.1 ARMAZENAMENTO

É definido como o volume de água que o aquífero libera por unidade de área superficial para um gradiente hidráulico unitário, por unidade de decréscimo da carga hidráulica (GOMES, 2010).

2.1.1 Porosidade (η)

Porosidade total (η_t)

A porosidade total (η_t) de uma determinada amostra de rocha consiste na divisão do volume de vazios (V_v) de uma rocha (poros e fissuras), estando eles interconectados ou não, pelo volume total da mesma (V_t) (RABELO, 2004), ou seja:

$$\eta_t = \frac{V_v}{V_t} (\%)$$

A porosidade total é uma característica de armazenamento importante no estudo de reservatórios de aquíferos, mas apenas para o cálculo de reservas, pois um arenito pode apresentar uma porosidade alta, mas não havendo comunicação dos seus poros, impossibilita a migração da água no reservatório (BONET; GABRIELLI, 1991).

Porosidade efetiva (η_e)

A porosidade efetiva (η_e) representa o espaço ocupado por fluidos que podem ser deslocados através do meio poroso, relacionando os volume de espaços vazios

interconectados (V_i) de uma rocha com o seu volume total (V_t) (BONET; GABRIELLI, 1991), sendo caracterizada pela seguinte fórmula:

$$\eta_e = \frac{V_i}{V_t} (\%)$$

Quando uma rocha apresentar matérias granulares, pobre a moderadamente cimentados, os valores de porosidade total e porosidade efetiva serão praticamente iguais; já em rochas altamente cimentadas, os valores das porosidades apresentarão grandes diferenças (BONET; GABRIELLI, 1991).

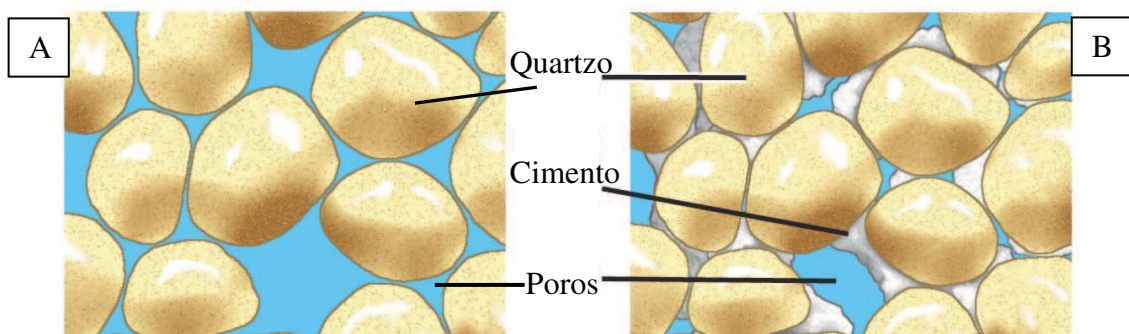
Porosidade primária

A porosidade primária refere-se ao volume de vazios, à geometria e à distribuição dos poros que a amostra possui no momento da sua deposição (GIANNINI, 2000). A distribuição da geometria da porosidade primária só se preserva quando uma amostra for imediatamente preenchida por um cimento precoce (Figura 01 - A).

Porosidade secundária

A porosidade secundária ocorre nas amostras de rocha por processos diagenéticos que incluem dissolução e fragmentação, que geram espaços porosos. Mas a diagênese também pode fechar esses poros, pela compactação ou pela precipitação de minerais sob a forma de cimento (Figura 01 - B).

Figura 01 – Desenho esquemático comparando grãos de uma amostra de quartzo com porosidade primária (A) com muitos espaços porosos X porosidade secundária (B), onde a mesma amostra passou por processos diagenéticos onde foi precipitado um cimento, reduzindo sua porosidade



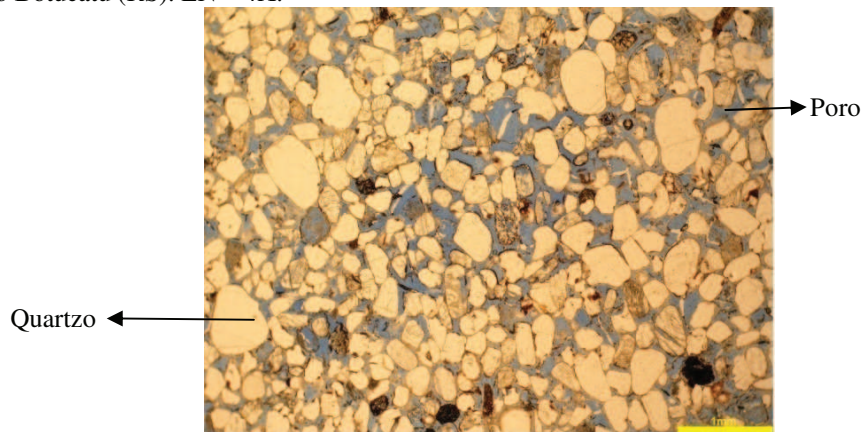
Fonte: Modificada de Press et al. (2006, p.321).

Condicionamento Hidrogeológico do Fluxo Subterrâneo

Os aquíferos podem ser divididos em três grupos, de acordo com o tipo de porosidade:

- **Porosidade intergranular** (Figura 02): presente predominantemente em rochas sedimentares. Os poros entre os grãos nas rochas estão usualmente preenchidos por água. A porosidade varia conforme o tipo de material e de seu arranjo.

Figura 02 – Porosidade intergranular em arenito quartzoso fino a médio ressaltada pela cor azul da impregnação – Formação Botucatu (RS). LN – 4X.



Fonte: Elaborada pelo autor.

- **Porosidade por fraturas** (Figura 03): presente em rochas ígneas e metamórficas, faz com que a capacidade dessas rochas em acumularem água esteja relacionada à quantidade de fraturas, suas aberturas e intercomunicação. A porosidade nessas rochas pode variar de 5 a 50%.

Figura 03 – (A) Porosidade por fraturas em rochas ígneas – Pedreira Brasília Guafba (UTM = E 474.600 / N 6.718.650). (B) Detalhe da fratura subvertical com circulação de água.



Fonte: Elaborada pelo autor.

- **Porosidade por dissolução das rochas:** presente principalmente em rochas sedimentares pela dissolução de grãos ou matriz por reações químicas por ação de CO₂ dissolvido na água, ocorrendo em maior intensidade em calcários.

2.1.2 Retenção específica (Sr)

A quantidade de água que uma unidade de volume do aquífero retém após a drenagem por gravidade ou bombeada em algum poço tubular profundo é chamada de retenção específica (Sr), sendo expressa essa relação da seguinte maneira $Sr = 100V_r / V_t$, assim V_r corresponde ao volume não drenado da água, e o V_t , ao volume total da rocha saturada (DRISCOLL, 1986).

2.1.3 Capacidade específica (Sc)

É a relação entre a vazão, em m³/h, de um poço e o rebaixamento do nível d'água em metros. Esse conceito é a melhor forma de se comparar a produtividade de aquíferos distintos. Um bom aquífero apresenta capacidade específica média de 3 m³/h/m, como é o caso do SAG; aquíferos mais pobres apresentam capacidade específica média de 0,5 m³/h/m, ou menos (E-GEO, 2010).

2.1.4 Vazão específica (Sy)

A vazão específica ou porosidade específica (Sy) é o volume de água que pode ser drenado V_d (Tabela 01). Calcula-se através da equação $Sy = 100V_d / V_t$ onde V_t é o volume total de rocha saturada, conforme Machado (2005).

Tabela 01 – Vazão específica conforme a granulometria dos materiais geológicos

Material	Vazão Específica (%)
Argila	1 - 10
Cascalho	15 - 30
Arenito	5 - 15
Xisto	1 - 5
Calcário	1 - 5

Fonte: Modificada de Driscoll (1986).

2.2 PROPRIEDADES DE FLUXO

2.2.1 Condutividade hidráulica (K)

A condutividade hidráulica é uma propriedade das rochas que mostra a maior ou menor facilidade com que a água passa através dos seus poros, os quais devem estar interconectados para proporcionar uma boa circulação de água, conforme a NBR 6502:2004.

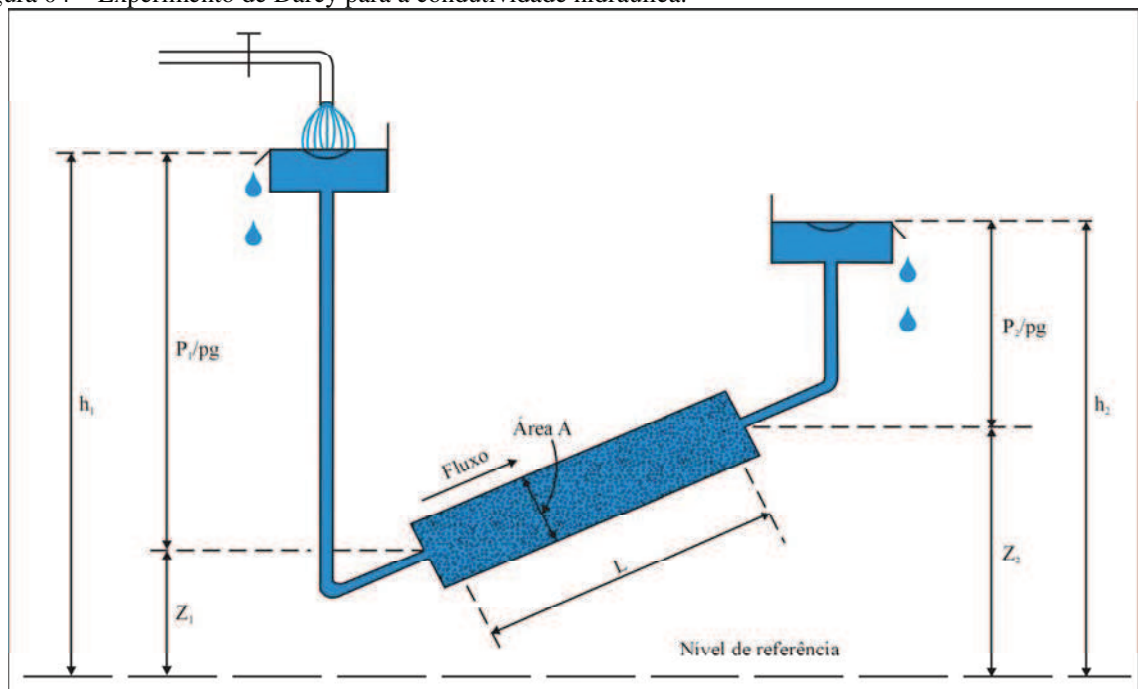
Este experimento proposto por Henry Darcy em 1856 (Figura 04) estabeleceu o escoamento da água em um meio poroso concluindo que a vazão era proporcional à seção transversal (A) do filtro, proporcional à diferença de cargas hidráulicas (h_1 e h_2) entre os piezômetros e inversamente proporcional à distância (L) entre os piezômetros (MACHADO, 2005). A lei de Henry Darcy é dada pela seguinte fórmula:

$$Q = \frac{K \cdot A (h_1 - h_2)}{L} \text{ expressa em m/d, m/s ou cm/s}$$

K = coeficiente de proporcionalidade denominado de condutividade hidráulica (L / T)
 . (L = medida de distância e T = medida de tempo).

O gradiente hidráulico ou taxa de perda de carga por comprimento é representado pela diferença de cargas hidráulicas (h_1 e h_2) dividida pelo comprimento L.

Figura 04 – Experimento de Darcy para a condutividade hidráulica.



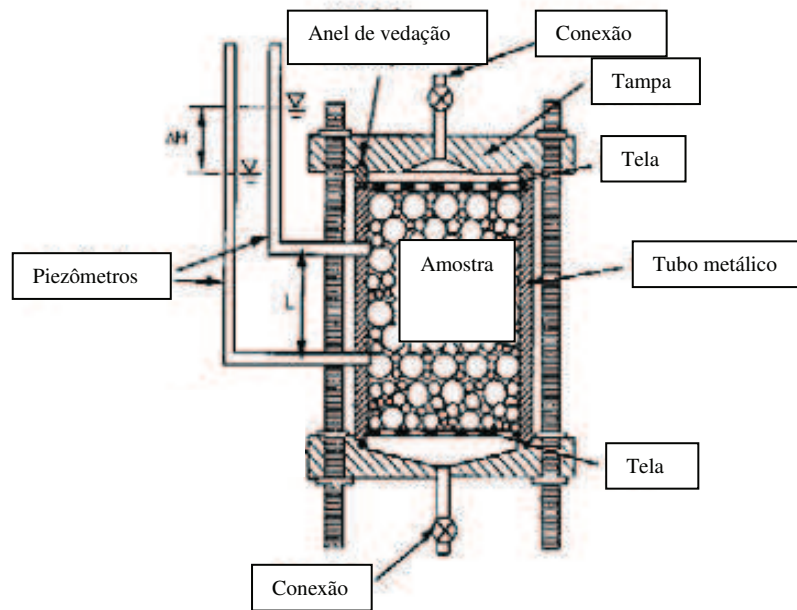
Fonte: Segundo Verruijt (1970).

Existem alguns equipamentos para determinação da condutividade hidráulica em laboratório (DANIEL, 1994). Esses equipamentos são denominados de permeômetros e são classificados em:

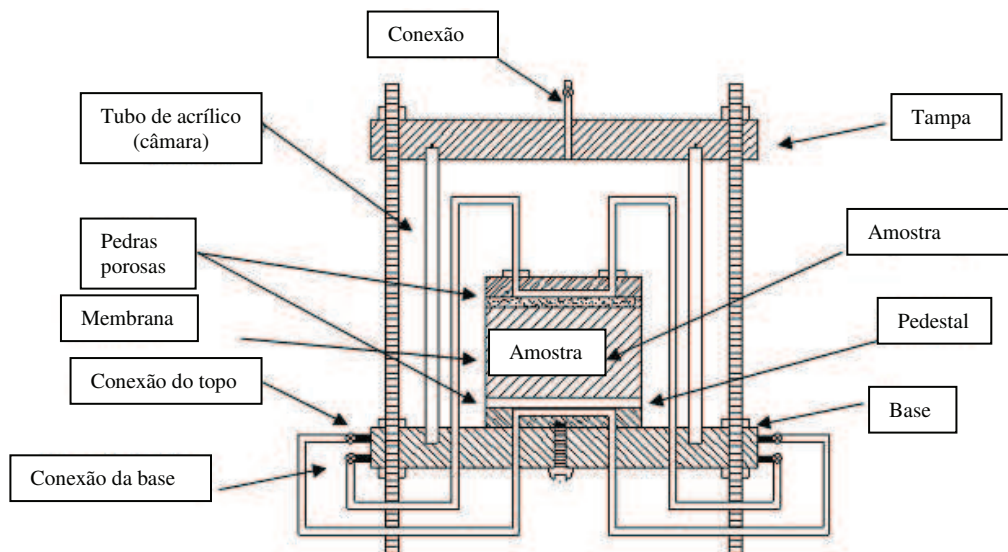
- Permeômetro de parede rígida: constituído por tubo metálico, plástico ou vidro onde é colocado o corpo de prova para o ensaio (Figura 05 - A).

- Permeômetro de parede flexível: consiste de uma câmara triaxial simplificada adaptada ao ensaio de condutividade hidráulica (Figura 05 - B).

Figura 05 – (A) Permeômetro de parede flexível. (B) Permeômetro de parede rígida.



Fonte: Modificada de Daniel (1994).



Fonte: Modificada de Daniel (1994).

O ensaio de condutividade hidráulica pode variar em função do sistema de aplicação de carga hidráulica, que pode ser do tipo carga constante e carga variável (DANIEL, 1994).

- Ensaio de carga constante (geralmente utilizado em solos arenosos): a percolação do líquido na amostra ocorre mantendo-se a carga hidráulica constante, conforme a NBR 13292:1995. Enquanto realizado o ensaio, mede-se o volume de líquido (V) que percola na amostra por um determinado intervalo de tempo (t) (Figura 06 - A). A vazão (Q) é determinada pela quantidade de água que é armazenada por uma bureta graduada, sendo assim podemos determinar a condutividade hidráulica pela seguinte fórmula:

$$K = \frac{V \cdot L}{h \cdot A \cdot t} \quad \text{expressa em m/d, m/s ou cm/s}$$

K = condutividade hidráulica

V = volume

L = comprimento da amostra

h = diferença de nível (carga)

A = área da amostra

t = tempo

- Ensaio de carga variável (geralmente utilizado em solos argilosos e siltosos): a percolação do líquido na amostra ocorre mantendo-se a carga hidráulica variável ao longo do tempo (Figura 06 - B), a vazão (Q) é medida em uma bureta graduada de diâmetro conhecido, verificando-se o tempo (t) que a água leva para baixar de uma altura inicial (h_1) até uma altura final (h_2), segundo a NBR 14545:2000. Podemos determinar a condutividade hidráulica pela seguinte fórmula:

$$K = \frac{a \cdot L}{A (t_2 - t_1)} \cdot 2,3 \cdot \log \left(\frac{h_1}{h_2} \right) \quad \text{expressa em m/d, m/s ou cm/s}$$

K = condutividade hidráulica

a = área da bureta

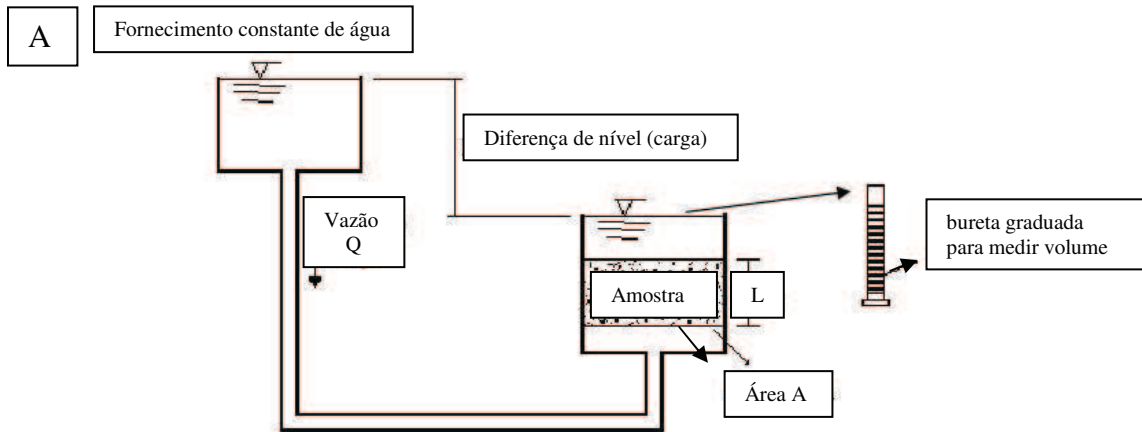
L = comprimento da amostra

A = área da amostra

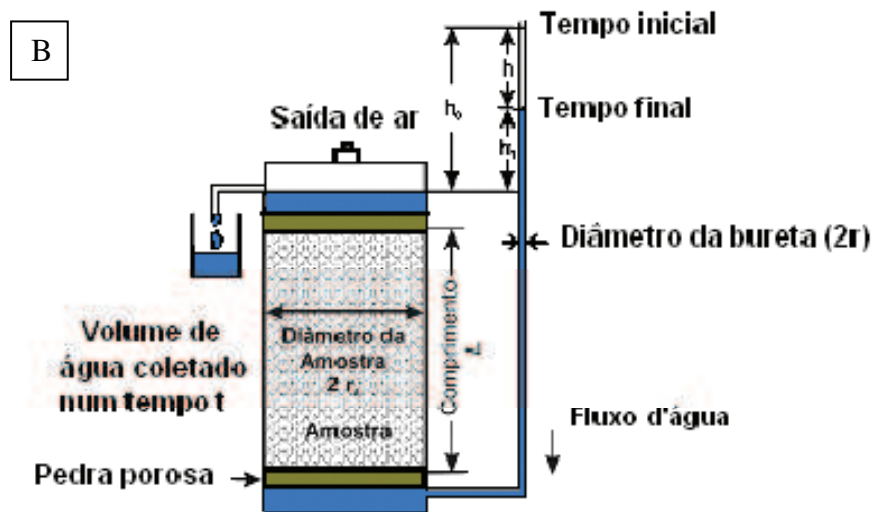
t = tempo

h = leituras na bureta

Figura 06 – (A) Permeômetro com carga constante. (B) Permeômetro com carga variável.



Fonte: Modificada de Pinto (2005, p. 35).



Fonte: Barboza, Silva e Mello (2007, p. 126).

Conforme os valores encontrados de condutividade hidráulica para determinados tipos de materiais, podemos classificá-los em diferentes tipos de aquíferos segundo (DAEE/USP, 1992). Segue abaixo tabela de relações entre as classificações hidrogeológicas e de permeabilidade (Quadro 01):

Quadro 01 – Relações entre as classificações hidrogeológicas e de permeabilidade.

Permeabilidade cm/s	10^{-9}	10^{-8}	10^{-7}	10^{-6}	10^{-5}	10^{-4}	10^{-3}	10^{-2}	10^{-1}	10^0	10^1
Classificação da Permeabilidade	Impermeável		Pouco Impermeável		Pequena Impermeabilidade		Permeável		Muito Permeável		
Classificação Hidrogeológica	Aquicluda		Aquitardo		Aquífero Pobre		Aquífero Regular a Bom		Aquífero Excelente		
Tipos de materiais	Argilitos Ardósias Granitos		Siltito Siltito Arenoso Argilitos		Areia Fina/Siltito Areia Siltosa Calcário Fraturado		Areia Limpa Conglomerado Arenoso Areia Fina		Seixos Limpos		

Fonte: Modificado de DAEE/USP (1992).

2.2.2 Transmissividade (T)

Estando diretamente relacionada com a condutividade hidráulica (K), a transmissividade (T) corresponde ao volume de água que pode ser transmitido horizontalmente por toda a espessura saturada do aquífero e define-se como a taxa de escoamento de água através de uma faixa de largura unitária do aquífero submetida a um gradiente hidráulico unitário (Figura 07). Através da expressão abaixo, determinamos a transmissividade para aquíferos confinados (MACHADO, 2005):

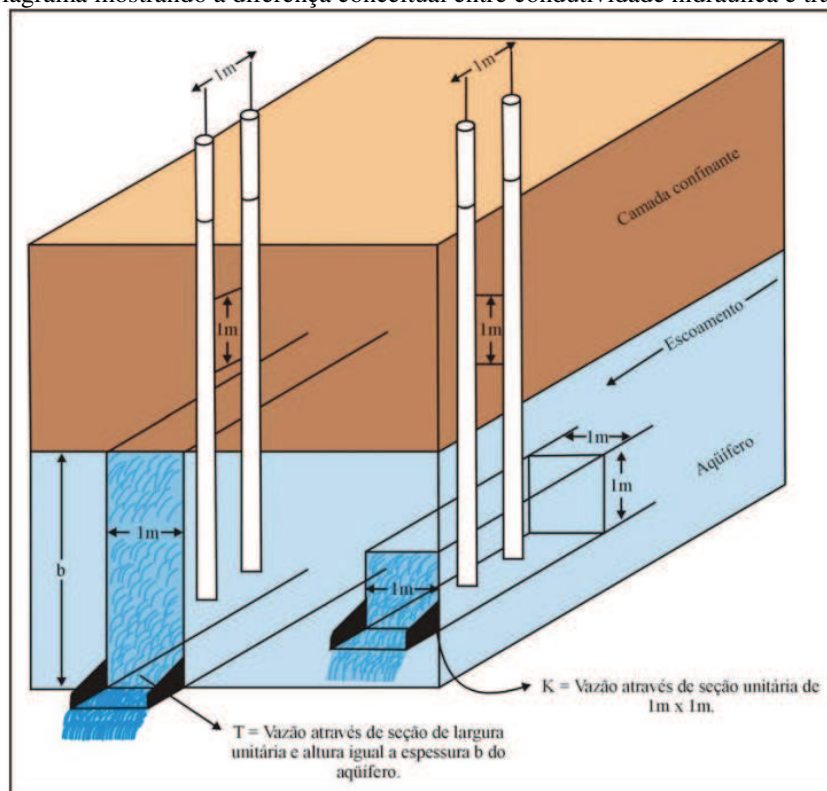
$$T = K \cdot b, \text{ expressa em } m^2/s \text{ ou } m^2/dia$$

T = Transmissividade (L²/T)

K = Condutividade hidráulica (L/T)

b = Espessura do aquífero (L)

Figura 07 – Diagrama mostrando a diferença conceitual entre condutividade hidráulica e transmissividade.



Fonte: Segundo Pulido (1978 apud MACHADO, 2005, p. 44).

2.3 POROSIDADE E CONDUTIVIDADE HIDRÁULICA DE ROCHAS SEDIMENTARES COERENTES E FRIÁVEIS

Rochas coerentes (cimentação moderada) quebram facilmente ao golpe do martelo, produzindo vários fragmentos de bordos quebradiços, enquanto que rochas sem coerência (friáveis) quebram facilmente com a pressão dos dedos, desagregando-se (NBR 6502:2004). Os principais cimentos encontrados nas rochas constituintes do SAG (Formações Rio do Rasto, Pirambóia e Botucatu) nas áreas próximas à sub-bacia do Arroio Portão são óxido de ferro, caulinita, sílica, sulfatos e calcita (GOLDBERG, 2003).

Variações de porosidade e granulometria

Segundo Goldberg (2003), a porosidade secundária nas formações Rio do Rasto, Pirambóia e Botucatu está relacionada à dissolução de grãos e cimentos, com subsequente precipitação de óxidos de ferro, titânio, manganês e caulinita. Os valores médios de porosidade total obtidos por descrições de lâminas petrográficas de testemunhos de sondagem do DNPM e da CORSAN são semelhantes para as formações Botucatu ($\eta_t = 10,5\%$) e Rio do Rasto ($\eta_t = 10,4\%$), sendo menos porosa a Formação Pirambóia ($\eta_t = 7,5\%$).

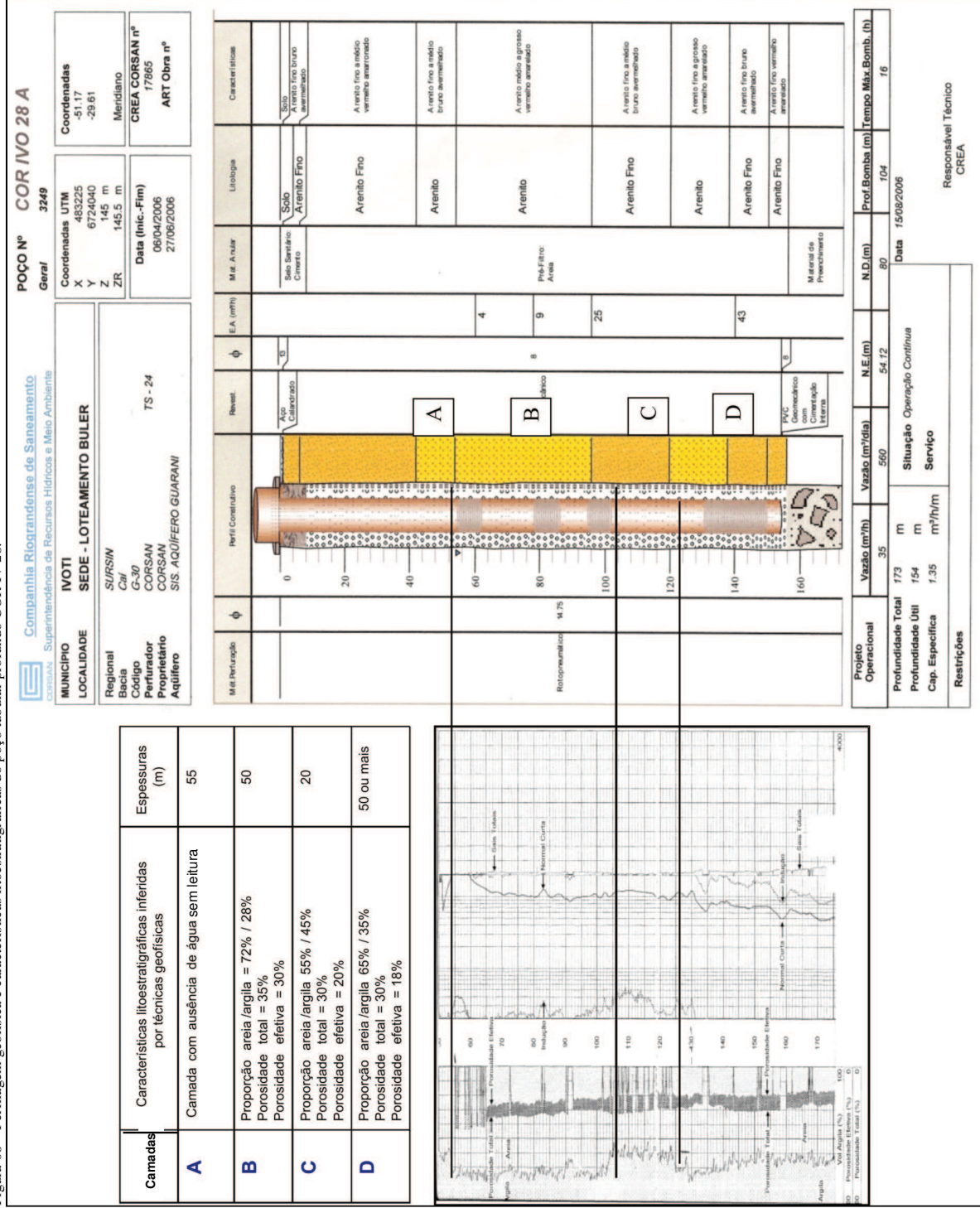
Utilizando técnicas de perfilagem geofísica (Figura 08), análises granulométricas e seções geológicas construídas a partir de poços tubulares, Heine (2008) identificou 04 camadas hidroestratigráficas do Sistema Aquífero Guarani em Ivoti/RS. Para essa finalidade, utilizou-se da perfilagem geofísica do poço COR IV 28, tanto por raio gama como por potencial espontâneo (SP), e assim estimou a espessura e as características das rochas, tais como composição granulométrica e porosidade. Através das diferenças encontradas, dividiu o aquífero em quatro horizontes hidroestratigráficos levando em conta os seguintes valores de porosidade (A $\eta_t =$ sem leitura e $\eta_e =$ sem leitura, camada com ausência de água não possibilitando a leitura, B $\eta_t = 35\%$ e $\eta_e = 30\%$, C $\eta_t = 30\%$ e $\eta_e = 20\%$ e D $\eta_t = 30\%$ e $\eta_e = 18\%$) com distintas respostas geofísicas.

As curvas granulométricas obtidas (Figura 09) mostram boa seleção, com uma predominância geral da fração areia fina, principalmente nas amostras “A” e “B”. Teores da fração silte + argila da ordem de 15% são encontrados na amostra “C”, passando para 30% na amostra “D”. Essa situação caracteriza um aumento do tamanho de partícula da base para o topo do pacote sedimentar (HEINE, 2008). Sendo os valores de porosidade

total obtidos pela granulometria pelo triângulo de Johnson (1967), para o horizonte A $\eta_t = 40\%$, B $\eta_t = 38\%$, C $\eta_t = 25\%$ e D = não foi possível determinar.

Alguns autores, como Rocha (1997), sugerem um valor médio de porosidade efetiva da ordem de 15% para todo o Sistema Aquífero Guarani, não caracterizando muitas vezes estudos locais como o de Heine (2008) em Ivoti/RS.


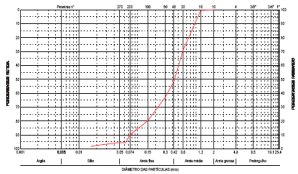
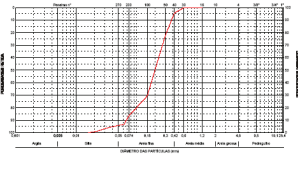
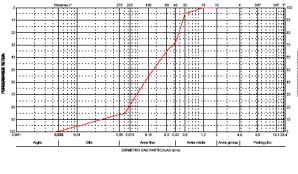
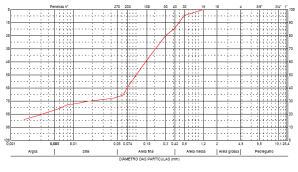
Figura 08 – Perfilagem geofísica e características litostratigráficas do poço tubular profundo COR IV 28.



Fonte: Modificada de Heine (2008).

Heine (2008) realizou uma síntese desses resultados, incluindo fotografias e curvas granulométricas, onde identificou cinco camadas com distintas características (Figura 09).

Figura 09 – Síntese do ordenamento das quatro camadas que formam o arcabouço do SAG em Ivoti/RS

	GRANULOMETRIA	CAMADAS DO SAG
	<p data-bbox="592 857 890 875">CURVA DE DISTRIBUIÇÃO GRANULOMÉTRICA</p>  <p data-bbox="592 1111 890 1128">CURVA DE DISTRIBUIÇÃO GRANULOMÉTRICA</p>  <p data-bbox="592 1344 890 1361">CURVA DE DISTRIBUIÇÃO GRANULOMÉTRICA</p>  <p data-bbox="592 1545 890 1563">CURVA DE DISTRIBUIÇÃO GRANULOMÉTRICA</p> 	<p data-bbox="1007 488 1326 519">Formação Serra Geral - SG</p> <p data-bbox="927 519 1374 640">Rochas vulcânicas com espessuras desde poucos metros até mais de 150m. A circulação de água subterrânea é condicionada pela porosidade secundária.</p> <p data-bbox="1098 674 1230 705">SAG - topo</p> <p data-bbox="927 705 1406 853">Espessura de 0,2m a 5,0m, muito duro, com metamorfismo de contato ou cimentação silicosa em lâmina delgada, frequentemente sotoposto a horizonte argiloso derivado da alteração da rocha basáltica sobrejacente.</p> <p data-bbox="1114 887 1214 918">SAG - A</p> <p data-bbox="927 918 1406 1008">Arenito com espessura em torno de 55m, constituído por 92,65% de areia média a fina e de 7,35% de silte, $Cu = 3,23$.</p> <p data-bbox="1114 1131 1214 1162">SAG - B</p> <p data-bbox="927 1162 1406 1283">Arenito com espessura em torno de 50m, constituído por 96,04% de areia fina a média e de 3,96% da porção silte, $Cu = 3,43$.</p> <p data-bbox="1114 1344 1214 1375">SAG - C</p> <p data-bbox="927 1375 1406 1464">Arenito com espessura em torno de 20m, constituído por 86,9% de areia fina a média e de 13,2% de silte + argila, $Cu = 7,06$.</p> <p data-bbox="1114 1525 1214 1556">SAG - D</p> <p data-bbox="927 1556 1406 1680">Arenito com espessura superior a 50m, constituído por 67% areia fina, de 22% de argila e 11% de silte, Cu sem cálculo, com cimentação carbonática.</p>

Fonte: Segundo Heine (2008).

Variações de condutividade hidráulica

Os parâmetros hidráulicos do SAG em Ivoti/RS como transmissividade (T), condutividade hidráulica (K) e coeficiente de armazenamento (S) foram calculados pela equação de não equilíbrio de Theis (1935 apud HEINE, 2008) e pela equação de recuperação dos ensaios de bombeamento dos poços da CORSAN. Os valores de condutividade hidráulica encontrados variam de 10^{-3} cm/s a 10^{-5} cm/s para areia médias a finas e areias siltsosas.

Através dos valores de espessura, porosidade e condutividade hidráulica encontrados para cada horizonte hidroestratigráfico, Heine (2008) determinou que o SAG em Ivoti tem espessura superior a 120m; 04 horizontes heterogêneos (Figura 10), com valores de condutividade decrescente do topo para a base (tabulares e lateralmente contínuos).

A presença de falhas gera deslocamentos verticais significativos dos blocos, ocorrendo situações de recargas diretas nas janelas estratigráficas, e indiretas por porosidade secundária quando o SAG está capeado pela Formação Serra Geral. As propriedades físicas favoráveis para o armazenamento e circulação de água subterrânea (permeabilidade) ocasionam descargas nas drenagens e secundariamente nas encostas.

Figura 10 – Características das camadas hidrogeológicas para o Sistema Aquífero Guarani em Ivoti/RS.

LEGENDA	DESCRIÇÃO	ESPESSURA (m)	k (m/ dia)
S G	Aquífero Serra Geral - circulação da água em porosidade secundária	Inexistente até > de 150	* 0,0086
SAG-TOPO	SAG - TOPO Região com metamorfismo de contato com a formação Serra Geral	< 0,20 até 5	*0,0086
SAG - A	SAG - A Camada com porosidade primária, composta de arenitos de ambiente continental, constituído de 92,7% de areia fina a média de de 7,35% de silte. Cu = 3,43	55	0,14
SAG - B	SAG - B Camada com porosidade primária, composta de arenitos de ambiente continental, constituído de 96,4% de areia fina a média de de 3,96% de silte. Cu = 3,96	50	0,47
SAG - C	SAG - C Camada com porosidade primária, composta de arenitos de ambiente continental, constituído de 86,9% de areia fina a média de de 13,2% de silte. Cu = 7,06	20	0,195
SAG - D	SAG - D Camada com porosidade primária, composta de arenitos de ambiente continental, constituído de 67,06% de areia fina e de 32,94% de argilosiltsoso. Com dimento da CaCO ₃	> 50	0,138

Fonte: Modificada de Heine (2008).

2.4 RELAÇÕES ENTRE POROSIDADE, CONDUTIVIDADE HIDRÁULICA, RETENÇÃO ESPECÍFICA E VAZÃO ESPECÍFICA DAS ROCHAS SEDIMENTARES

Segundo gráfico de CETESB (1977), os valores para areia média com máxima granulometria de 10% são: porosidade total = 42%, vazão específica = 32% e retenção específica 10% (Figura 11).

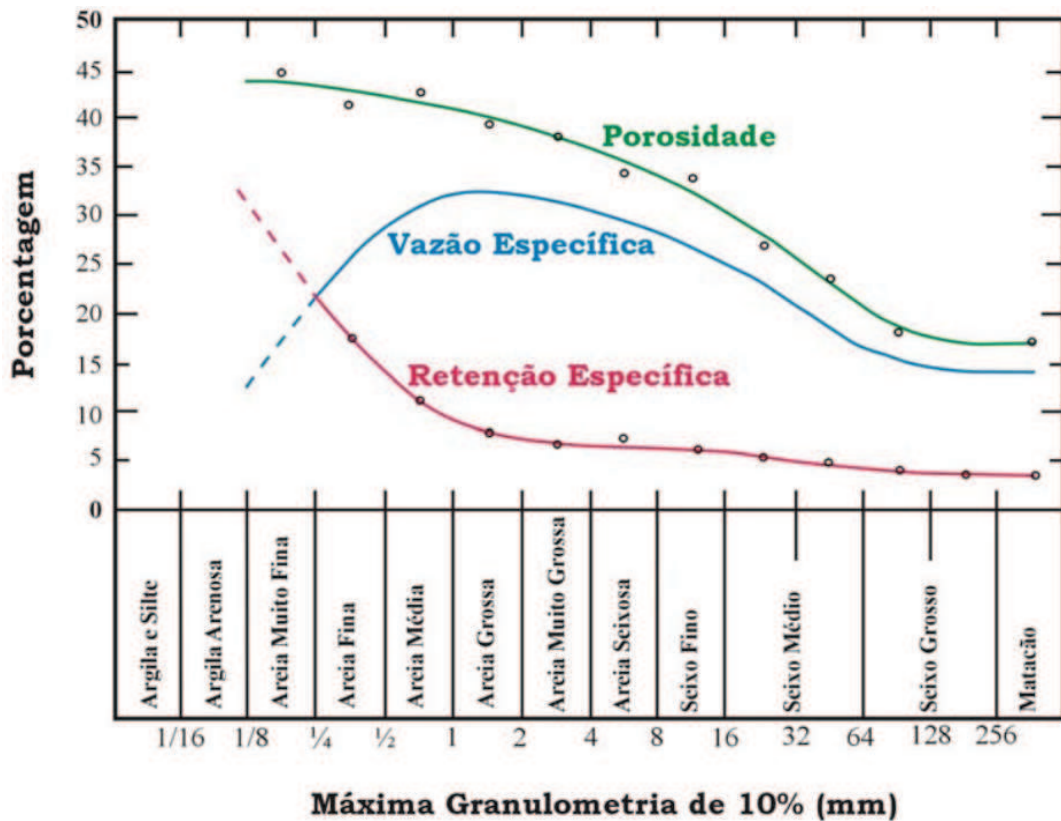
Arenitos podem apresentar baixa porosidade e permeabilidade devido à cimentação entre os grãos e a compactação, pois, com o aumento da profundidade, as rochas sedimentares sofrem efeitos de temperatura e pressão diminuindo a porosidade e a permeabilidade.

As cimentações mais comuns são: sílica, calcita e argilominerais; os argilominerais são resultados de precipitação ou alteração de minerais durante a circulação da água subterrânea entre os arenitos, os quais geram uma diminuição na condutividade hidráulica e porosidade.

Chilingar, Main e Sinnokrot (1963) observaram em reservatórios de petróleo na Louisiana (EUA) que, para cada 300m de profundidade, há uma diminuição de 1,3% na porosidade dos arenitos.

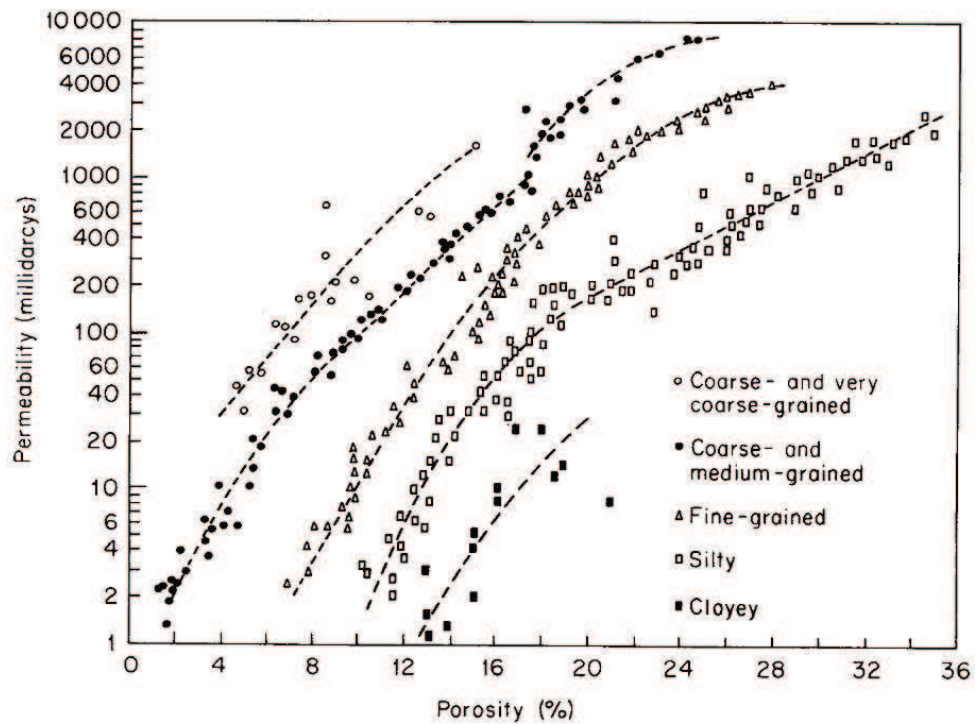
Os arenitos são agrupados de acordo com diferentes tamanhos de grãos; ocorrendo um acréscimo na porosidade, há um respectivo aumento na permeabilidade (Figura 12).

Figura 11 – Porosidade total, retenção específica e vazão específica X granulometria.



Fonte: Segundo CETESB (1977).

Figura 12 – Relação entre porosidade e permeabilidade em arenitos com diferentes tamanhos de grãos.



Fonte: Segundo Chilingar, Main e Sinnokrot (1963).

3 MÉTODO E TÉCNICAS

A concepção metodológica utilizada neste estudo é dividida em cinco etapas (Figura 13 e Quadro 02), quais sejam:

Na etapa “A”, foram coletados e avaliados dados regionais de geologia e hidrogeologia do SAG, com ênfase na caracterização das suas formações geológicas constituintes e suas relações de contato. O primeiro passo constou de um levantamento bibliográfico que auxiliou na compreensão da geologia da área, sendo planejados os serviços de mapeamento de campo, bem como na escolha do método de coleta das amostras a ser empregado durante o trabalho.

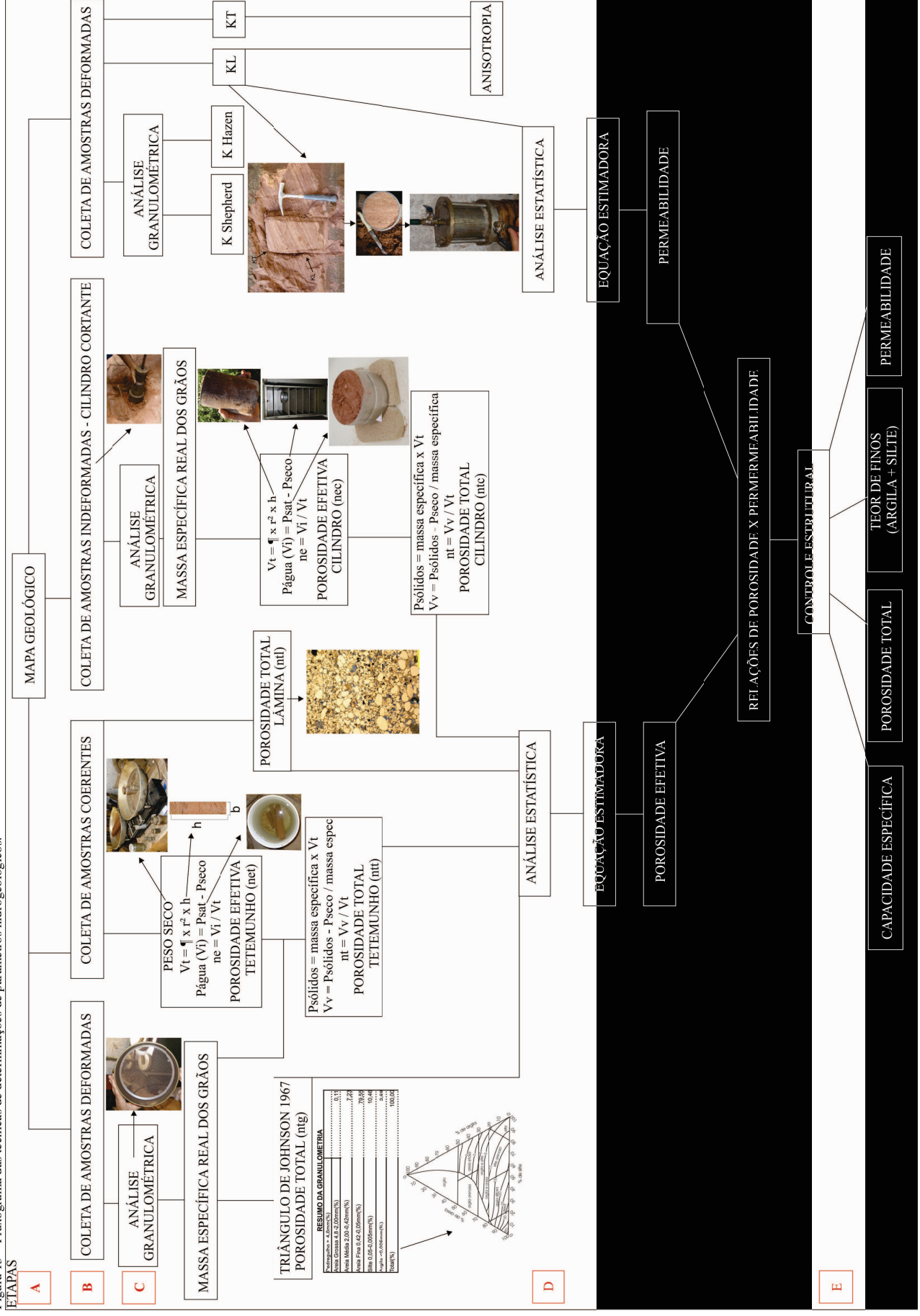
No trabalho de síntese e interpretação, foram realizadas as compilações de mapas geológicos e estruturais da CPRM (Wildner et al., 2008), a interpretação de imagens do satélite LANDSAT sensor TM5 pela banda 4 e pela composição de bandas 3/4/5, além das fotografias aéreas 1:60.000 da Metroplan (1990) e Carta Topográfica do Exército 1:50.000, das Folhas São Leopoldo, Novo Hamburgo, Montenegro e Morretes (MD-DL 1975). Esses dados foram georreferenciados e transferidos para o Datum WGS-84, utilizando os softwares ArcGIS 9.3.1 e o ILWIS 3.3 (versão software livre); tais estudos embasaram a definição das campanhas de amostragem.

A etapa “B” subsequente consistiu no detalhamento do mapa geológico 1:50.000, com distinção a campo das formações Pirambóia e Botucatu utilizando as orientações de paleocorrentes como critério distintivo e redefinindo-se os contatos entre as mesmas.

Com as formações geológicas distinguidas em campo, foram realizadas coletas de amostras deformadas e amostras indeformadas (cilindro cortante) em afloramentos devidamente georreferenciados com GPS de navegação Garmin Etrex. Além disso, foram utilizados testemunhos de sondagem para a elaboração de seções e para a avaliação da espessura do SAG.

A etapa de tratamento dos dados e elaboração dos mapas e seções geológicas foi realizada no LASERCA – Laboratório de Sensoriamento Remoto e Cartografia Digital, na Unisinos, utilizando os softwares ArcGIS 9.3.1, Corel Draw 13, Microsoft Photo Editor e ILWIS 3.3 (versão software livre).

Figura 13 – Fluxograma das técnicas de determinações de parâmetros hidrogeológicos.



Fonte: Elaborada pelo autor.

Quadro 02 – Descrição das etapas de trabalho, dados, processos e resultados obtidos.

ETAPAS	DADOS / ATIVIDADES	PROCESSOS E TÉCNICAS	RESULTADOS
A) COLETA, SISTEMATIZAÇÃO E ANÁLISE PRELIMINAR DE DADOS GEOLÓGICOS	<ul style="list-style-type: none"> - Compilação de cartas topográficas do Exército 1:50.000, Folhas: São Leopoldo, Novo Hamburgo, Montenegro e Morretes - Compilação Mapa geológico CPRM (Wildner et al., 2008) - Análise de lineamentos tectônicos com base em imagens de satélite LANDSAT e fotografias aéreas 1:60.000 (METROPLAN, 1990) 	<ul style="list-style-type: none"> - Digitalização de dados cartográficos em ambiente SIG utilizando os softwares ArcGIS 9.3.1 e Ilwis 3.3 - Interpretação aerofotogeológica - Revisão bibliográfica 	<ul style="list-style-type: none"> - Mapa geológico preliminar 1:50.000 (Corel Draw 13) - Mapa de lineamentos tectônicos 1:50.000 (Corel Draw 13)
B) TRABALHOS DE CAMPO	<ul style="list-style-type: none"> - Descrição de afloramentos - Detalhamento do mapa geológico - Elaboração de seção geológica - Coleta de amostras dos arenitos friáveis e coerentes 	<ul style="list-style-type: none"> - Distinção das formações Botucatu e Pirambóia através dos padrões de paleocorrentes - Coleta de amostras indeformadas e deformadas - Descrição e correlação de sondagens rotativas 	<ul style="list-style-type: none"> - Mapa geológico 1:50.000 (Corel Draw 13) - Seção geológica (Corel Draw 13)
C) DETERMINAÇÕES DE LABORATÓRIO	<ul style="list-style-type: none"> - Caracterização granulométrica - Determinação de permeabilidade, porosidades totais e efetivas - Identificação de materiais cimentantes 	<ul style="list-style-type: none"> - Granulometria por peneiramento e sedimentação com defloculante - Saturação e secagem de amostras - Descrição petrográfica de lâminas delgadas - Ensaio de permeabilidade 	<ul style="list-style-type: none"> - Curvas granulométricas (ntg) - Porosidades totais e efetivas (ntt, net, ntc e ntl) - ntl - K_L e K_T
D) ANÁLISE ESTATÍSTICA	<ul style="list-style-type: none"> - Estimativa das porosidades e permeabilidade 	<ul style="list-style-type: none"> - Análise de regressão estatística entre as porosidades, permeabilidade e o teor de finos (argila + silte) 	<ul style="list-style-type: none"> - Equações estimadoras da permeabilidade (K_L) e das porosidades total (nt) e efetiva (nef)
E) ANÁLISE DO CONDICIONAMENTO GEOLÓGICO	<ul style="list-style-type: none"> - Avaliação da influência dos lineamentos tectônicos sobre a porosidade, capacidade específica e permeabilidade - Avaliação das variações verticais de porosidade efetiva 	<ul style="list-style-type: none"> - Espacialização SIG - Comparação de porosidades estimadas e determinadas ao longo do perfil estratigráfico 	<ul style="list-style-type: none"> - Mapa geológico com distribuição das porosidades, capacidade específica e permeabilidade - Perfil colunar com variações de porosidade efetiva

Fonte: Elaborada pelo autor.

Na etapa “C”, as amostras coletadas na etapa anterior foram encaminhadas para ensaios no laboratório de solos da empresa RW – Geologia e Geotecnia Ltda. e empregadas as técnicas de determinações e estimativas de parâmetro hidrogeológicos apresentadas abaixo.

Técnicas de determinação da porosidade total (η_{tc}) e porosidade efetiva (η_{ec}) pelo método do cilindro cortante – rochas friáveis

Com um soquete e um amostrador na forma de um cilindro oco (Figura 14 - A), foram coletadas 13 amostras em campo para determinar a porosidade total e 06 amostras para porosidade efetiva. Conhecidas as dimensões desse cilindro, é possível calcular o cálculo do volume total (V_t), através da seguinte expressão:

$$V_t = \pi \times r^2 \times h$$

V_t = Volume total

π = 3,1416

r = raio

h = altura

O cilindro cortante utilizado para retirada das amostras em campo possui: h = 14,3cm (Figura 14 – B) e r = 4,6cm (Figura 14 - C), portanto um volume total de $V_t = 950,61\text{cm}^3$. O cilindro foi cravado na rocha por percussão (Figura 14 – D), e as amostras foram retiradas e levadas ao laboratório para saturação (Figura 14 – E) sobre uma superfície permeável (pedrapomes). Após a saturação das amostras, essas foram pesadas com balança de precisão; a seguir foram secas em estufa a 40 °C por 48 horas (Figura 14 – F) e pesadas novamente (Figura 14 - G). Assim obteve-se a diferença entre as massas ($\rho_{\text{água}} = \rho_{\text{saturado}} - \rho_{\text{seco}}$). O volume de vazios interconectados equivale ao peso da água. Assim, a porosidade efetiva foi obtida pela seguinte equação: ($\eta_{ec} = V_i / V_t$).

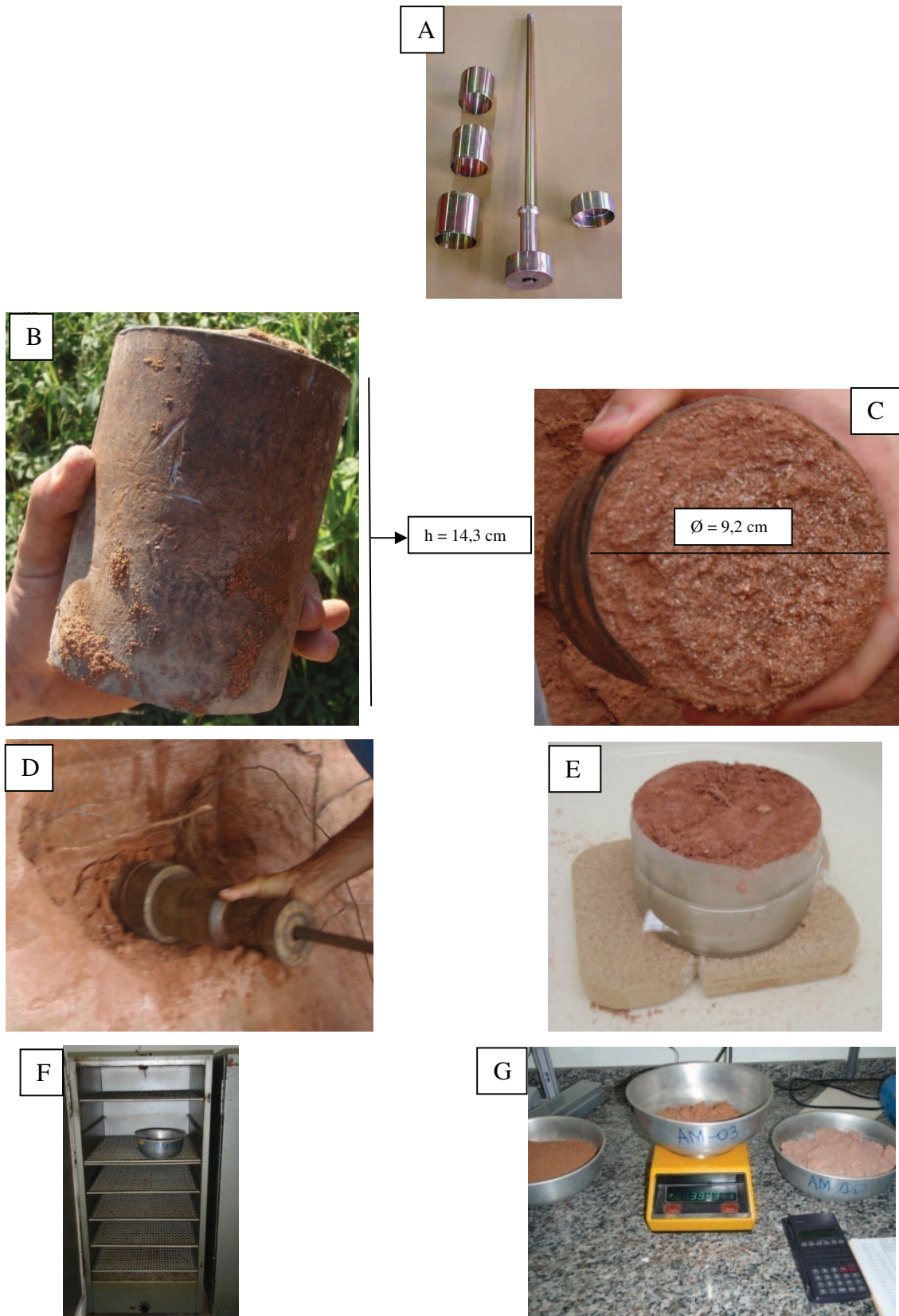
Por sua vez a porosidade total foi obtida da seguinte maneira:

$$\rho_{\text{sólidos}} = \text{massa específica real dos grãos} \times V_t$$

$$V_v = \rho_{\text{sólidos}} - \rho_{\text{seco}} / \text{massa específica real dos grãos}$$

$$\eta_{tc} = \frac{V_v}{V_t} (\%)$$

Figura 14 – (A) Soquete e amostrador na forma de um cilindro de cravação oco. Detalhe das medidas do cilindro cortante (B) altura e (C) diâmetro. (D) Coleta em campo com o cilindro cortante. (E) Amostra saturando sobre pedra-pomes. (F) Amostra secando em estufa. (G) Amostra sendo pesada com balança de precisão.



Fonte: Elaborada pelo autor.

Técnicas de determinação de porosidade total (η_{tt}) e porosidade efetiva (η_{et}) por saturação do testemunho de sondagem – rochas coerentes

Para determinar a porosidade total (η_{tt}) e efetiva (η_{et}) dos testemunhos de sondagem das rochas coerentes pertencentes à RW – Geologia e Geotecnia Ltda. e à Toniolo Busnello S.A utilizou-se método semelhante ao usado para se determinar as porosidades total e efetiva das rochas friáveis. As amostras secas foram pesadas e a seguir colocadas em um recipiente com água por 48 horas (Figura 15 - A). O volume total da amostra foi calculado a partir das medidas (base “b” X altura “h”) do testemunho de sondagem. Após a saturação das amostras, essas foram pesadas com balança de precisão; a seguir foram secas em estufa a 40 °C por 48 horas e pesadas novamente (Figura 15 - B). Assim obteve-se a diferença entre as massas ($\rho_{\text{água}} = \rho_{\text{saturado}} - \rho_{\text{seco}}$). O volume de vazios interconectados equivale ao peso da água, determinando assim a porosidade efetiva ($\eta_{et} = V_i / V_t$).

A porosidade total foi obtida pelas seguintes equações:

$$\rho_{\text{sólidos}} = \text{massa específica real dos grãos} \times V_t$$

$$V_v = \rho_{\text{sólidos}} - \rho_{\text{seco}} / \text{massa específica real dos grãos}$$

$$\eta_{tt} = \frac{V_v}{V_t} (\%)$$

Figura 15 – (A) Amostra imersa na água. (B) Amostra sendo pesada para determinação do seu peso seco.



Fonte: Elaborada pelo autor.

Técnicas de determinação de condutividade hidráulica (K) - rochas friáveis

Foram coletadas 05 amostras deformadas em campo para determinar a condutividade hidráulica tanto na transversal (K_T) quanto na longitudinal (K_L) à estratificação (Figura 16 – A), das rochas friáveis das formações Pirambóia e Botucatu. Para determinar a condutividade hidráulica no laboratório, as amostras foram moldadas (Figura 16 – B) no permeâmetro com parede rígida, constituído por tubo metálico (Figura 16 - C), sendo utilizado o método de carga constante para materiais arenosos, tanto para determinar a condutividade hidráulica na transversal como na longitudinal à estratificação.

Figura 16 – (A) Coleta de amostra deformada em afloramento. (B) Amostra sendo preparada para o ensaio de permeabilidade em laboratório no sentido longitudinal. (C) Permeâmetro com parede rígida.



Fonte: Elaborada pelo autor.

Técnicas de estimativa de porosidade total (η_{tl}) por descrição de lâminas petrográficas - rochas coerentes

Foram confeccionadas 11 lâminas petrográficas no Laboratório de Laminação Petrográfica da Unisinos, sendo 07 lâminas de rochas sedimentares e 04 de rochas ígneas, analisadas com microscópio petrográfico NIKON modelo ECLIPSE E400POL, no LASERCA.

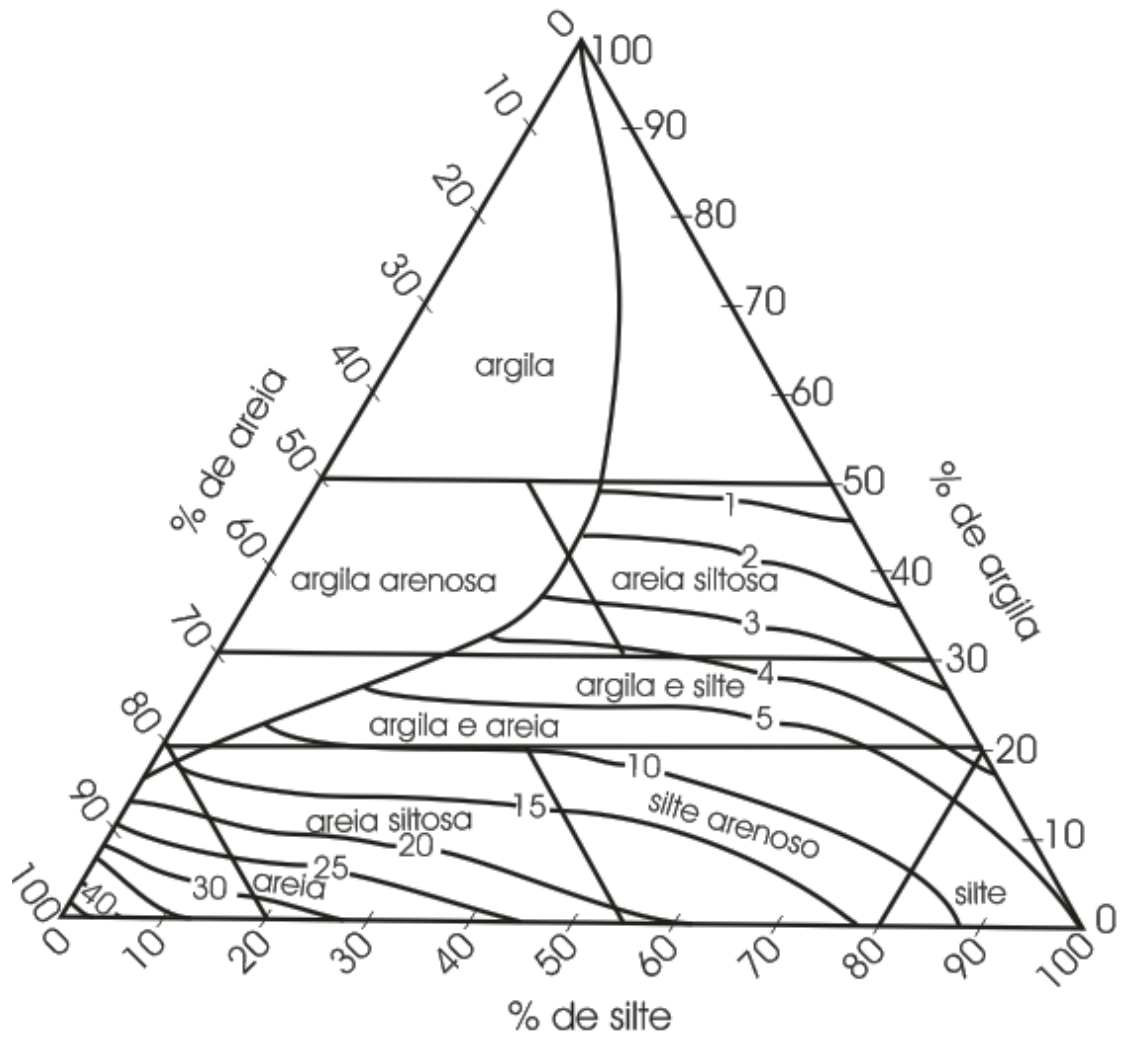
A documentação fotográfica microscópica das lâminas foi realizada com câmera fotográfica digital NIKON modelo COOLPIX MAC LENS, de 4,0 megapixels de resolução máxima.

A obtenção da porosidade total (η_{tl}) foi feita em 04 lâminas de arenitos, impregnadas com corante azul, onde se realizou uma contagem de 300 pontos por lâmina.

Técnicas de estimativa de porosidade total (η_{tg}) pela análise granulométrica e triângulo de Johnson (1967) - rochas friáveis

Foram coletadas 30 amostras deformadas para análise granulométrica em laboratório, que corresponde à obtenção de dois valores, tamanho da partícula e sua percentagem de ocorrência, necessários ao traçado da curva granulométrica (NBR 7181:1984). Para propiciar uma melhor leitura dos percentuais correspondente às frações finas (argilas e siltes), foi utilizado como defloculante o hexametáfosfato de sódio e a densidade real das partículas (ρ) foi determinada pelo método do picnômetro (NOGUEIRA, 2005). Esses valores expressos em percentagem, correspondentes aos tamanhos de grão areia, silte e argila, são lançados no triângulo de Johnson (1967) (Figura 17). O resultado da união dessas intersecções é a porosidade total (η_{tg}) de uma amostra.

Figura 17 – Classificação dos valores de porosidade total utilizando valores granulométricos.



Fonte: Modificado de Johnson (1967).

Técnicas de estimativa de condutividade hidráulica (K) pelo método de Hazen e Shepherd

Para estimativa da condutividade hidráulica pela técnica de Hazen (1911), foram utilizados valores determinados pela análise granulométrica, realizadas em laboratório, sobre 30 amostras deformadas. Utilizou-se a seguinte expressão:

$$K = C_u \times (d_{10})^2 \times 10^{-4} \text{ expressa em cm/s}$$

K = condutividade hidráulica (cm/s)

C_u = coeficiente de uniformidade (d_{60} / d_{10})

d_{10} = diâmetro efetivo do grão (cm)

O método de Hazen é aplicado somente em amostras que contenham o diâmetro efetivo do grão (d_{10}) variando de 0,1 a 3,0mm, enquanto que o método de Shepherd considera que a condutividade hidráulica está relacionada ao diâmetro e à maturidade dos grãos e estabelece a seguinte expressão Shepherd (1989):

$$K = C \cdot d_{50}^j \text{ expressa em cm/s}$$

K = condutividade hidráulica (cm/s)

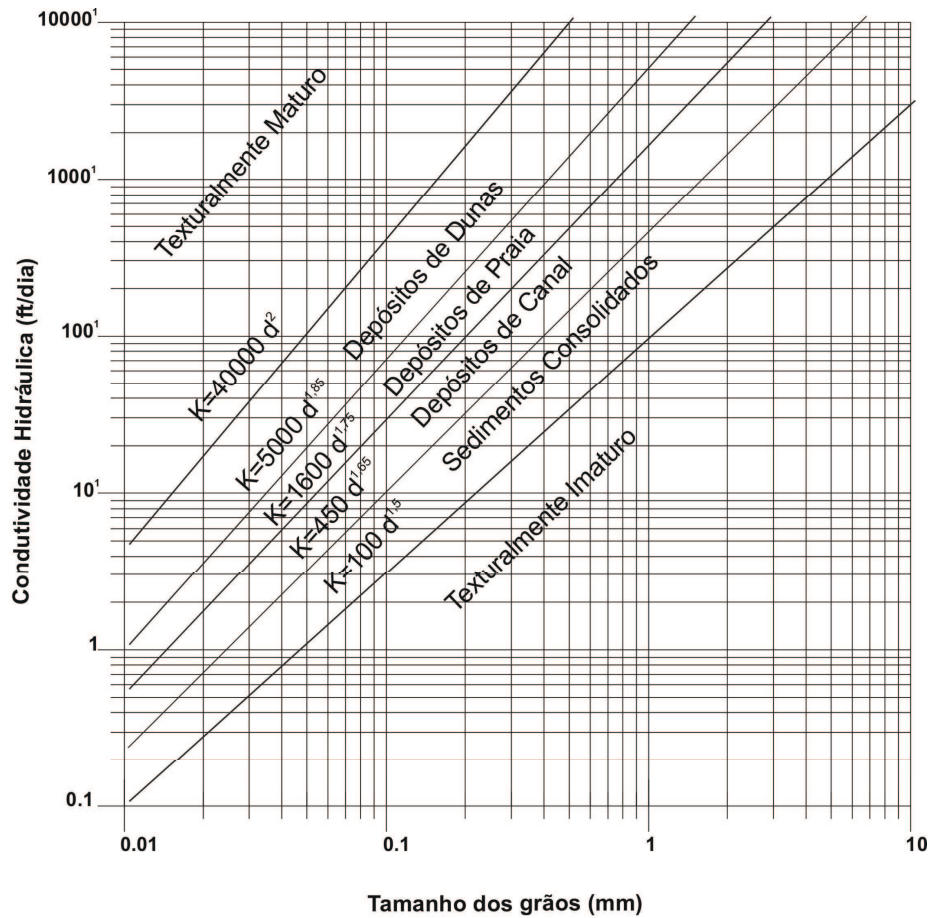
C = fator de ajuste obtido experimentalmente

d_{50} = diâmetro efetivo do grão (mm)

j = expoente obtido experimentalmente, que leva em consideração a textura do material

Segundo Shepherd (1989), o fator de ajuste C e o expoente j possuem altos valores para sedimentos maduros e decaem para sedimentos imaturos. Para determinar a condutividade hidráulica para grãos de diâmetros intermediários, foi utilizado o gráfico para diferentes tipos de sedimentos (Figura 18).

Figura 18 – Gráfico mostrando a relação da condutividade hidráulica com o diâmetro dos grãos de sedimentos texturalmente diferentes.



Fonte: Segundo Fetter (1988).

A etapa “D” é o enquadramento dos dados de permeabilidade e porosidade através de uma análise estatística realizada no software Excel. Para o cruzamento dos parâmetros hidrogeológicos, foram utilizadas uma linha de tendência polinomial que resultou em equações estimadoras. Essas equações foram aplicadas em todas as amostras coletadas na etapa “B”, para obtenção de valores de porosidade e permeabilidade.

Na etapa “E”, as variações da porosidade efetiva foram analisados ao longo do perfil colunar, comparando-se porosidades determinadas em laboratório e estimadas. Por sua vez, os dados de capacidade específica, teor de finos (argila + silte), permeabilidade e porosidade total estimada granulometricamente e corrigidos pelas equações estimadoras foram espacializados e confrontadas com o mapa geológico, com vista a identificar possível controle geológico desses parâmetros.

4 LOCALIZAÇÃO E CARACTERIZAÇÃO DAS UNIDADES CONSTITUINTES DO SAG

A sub-bacia do Arroio Portão situa-se entre os paralelos 29°37' e 29°47' de latitude sul e entre os meridianos 51°09' e 51°18' de longitude oeste, na porção noroeste da Bacia Hidrográfica do Rio dos Sinos, a 50 km da cidade de Porto Alegre, no Estado do Rio Grande do Sul (Figura 19).

Geologia

Na área de estudo, ocorrem rochas sedimentares da Formação Pirambóia (Permiano Superior) e Botucatu (Cretáceo), constituintes do Sistema Aquífero Guarani (SAG), as quais são capeadas pelas rochas efusivas da Formação Serra Geral (Cretáceo). Há, portanto, um importante hiato deposicional entre o Permiano Superior até ao Cretáceo; depósitos coluvionares (Terciário) e sedimentos aluvionares (Quaternário) recobrem parcialmente essas formações.

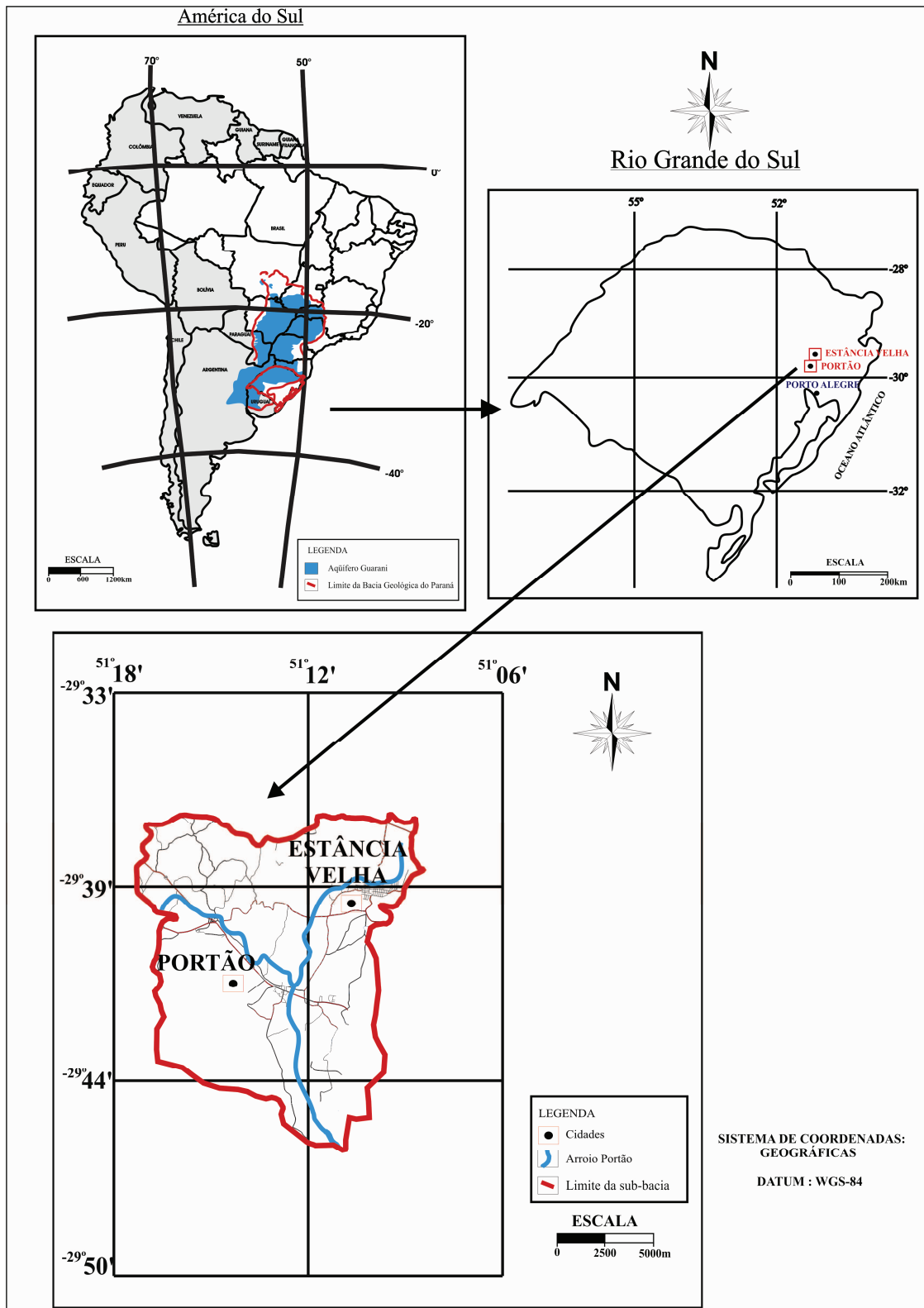
As características e a evolução estrutural da área estão relacionadas aos eventos que condicionaram a compartimentação do SAG no Estado do Rio Grande do Sul, quais sejam:

- Paleozóico: zonas de fraqueza NE e NW condicionaram a deposição de três sequências sedimentares transgressivo-regressivas sobre o embasamento (ZALÁN et al., 1991).

- Mesozóico: duas sequências foram depositadas uma sedimentar (Formação Botucatu) e uma vulcânica (Formação Serra Geral), ambas influenciadas pela abertura do Oceano Atlântico, que gerou um novo elemento estrutural com direção E - W (MACHADO, 2005).

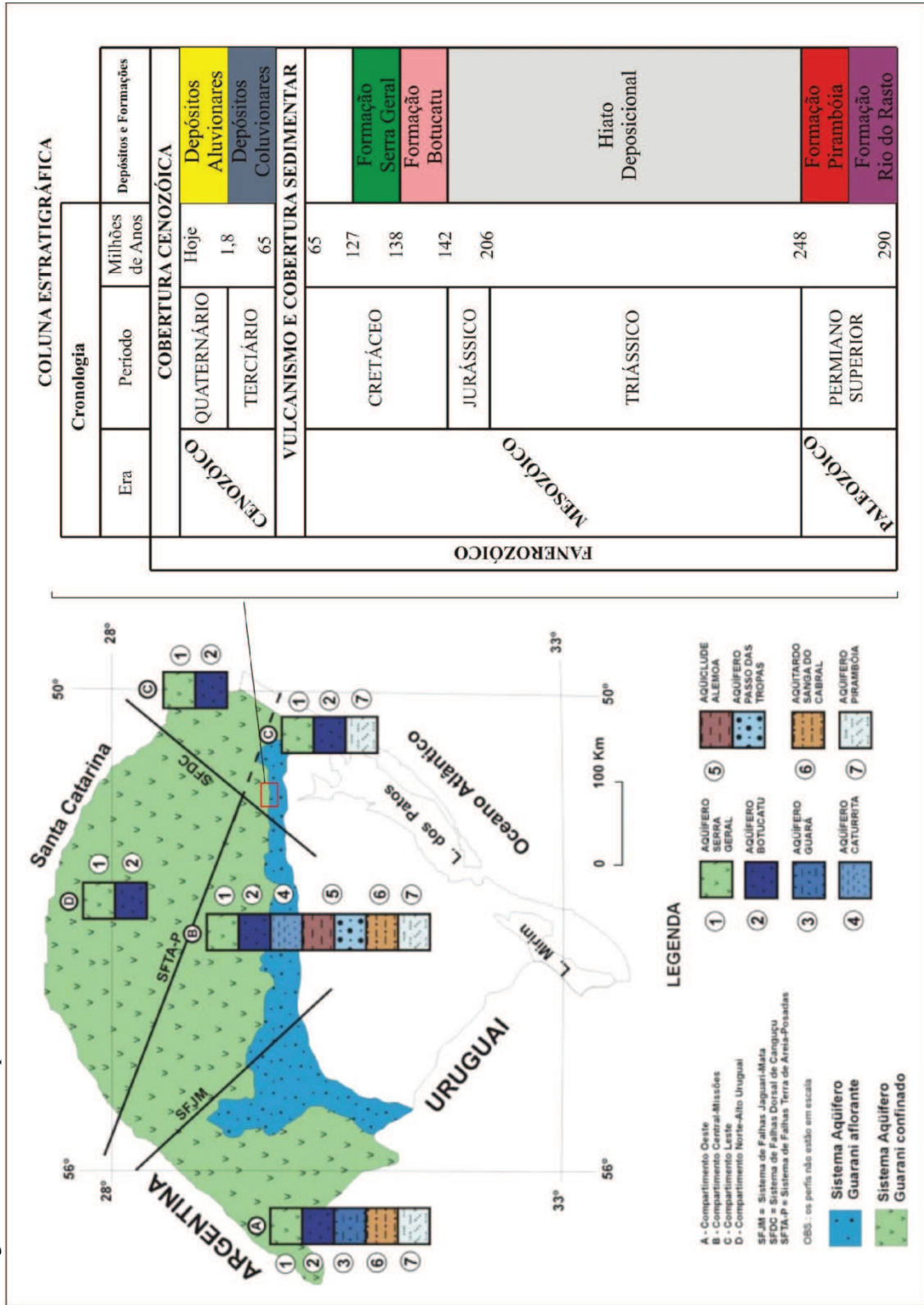
A compartimentação do SAG no Rio Grande do Sul, segundo Machado (2005), é devido aos elementos estruturais anteriormente descritos, estando a área de estudo condicionada pelos Sistemas de Falhas Dorsal de Canguçu – SFDC (NE) e Sistema de Falhas Terra de Areia-Posadas - SFTA-P (NW). A sub-bacia do Arroio Portão está localizada na parte sul do Bloco leste (Figura 20).

Figura 19 – Localização da área da sub-bacia do Arroio Portão na América do Sul e no Rio Grande do Sul.



Fonte: Elaborada pelo autor.

Figura 20 – Compartimentação do SAG no Estado do Rio Grande do Sul, com a coluna estratigráfica regional. A área de estudo está demarcada no retângulo em vermelho na parte sul do Bloco Leste.



Fonte: Modificada de Machado (2005)

Na Bacia Hidrográfica do Rio dos Sinos, através da interpretação de imagens de satélite, Heine (2008) identificou lineamentos com 10 a 15 km de extensão, os quais caracterizam três sistemas predominantes: N10° - 60° E (61%), N 40° - 70°W (34%) e E - W (5%) (Figura 21).

Há significativas variações regionais de espessura do Sistema Aquífero Guarani na Bacia do Rio dos Sinos. Segundo Goldberg (2003), a Formação Pirambóia varia de 50m de espessura atingindo até 100m (Figura 22), e a Formação Botucatu varia de 50m até 160m. As variações de espessura podem estar associadas ao paleo-relevo e a movimentações dos blocos tectônicos do Permiano ao Cretáceo.

Formação Rio do Rasto – Permiano / Triássico

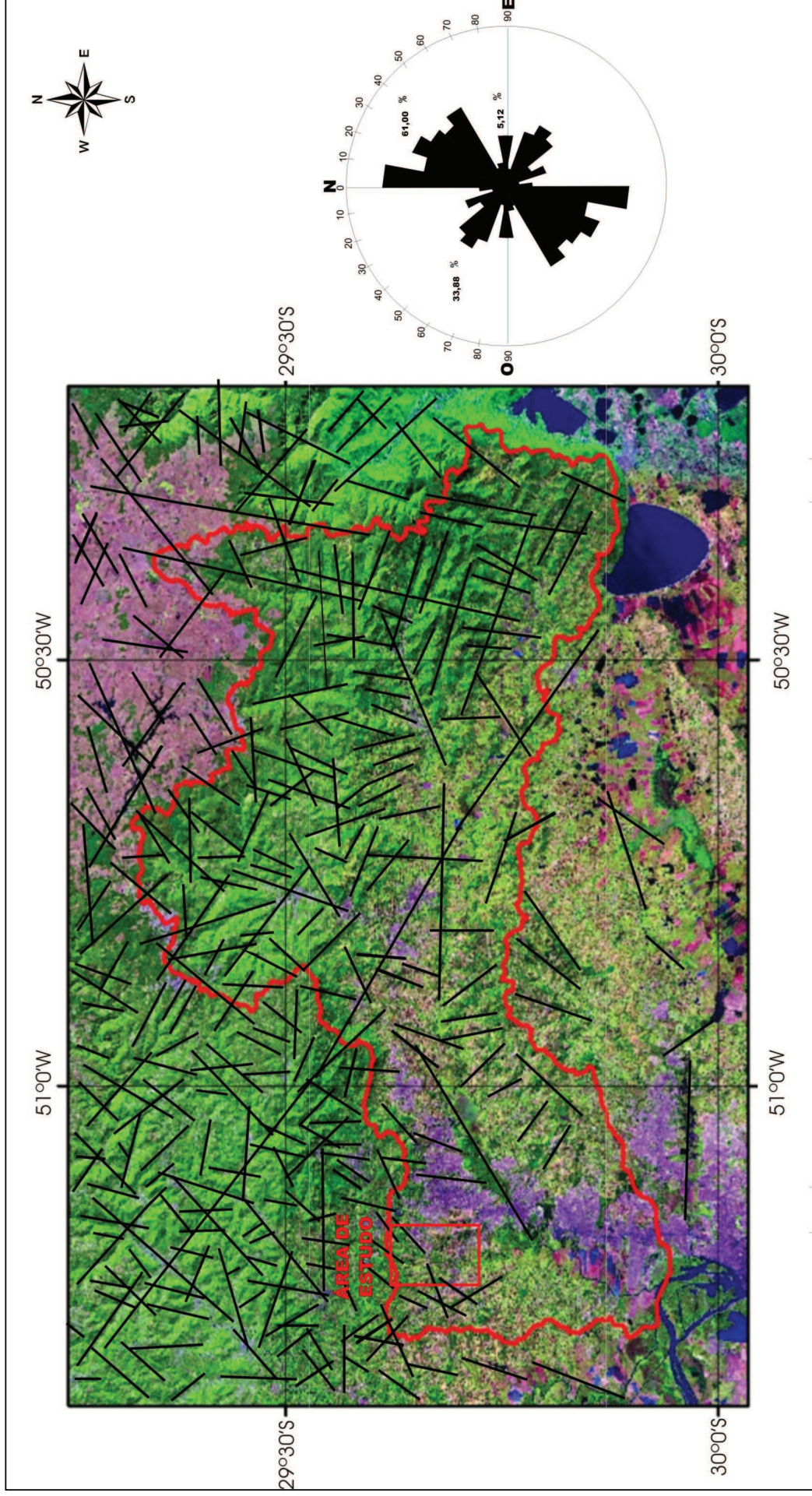
White (1908 apud CPRM, 2002) descreveu argilitos e siltitos vermelhos, usando o termo Rio do Rasto para denominar esta sequência sedimentar, que se localiza no rio homônimo próximo à cidade de Lauro Müller em Santa Catarina. Gordon (1947) posteriormente elevou o Rio do Rasto para formação, dividindo-a em membro inferior Serrinha e superior Morro Pelado, os dois aflorando desde o Rio Grande do Sul até o Paraná.

O Membro Serrinha, constituído por arenitos finos, bem selecionados, avermelhados, intercalados a siltitos e argilitos esverdeados e arroxeados, podendo ocorrer localmente lentes de calcário. Schneider et al. (1974) classificaram as litologias como avanços progradacionais de clásticos de planícies de marés, caracterizando um ambiente de transição entre os depósitos de águas rasas da Formação Teresina e os continentais do Membro Pelado.

O Membro Morro Pelado é constituído por lentes de arenitos finos, avermelhados, intercalados em siltitos e argilitos arroxeados. O ambiente deposicional para Schneider et al. (1974) é continental, com sedimentos lagunares e de planícies aluviais, sendo recobertos por dunas de areia sob condições climáticas áridas.

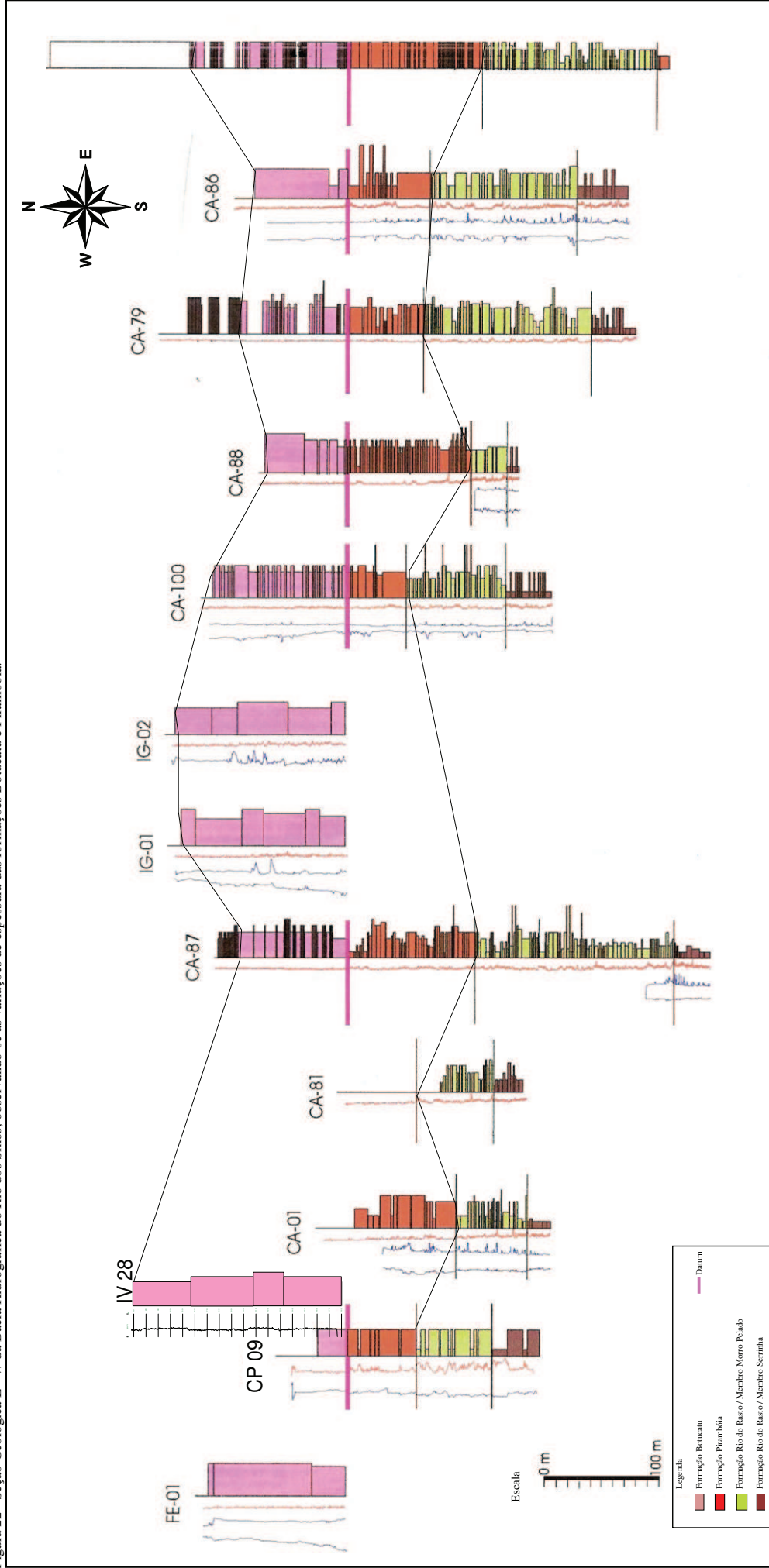
A Formação Rio do Rasto apresenta contato por discordância erosiva com a Formação Pirambóia, que lhe é sobrejacente, e transicional com a Formação Teresina, que lhe é subjacente. O contato entre o Membro Serrinha e o Membro Morro Pelado é concordante e gradacional, e o conteúdo fóssilífero encontrado nos mesmos permitiu posicionar a Formação Rio do Rasto entre o Permiano Superior e o Triássico (SCHNEIDER et al., 1974).

Figura 21 – Lineamentos estruturais da Bacia do Rio dos Sinos (composição colorida LANDSAT - TM 3/4/5), e o diagrama de roseta com a distribuição de frequência do número de lineamentos.



Fonte: Modificada de Heine (2008).

Figura 22 - Seção Geológica E - W da Bacia Hidrográfica do Rio dos Sinos, observando-se as variações de espessura das formações Botucatu e Pirambóia.



Fonte: Modificada de Goldberg (2003).

Formação Pirambóia – Permiano / Triássico

Com a ausência do registro triássico correspondente às formações Sanga do Cabral, Santa Maria e Caturrita, o contato basal da Formação Botucatu com a Formação Pirambóia corresponde a uma discordância regional (ZALÁN et al., 1987). Segundo Goldberg (2003), há uma variação regional da espessura na Formação Pirambóia podendo atingir até 100 metros de espessura. Essa formação, juntamente com a parte inferior da Formação Sanga do Cabral, foi depositada no final do Permiano ao início do Triássico (LAVINA; FACCINI; RIBEIRO, 1993).

Afirmam Faccini, Giardin e Machado (2003), que a Formação Pirambóia é constituída por arenitos finos a médios, sendo as estratificações cruzada (Figura 23 - A), acanalada, tangencial e planar, de médio a grande porte (campos de dunas eólicas), intercalados de duas fácies distintas de interdunas: arenitos finos a médios, com estratificação plano-paralela e por vezes lentes de pelitos e siltitos. Essas duas ocorrem intercaladas aos campos de dunas eólicas.

O sistema deposicional definido para a Formação Pirambóia segundo Faccini, Giardin e Machado (2003) é de um sistema eólico úmido, com evidências de exposição do nível freático entre seus depósitos de dunas eólicas e interdunas, essas representadas por arenitos bioturbados, laminações contorcidas por fluidização e presença de pelitos.

Um dos critérios utilizados para distinção entre as formações Botucatu e Pirambóia é o fato de esta última apresentar, além de um ambiente mais úmido, também paleocorrente para sul.

Formação Botucatu - Cretáceo

A Formação Botucatu (Figura 23 - B) estende-se abaixo dos derrames da Formação Serra Geral, ocorrendo no Estado do Rio Grande do Sul em espessuras variáveis, podendo atingir até 150 metros de espessura na porção leste do estado (FACCINI; GIARDIN; MACHADO, 2003).

Como os basaltos da Formação Serra Geral têm idades da ordem de 138 Ma até 127 Ma, conforme obtido por Stewart et al. (1996), através de datações $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$, a Formação Botucatu passou a ser considerada de idade cretácea.

A Formação Botucatu, segundo Assine, Piranha e Carneiro (2004), é constituída essencialmente por arenitos bimodais, finos a médios, quartzosos, sendo as estratificações

cruzada, planar ou acanalada, de médio a grande porte (campos de dunas eólicas). São raras as intercalações de arenitos com estratificação plano-paralela (interdunas secas). Essa associação é característica de sistemas eólicos secos, onde o nível freático encontra-se constantemente baixo, com predominância de dunas eólicas e raros depósitos de interdunas. O deserto Botucatu pode ser comparado a várias partes do atual deserto do Saara (KOCUREK; HAVHOLM, 1993).

O padrão dominante das paleocorrentes e interdunas N - NE e a aridez caracterizam a Formação Botucatu, sendo critério para diferenciá-la da Formação Pirambóia subjacente.

Formação Serra Geral - Cretáceo

A Formação Serra Geral tem sua idade atribuída ao Cretáceo Inferior, mais precisamente de 138 Ma até 127 Ma (STEWART et al., 1996), sendo constituída por uma série de derrames de lavas básicas toleíticas, intercaladas com alguns derrames andesíticos e riodacíticos, especialmente em direção ao topo da sequência (ROISENBERG; VIERO, 2000). A espessura média desse pacote vulcânico é de 800 metros, podendo atingir até 1500 metros.

Esse magmatismo apresenta diferentes fácies, variando na sua composição, dados geocronológicos e características texturais, possibilitando dividi-lo em oito fácies distintas: Jaguarão, Alegrete, Esmeralda, Parapanema, Caxias, Chapecó, Gramado e Várzea do Cedro (CPRM, 2004).

As rochas vulcânicas da Formação Serra Geral (Figura 23 - C) recobrem os arenitos eólicos da Formação Botucatu (GORDON, 1947), sendo este contato abrupto e com frequente metamorfismo térmico dos arenitos, fenômeno que pode variar de alguns centímetros até mais de metro.

Depósitos Colúvio-Aluvionares – Terciário

Esses depósitos são constituídos por areias-argilosas e argilas-arenosas, com presença eventual de seixos e matacões, ocorrendo ao longo das encostas da região.

Depósitos Aluvionares - Quaternário

Os depósitos aluvionares quaternários estão constituídos por sedimentos inconsolidados (argilas, areias e siltes) transportados pela água corrente, que se encontram na calha dos arroios.

Figura 23 – (A) Formação Pirambóia com estratificação cruzada (UTM = E 484.174 / N 6.712.031 no município de Portão/RS). (B) Formação Botucatu com estratificação cruzada de grande porte (UTM = E 484.273 / N 6.719.623, município de Estância Velha/RS). (C) Rochas basálticas da Formação Serra Geral (UTM = E 485.624 / N 6.722.119 - Pedreira da Incopel, município de Estância Velha/RS).



Fonte: Elaborada pelo autor.

Hidroestratigrafia

As unidades hidroestratigráficas que ocorrem na área em estudo são: Aquífero Serra Geral, Aquífero Botucatu e Aquífero Pirambóia.

Aquífero Pirambóia

O Aquífero Pirambóia é constituído basicamente por arenitos menos porosos, apresentando porosidade total de 9% (GOLDBERG, 2003). Na ocorrência de níveis argilosos (Figura 24 - A), diminui o valor da condutividade hidráulica $5,32 \times 10^{-5}$ a $1,15 \times 10^{-7}$ m/s (HEINE, 2008).

Aquífero Botucatu

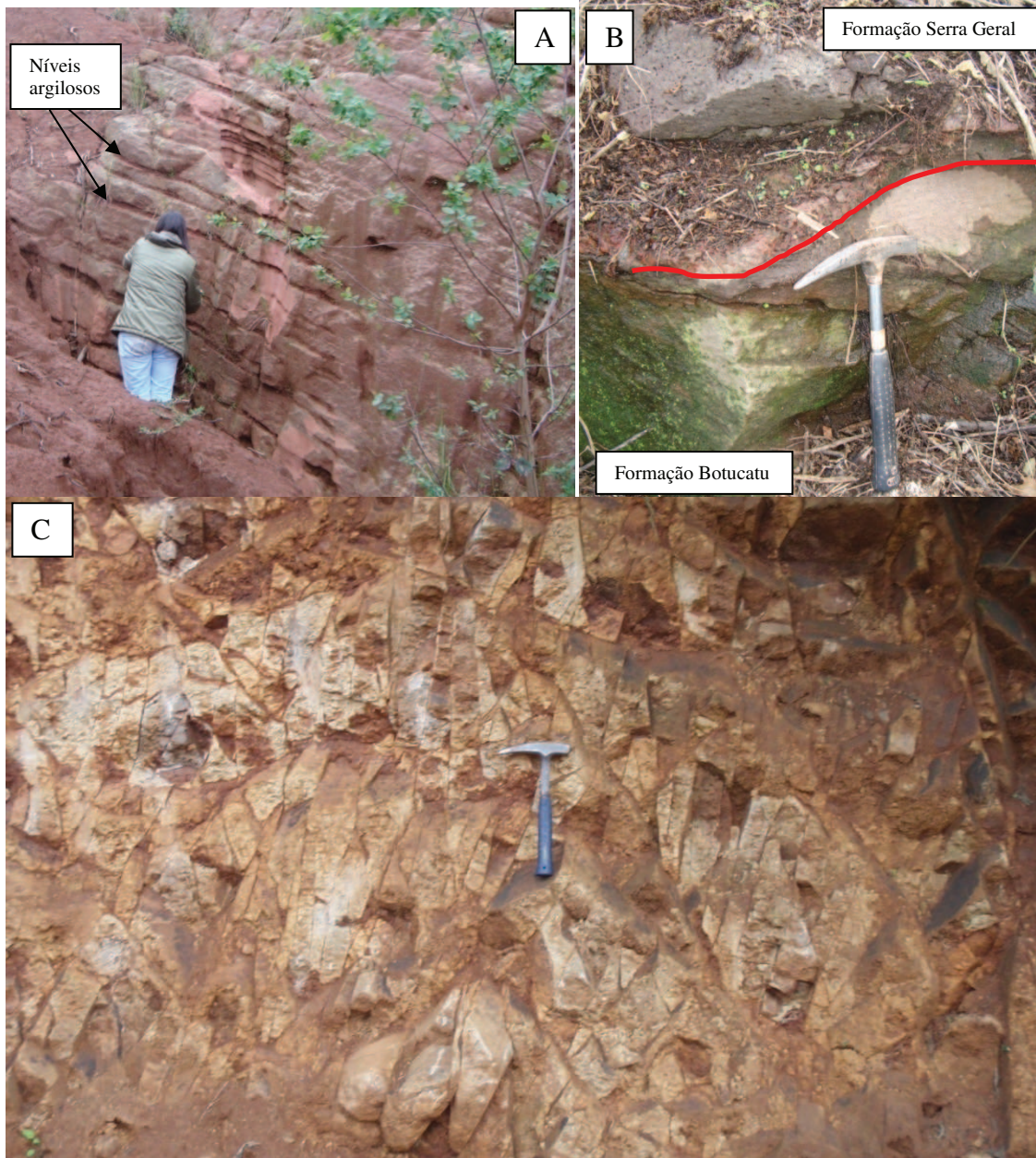
É um sistema aquífero sedimentar, permeável por porosidade intergranular, podendo apresentar teores de argila. A porosidade total média de 10,5% encontrada por Goldberg (2003) nos arenitos na Bacia do Rio dos Sinos é quase que exclusivamente secundária, gerada pela dissolução meteórica de feldspatos e cimentos. Os valores de condutividades hidráulicas ficam na ordem de $1,6 \times 10^{-5}$ a $8,0 \times 10^{-6}$ m/s na região de Santo Antônio da Patrulha (HAUSMAN, 1995). No contato do Botucatu com as rochas vulcânicas, existe uma silicificação do arenito, ocorrendo a circulação da água somente nas fraturas (Figura 24 - B).

Aquífero Serra Geral

As rochas vulcânicas, no norte da área em estudo, apresentam um forte controle estrutural, com presença de falhas e fraturas com direções principais NE e NW. Essas fraturas, subverticais, geram uma porosidade secundária que localmente funcionam como área de recarga do SAG.

Zona de falhas geram alteração do basalto (Figura 24 - C), tornando-se um ponto vulnerável ao avanço da infiltração de águas superficiais, podendo constituir zonas de recarga para o Sistema Aquífero Guarani. Os valores de condutividade hidráulica para o Aquífero Serra Geral situam-se na ordem 10^{-3} até 10^{-7} m/s (MACHADO, 2005).

Figura 24 – (A) Arenito com intercalações de níveis argilosos e arenosos no Aquífero Pirambóia (UTM = E 480.991 / N 6.709.318). (B) Arenito silicificado no topo do Aquífero Botucatu em contato com o Aquífero Serra Geral (UTM = E 474.539 / N 6.719.410). (C) Zona de falha, no Aquífero Serra Geral intensamente alterada e fraturada, com predominância de fraturas subverticais (UTM = E 474.600 / N 6.718.650).



Fonte: Elaborada pelo autor.

5 ANÁLISE DOS RESULTADOS

São a seguir analisadas estratigrafia, geometria, características físicas e mineralógicas, estrutura, relações de contato e paleocorrentes das formações constituintes do SAG na área de estudo. Em seguida, considerando esses fatores, analisa-se o condicionamento geológico e a distribuição espacial da porosidade e permeabilidade desse sistema aquífero.

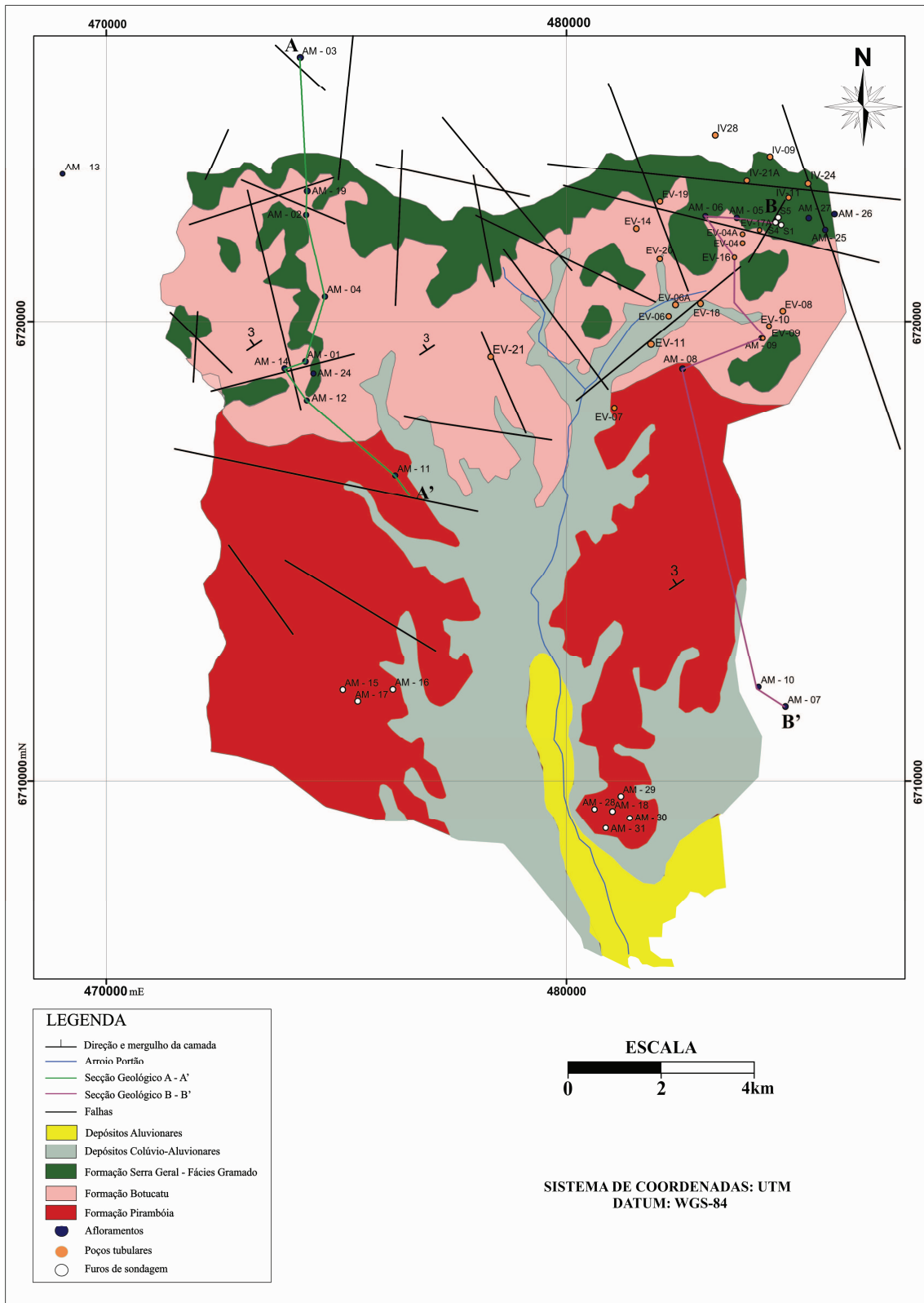
5.1 ESTRATIGRAFIA, GEOMETRIA, CARACTERÍSTICAS FÍSICAS E MINERALÓGICAS

Como referido na caracterização geral da área (Item 4.1), o SAG encontra-se localmente constituído por arenitos eólicos do Cretáceo e Permiano Superior, verificando-se, portanto, um hiato deposicional durante o Triássico e o Jurássico. Essas unidades, correspondentes às formações Pirambóia e Botucatu, são aflorantes na área, conforme o mapa geológico (Figura 25), estando limitada no topo pelas rochas efusivas da Formação Serra Geral (Cretáceo) e na base pela Formação Rio do Rasto (Permiano Superior).

Estimando-se uma geometria aproximadamente tabular e uma atitude regional N 45° E / 3° NW, obteve-se a seção geológica A - A' (Figura 26), onde observa-se a ocorrência de rejeitos da ordem de 20m entre blocos adjacentes. A espessura de 130m determinada para a Formação Botucatu entre os pontos B₁ e B₂ na seção geológica A - A' (Figura 26) é da mesma ordem das espessuras encontradas por Heine (2008) e Goldberg (2003). Entretanto, a espessura de 210m estimada na Seção B - B' para a Formação Pirambóia difere dos 160m encontradas por Goldberg (2003) em áreas próximas. A espessura total do SAG na área de estudo pode ser estimada como igual ou superior a 340m, não considerando os movimentos relativos entre blocos tectônicos.

A coluna estratigráfica elaborada a partir dos dados de campo é apresentada na Figura 27.

Figura 25 – Mapa geológico da sub-bacia do Arroio Portão, com indicação dos pontos de amostragem, localização de poços tubulares e sondagens rotativas.



Fonte: Mapa geológico compilado de Wildner et al. (2008).

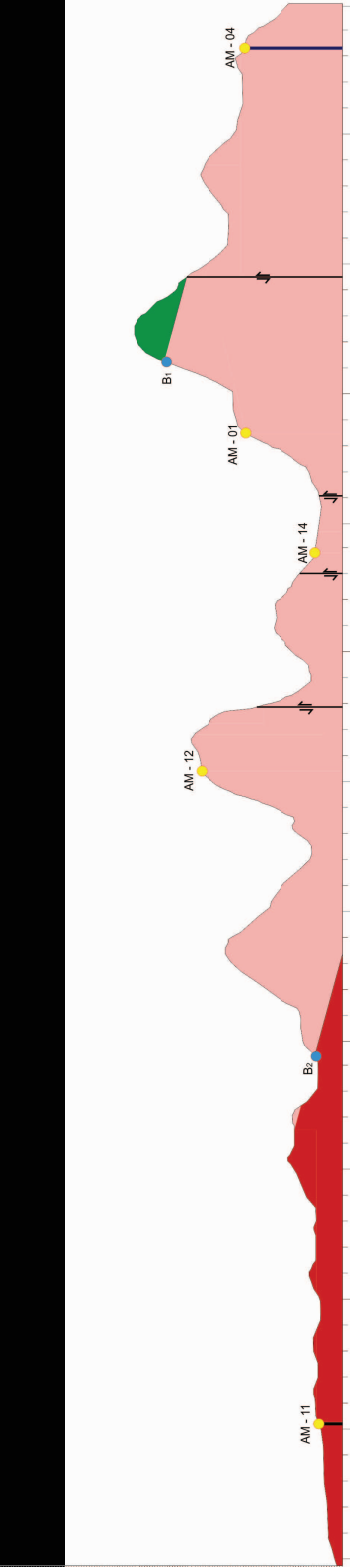
Seção Geológica A - A'

NW

A'

Cotas topográficas (m)

180
160
140
120
100
80
60
0



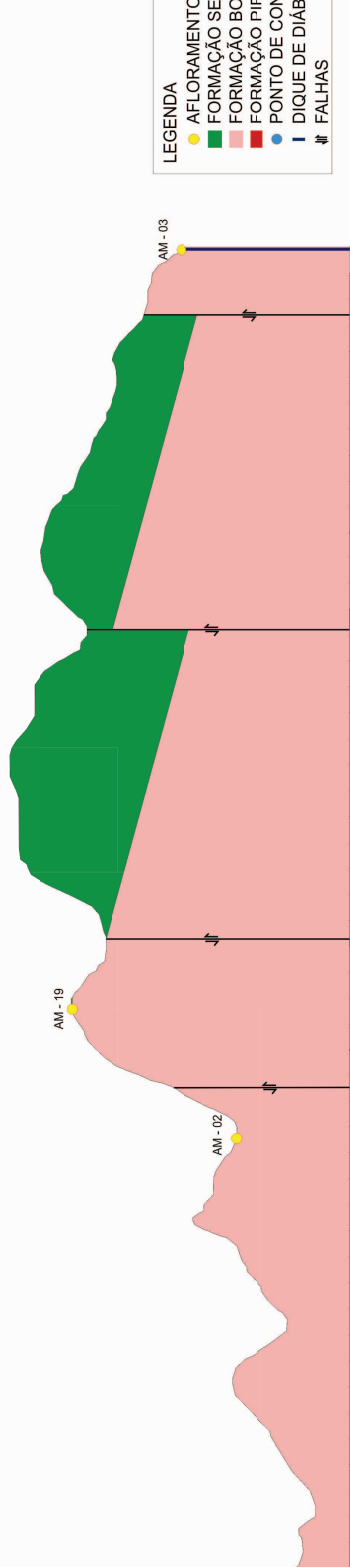
Distâncias acumuladas (m)

6.000
5.000
4.000
3.000
2.000
1.000
0

S

Cotas topográficas (m)

180
160
140
120
100
80
60
6.000



Distâncias acumuladas (m)

11.000
10.000
9.000
8.000
7.000
6.000

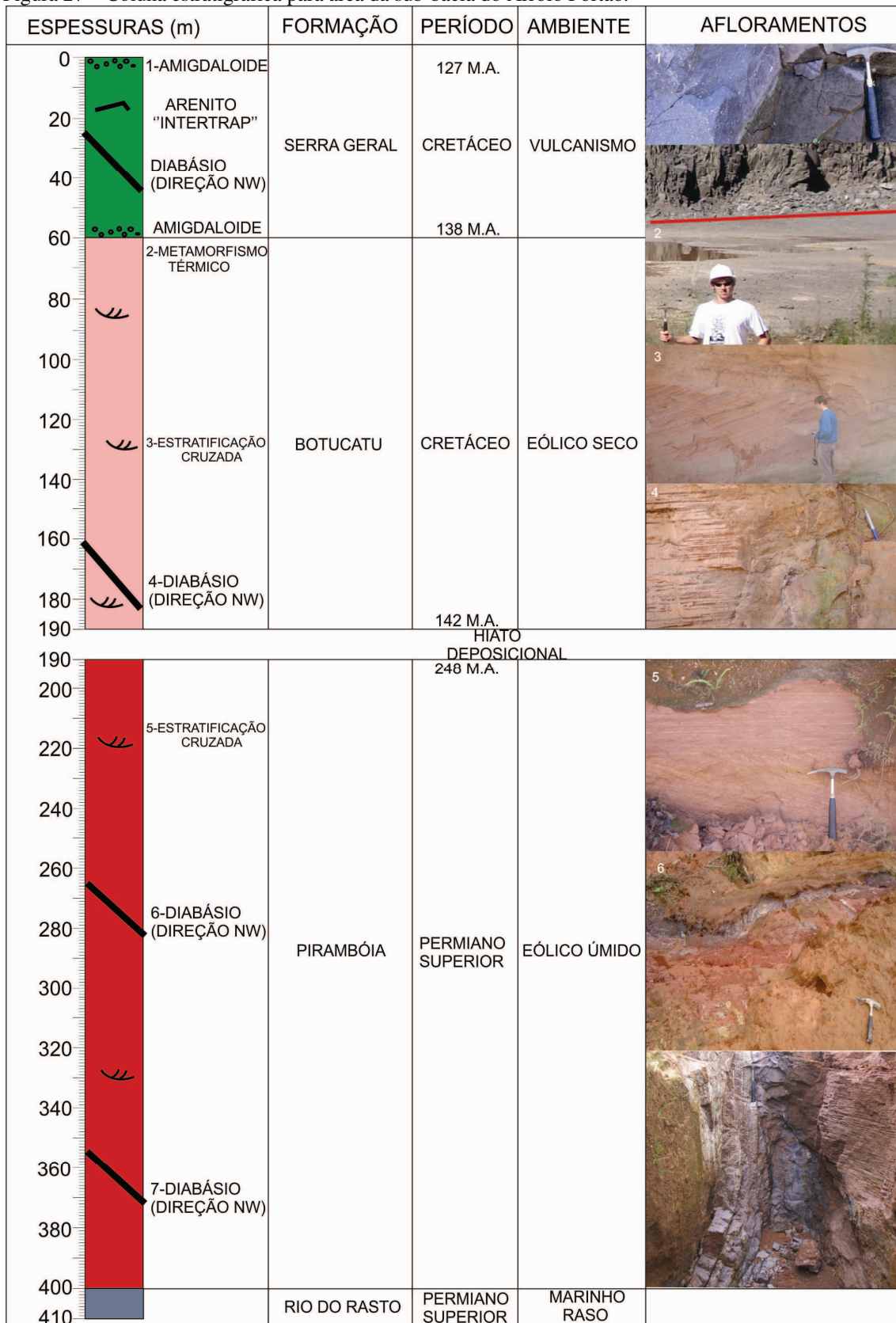
LEGENDA

- AFLORAMENTOS
- FORMAÇÃO SERRA GERAL
- FORMAÇÃO BOTUCATU
- FORMAÇÃO PIRAMBÓIA
- DIQUE DE DIÁBÁSIO
- FALHAS



Fonte: Elaborada pelo autor.

Figura 27 – Coluna estratigráfica para área da sub-bacia do Arroio Portão.



Fonte: Elaborada pelo autor.

Formação Rio do Rasto (Permiano Superior)

As rochas dessa formação não são aflorantes na área. Entretanto, através da análise de poços tubulares da CORSAN em Estância Velha/RS, Heine (2008) inferiu uma espessura superior a 50m. Da mesma forma, utilizando poços da CPRM próximos à área de estudo, Goldberg (2003) inferiu espessuras máximas da ordem de 50m.

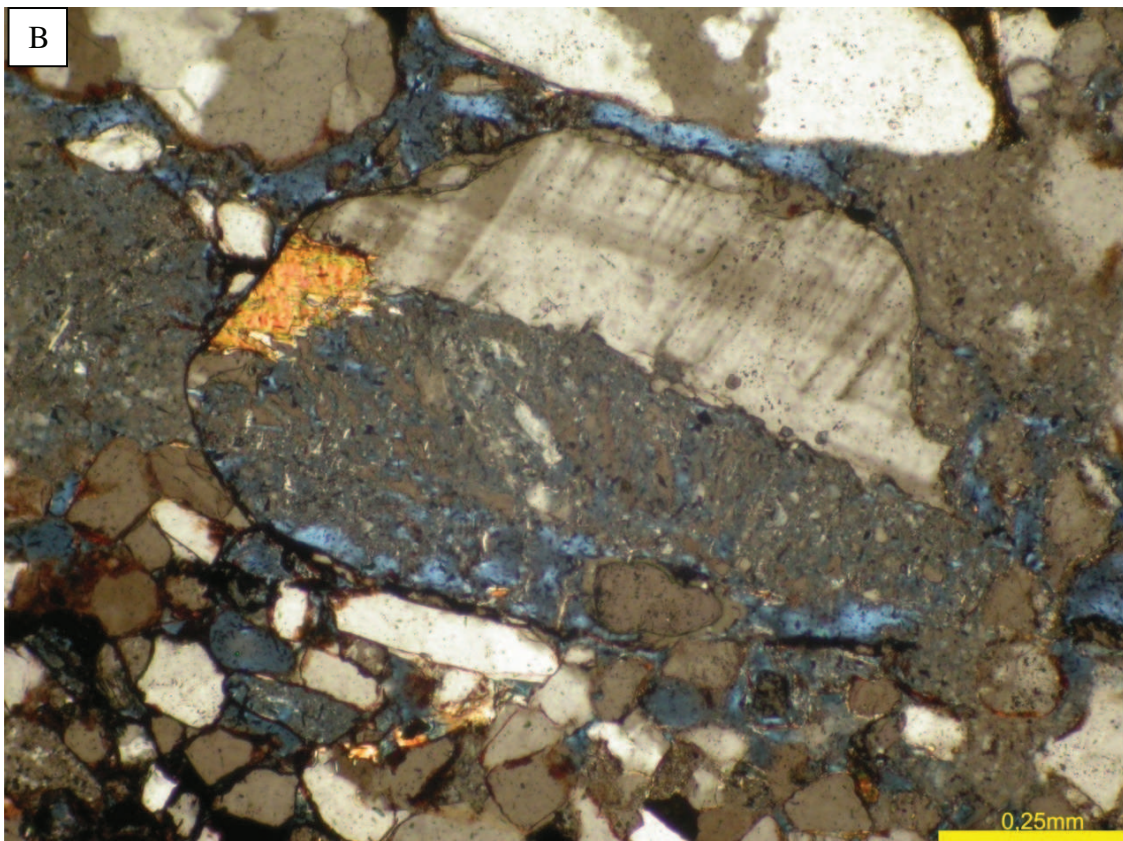
Essa formação, conforme Machado (2005), está constituída por 60% de pelitos e 40% arenitos finos, com condutividade hidráulica baixa a muito baixa, caracterizando-se como um aquífero limitado e limitando o fluxo subterrâneo na base do SAG.

Formação Pirambóia (Permiano Superior)

Essa formação é constituída por arenitos avermelhados a vermelho-rosados, com predomínio das frações areia fina a média e teores variáveis de silte e argila, apresentando estratificação cruzada acanalada de grande porte, onde se observam frequentes níveis esbranquiçados ao longo da estratificação (Figura 28 - A), esses decorrentes da caulinitização dos feldspatos.

A alteração dos feldspatos é um processo disseminado nessa formação, sendo responsável pela neoformação de argilominerais, predominantemente de caulinita, os quais contribuem para a redução da porosidade primária. Esse processo, quando observado microscopicamente (Figura 28 - B), mostra maior intensidade ao longo dos contatos entre estratos com diferentes tamanhos de grão, o que sugere que há maior fluxo da água subterrânea ao longo dos planos de estratificação, do que no sentido transversal aos mesmos. Essas características indicam que aquífero apresenta anisotropia condicionando o fluxo da água subterrânea à estratificação. A anisotropia está condicionada pela orientação dos estratos, bem como pela orientação das paleocorrentes.

Figura 28 – (A) Arenitos avermelhados com estratificação cruzada acanalada da Formação Pirambóia. Observam-se níveis esbranquiçados coincidentes com a estrutura interna da rocha, os quais são atribuídos à alteração dos feldspatos (UTM = E 484.755 / N 6.711.604 - município de Portão/RS). (B) Caulinitização de feldspatos nos arenitos da Formação Pirambóia. Observa-se o contato de grãos arredondados e bem selecionados, com grãos angulosos e com seleção moderada. Ao centro da micrografia (LP 10X), observa-se intensa alteração de um grão de feldspato (UTM = E 480.991 / N 6.709.318 amostra AM – 18, município de Portão/RS).



Fonte: Elaborada pelo autor.

As análises granulométricas dos arenitos da Formação Pirambóia mostraram uma nítida seleção dos grãos, o que é retratado nos ensaios granulométricos (Quadro 02), verificando-se uma predominância da fração areia fina (66%). A composição mineralógica observada nas lâminas petrográficas é predominantemente quartzosa, ocorrendo ainda de feldspato alcalino, plagioclásio, fragmentos líticos e minerais opacos.

Tabela 02 – Características granulométricas dos arenitos da Formação Pirambóia (15 amostras). d_{10} = Diâmetro máximo correspondente a 10% em peso da amostra total. Analogamente, d_{20} , d_{50} e d_{60} correspondem ao diâmetro máximo das frações de 20%, 50% e 60% em peso da amostra total. O coeficiente de uniformidade é definido por $Cu = d_{60} / d_{10}$. Observa-se um elevado desvio-padrão para o coeficiente de uniformidade e para a fração argila.

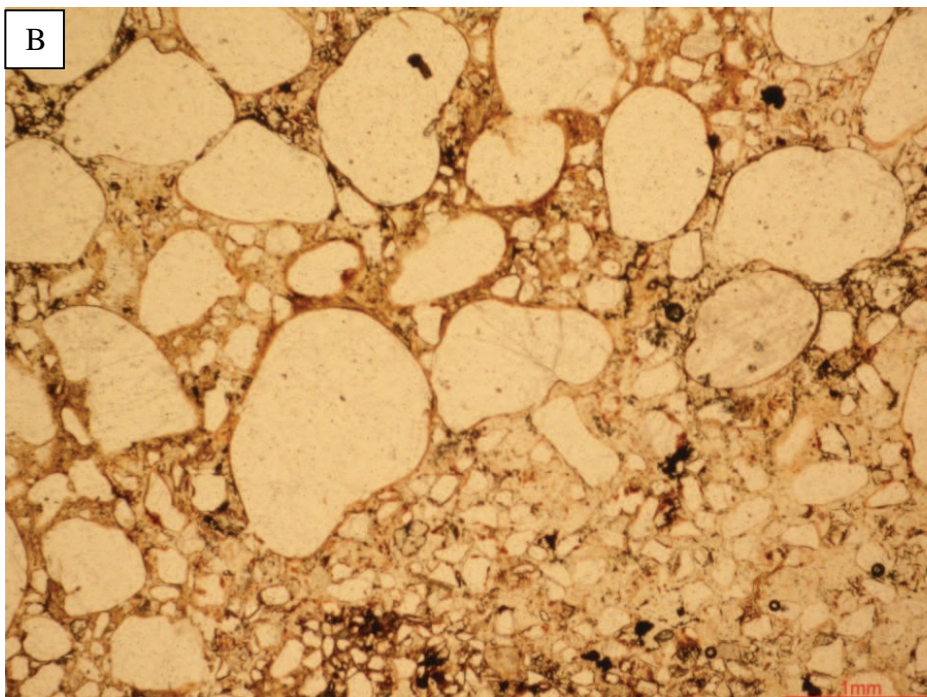
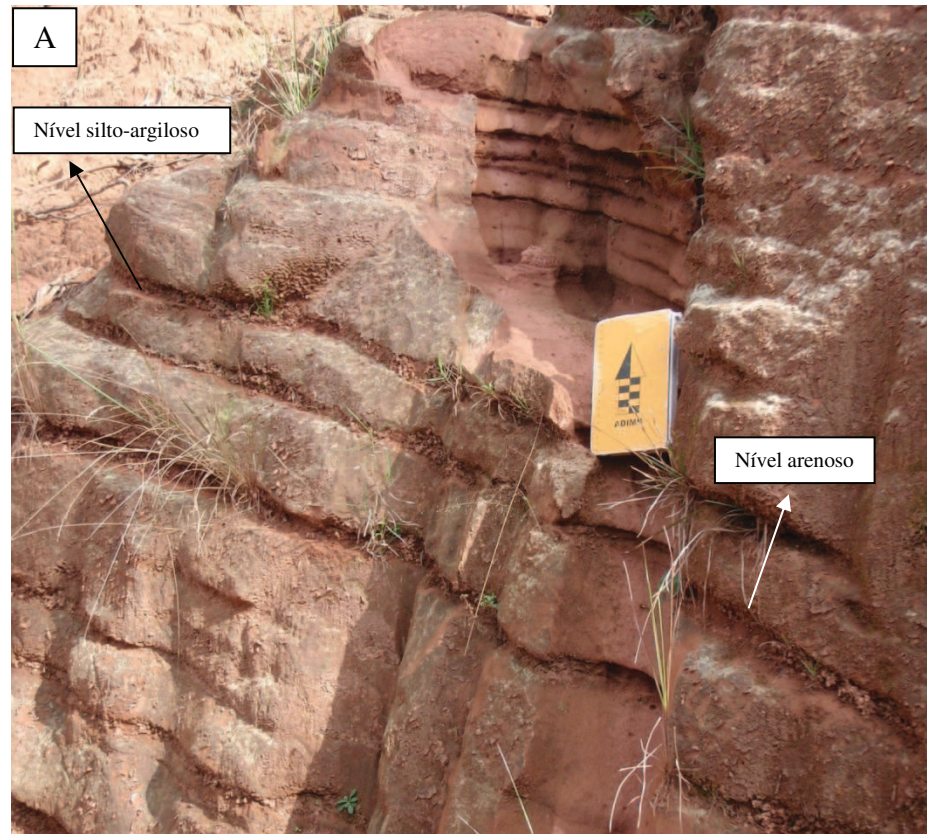
	MÍNIMO	MÁXIMO	MÉDIA	DESVIO-PADRÃO
ARGILA (%)	0	6	1	1,933
SILTE (%)	9	24	16	4,483
AREIA FINA (%)	51	81	66	8,184
AREIA MÉDIA (%)	9	36	16	6,947
AREIA GROSSA (%)	0	0	0	0,000
d_{10} (mm)	0,009	0,055	0,026	0,013
d_{20} (mm)	0,023	0,178	0,072	0,044
d_{50} (mm)	0,070	0,350	0,147	0,092
d_{60} (mm)	0,074	0,405	0,210	0,095
Cu (Coeficiente de Uniformidade)	3,76	31,00	9,78	6,56

Fonte: Elaborada pelo autor.

Os afloramentos apresentam uma intercalação de níveis arenosos e níveis silto-argilosos (Figura 29 - A), microscopicamente apresentam uma bimodalidade granulométrica (Figura 29 - B). Uma característica marcante dos arenitos dessa formação é a frequente ausência de cimentação, tornando essas rochas friáveis (Figura 30 – A e B).

As características observadas macro e microscopicamente são coerentes com o sistema dunas eólicas e depósitos de interdunas úmidos atribuído por Faccini, Giardin e Machado (2003) a essa formação. As relações de contato de topo e base dessa formação não foram identificadas no campo ou em testemunhos de sondagem, somente em foto aérea e imagem de satélite.

Figura 29 – (A) Na Formação Pirambóia, ocorre uma intercalação de níveis arenosos e níveis silto-argilosos. A erosão superficial remove mais intensamente os níveis de granulometria mais fina (UTM = E 480.991 / N 6.709.318 - município de Portão/RS). (B) Contato de estratos com diferentes tamanhos de grão, caracterizando a bimodalidade granulométrica dos arenitos (LN 4X). Os estratos mais grossos têm grãos bem arredondados, de tamanho areia média a grossa, em contato com estratos de areia fina e silte com grãos predominantemente angulosos e de seleção moderada. A cimentação é dada por películas de óxido de ferro de cor marrom-avermelhada envolvendo os grãos (UTM = E 481.547 / N 6.718.332 município, de Portão/RS).



Fonte: Elaborada pelo autor.

Figura 30 – (A) Arenitos finos e friáveis da Formação Pirambóia com estratificação cruzada de grande porte. Observam-se níveis esbranquiçados ao longo da estratificação (UTM = E 484.174 / N 6.712.031 - município de Portão/RS). (B) Arenitos finos com níveis silto-argilosos. A ausência de cimentação torna essas rochas friáveis e vulneráveis à erosão hídrica superficial (UTM = E 476.276 / N 6.716.645 - município de Portão/RS).



Fonte: Elaborada pelo autor.

Formação Botucatu (Cretáceo)

Essa formação é constituída por arenitos amarelados a rosa-avermelhados, com predomínio das frações areia fina a média, apresentando estratificação cruzada de grande porte (Figura 31 - A). As análises granulométricas em 15 amostras apresentaram os resultados expressos no tabela 03.

Tabela 03 – Características granulométricas dos arenitos da Formação Botucatu (15 amostras). d_{10} = diâmetro máximo correspondente a 10% em peso da amostra total. Analogamente, d_{20} , d_{50} e d_{60} correspondem ao diâmetro máximo das frações de 20%, 50% e 60% em peso da amostra total. O coeficiente de uniformidade é definido por $Cu = d_{60} / d_{10}$.

	MÍNIMO	MÁXIMO	MÉDIA	DESVIO-PADRÃO
ARGILA (%)	0	4	1	1,590
SILTE (%)	1	24	10	6,488
AREIA FINA (%)	42	83	66	10,301
AREIA MÉDIA (%)	3	42	23	9,309
AREIA GROSSA (%)	0	0	0	0
d_{10} (mm)	0,0100	0,0850	0,051	0,029
d_{20} (mm)	0,025	0,175	0,101	0,047
d_{50} (mm)	0,108	0,350	0,218	0,080
d_{60} (mm)	0,125	0,440	0,275	0,089
Cu	2,95	17,96	7,63	5,35

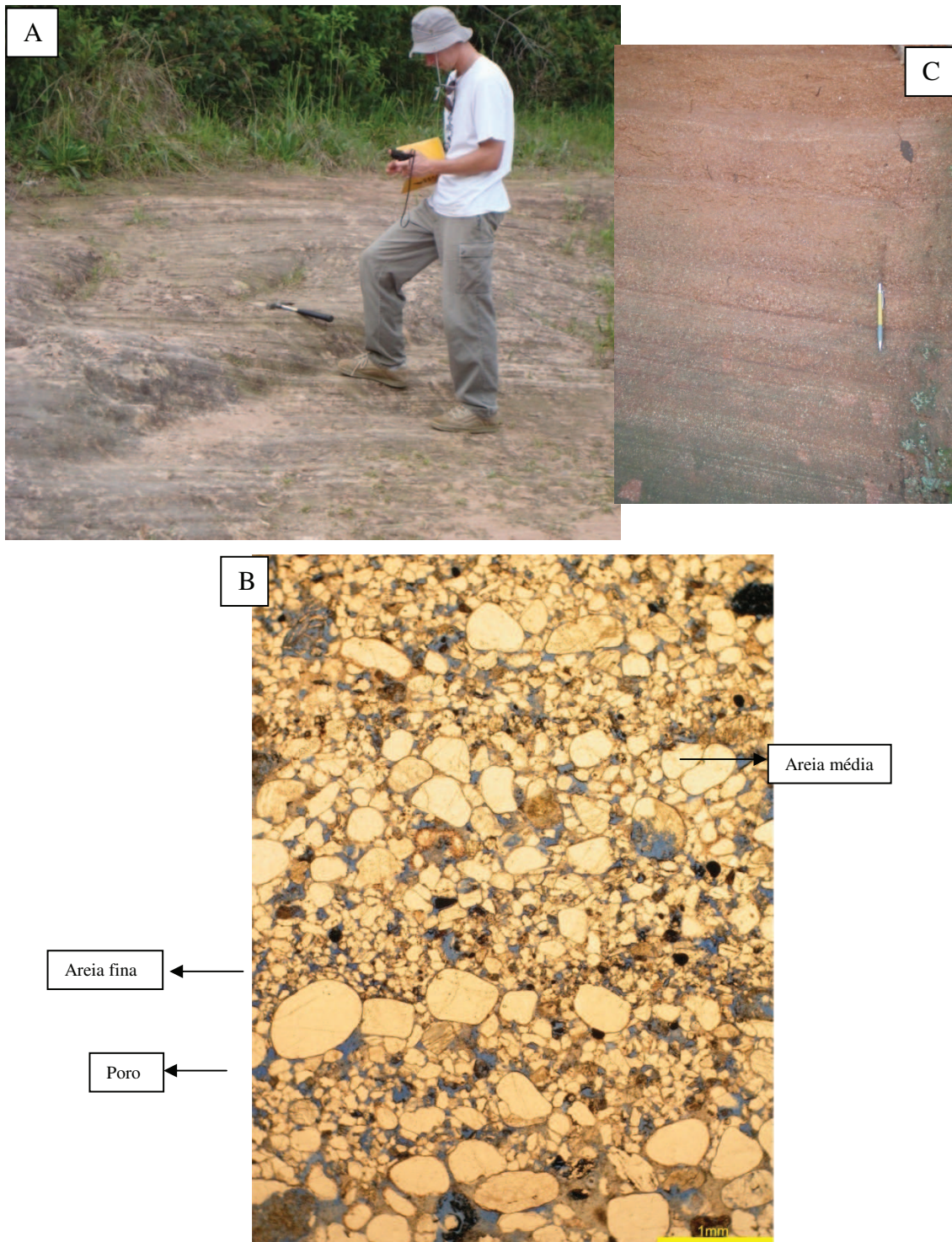
Fonte: Elaborada pelo autor.

A distribuição granulométrica desses arenitos apresenta um padrão bimodal coincidente com a estratificação (Figura 31 - B), intercalando-se níveis de areia média e de areia fina siltosa.

Há uma boa seleção dos grãos, verificando-se a predominância da fração areia fina (66%). A composição mineralógica observada nas lâminas petrográficas é predominantemente quartzosa com feldspato alcalino, plagioclásio, fragmentos líticos e minerais opacos.

A alteração dos feldspatos é um processo disseminado nessa formação, sendo responsável pela neoformação de argilominerais, predominantemente de caulinita, os quais contribuem para a redução da permeabilidade dos arenitos. Esse processo é observado macroscopicamente (Figura 31 - C), sendo mais intenso ao longo da superfície de contato entre estratos com diferentes tamanhos de grão.

Figura 31 – (A) Arenito fino a médio, rosa-avermelhado, com estratificação cruzada de grande porte e paleocorrente para NE. Observam-se níveis esbranquiçados ao longo da estratificação (UTM = E 474.358 / N 6.718.277 - município de Portão/RS). (B) Observa-se a distribuição granulométrica bimodal com intercalação de níveis de areia média e de areia fina. Os grãos maiores apresentam-se bem selecionados e com bom arredondamento, sendo os grãos menores angulosos e de seleção moderada (LN 4X). A amostra apresenta um empacotamento normal com contato pontual e na maioria dos grãos reto (UTM = E 483.700 / N 6.722.239 amostra AM – 05 município de Estância Velha/RS). (C) Arenito bimodal com estratificação cruzada acanalada (Formação Botucatu). Observam-se níveis esbranquiçados correspondentes à alteração dos feldspatos (UTM = E 483.700 / N 6.722.39 AM – 05 município de Estância Velha/RS).



Fonte: Elaborada pelo autor.

O contato da base dessa formação com a Formação Pirambóia não foi identificado no campo ou em testemunhos de sondagem. A Formação Botucatu é limitada no topo pelas rochas efusivas da Formação Serra Geral (Figura 32 - A), sendo por vezes preservada como arenitos “intertrap” entre derrames vulcânicos (Figura 32 -B).

Os arenitos, devido à recristalização do quartzo por metamorfismo térmico, apresentam acentuada cimentação e redução do espaço poroso intergranular na região do contato com as rochas vulcânicas (Figura 33 – A e B).

As diferenças de cimentação entre arenitos coerentes e friáveis são observáveis em afloramentos (Figura 34 – A e B).

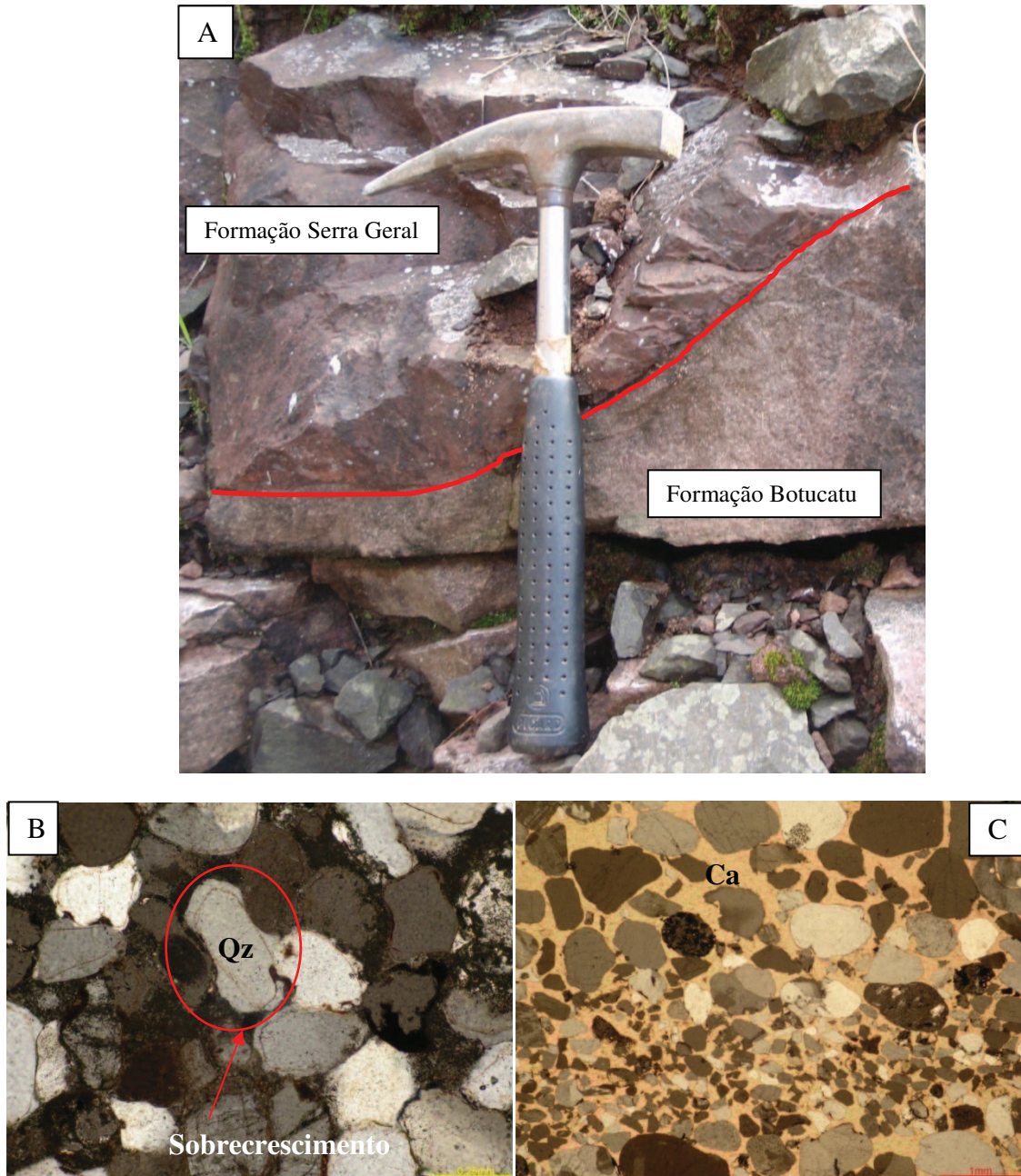
As características observadas macro e microscopicamente estão de acordo com o ambiente sedimentar eólico seco atribuído por (KOCUREK; HAVHOLM, 1993), os quais identificaram um sistema com depósitos de dunas eólicas e interdunas seco.

Figura 32 – (A) Contato entre os arenitos da Formação Botucatu e as rochas vulcânicas da Formação Serra Geral (UTM = E 474.539 / N 6.719.410 – Pedreira da Sultepa, município de Estância Velha/RS). (B) Arenito “intertrap” da Formação Botucatu preservado entre as efusivas da Formação Serra Geral, próximo ao contato dessas duas formações. A orientação geral da face do afloramento é N 15° W da direita para esquerda, (UTM = E 485.624 / N 6.722.119 - Pedreira da Incopel, município de Estância Velha/RS).



Fonte: Elaborada pelo autor.

Figura 33 – (A) Contato da Formação Botucatu com a Formação Serra Geral. Os arenitos sofreram efeito térmico, ocorrendo recristalização dos grãos de quartzo e o endurecimento da rocha (UTM = E 474.498 / N 6.718.853 Pedreira da Brasília Guaíba - Portão/RS). (B) Arenito fino quartzoso, com pouco feldspato alcalino, plagioclásio e fragmentos líticos. Os grãos se apresentam bem selecionados com uma redução da porosidade intergranular; pois os grãos estão sendo envolvidos por uma cimentação silicosa dada pelo sobrecrescimento do quartzo (Qz) (LP 10X) (UTM = E 474.357 / N 6.722.811 amostra AM – 19). (C) Grãos envolvidos por uma cimentação carbonática (Ca) (LN 4X) (UTM = E 480.602 / N 6.709.378 - município de Estância Velha/RS).



Fonte: Elaborada pelo autor.

Figura 34 – (A) Arenito coerente com estratificação cruzada de grande porte (UTM = E 485.624 / N 6.722.119 - município de Estância Velha/RS). (B) Arenito friável com estratificação cruzada de grande porte (UTM = E 473.871 / N 6.718.962 - município de Portão/RS).



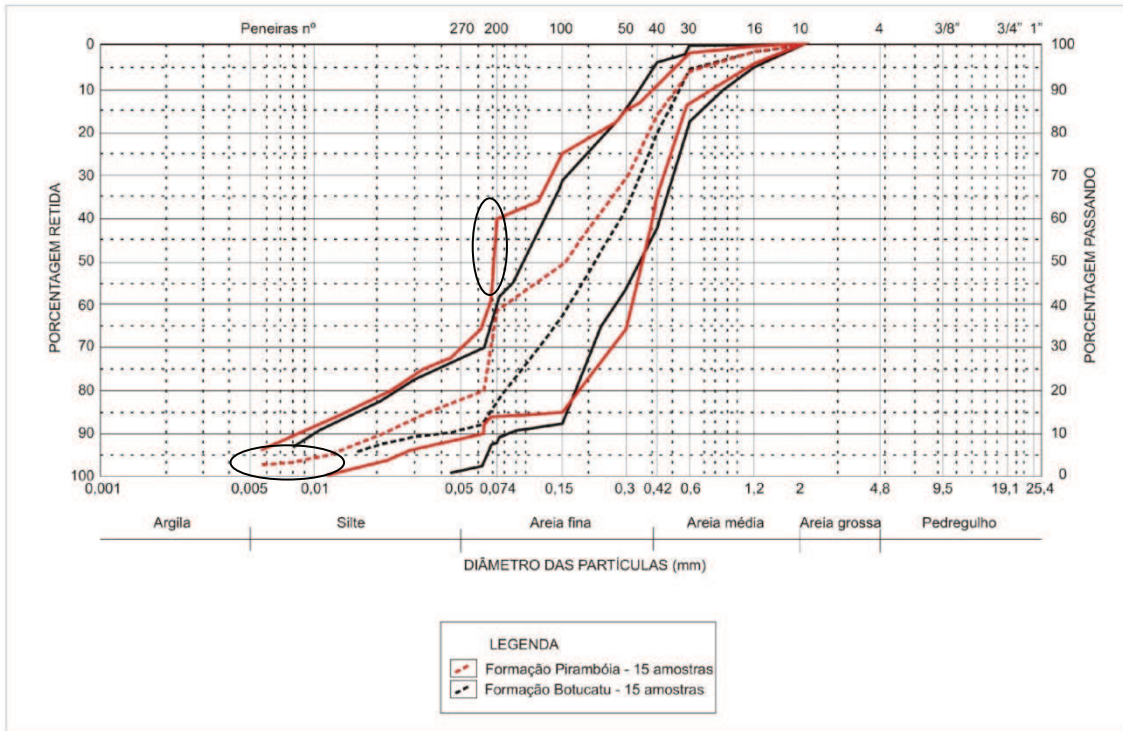
Fonte: Elaborada pelo autor.

As variações granulométricas entre os arenitos das formações Botucatu e Pirambóia, conforme referido pelos autores Assine, Piranha e Carneiro (2004) e Faccini, Giardin e Machado (2003), foram também detectadas nos ensaios granulométricos (Figura 35). Os arenitos da Formação Botucatu têm granulometria caracterizada por um maior teor de areia média, bem como menores teores de silte + argila e maior uniformidade. Por sua vez, as rochas da Formação Pirambóia apresentam predominância da fração areia muito fina, o que é caracterizado por uma variação abrupta da curva granulométrica (Figura 35) entre os diâmetros 0,05mm a 0,074mm.

Para a Formação Botucatu, predominam teores de 0% a 10% de silte + argila, com conteúdo correspondente de 90% a 100% de areia. Para a Formação Pirambóia, predominam teores de 15% a 20% de silte + argila e correspondentemente 80% a 85% de areia (Figura 36).

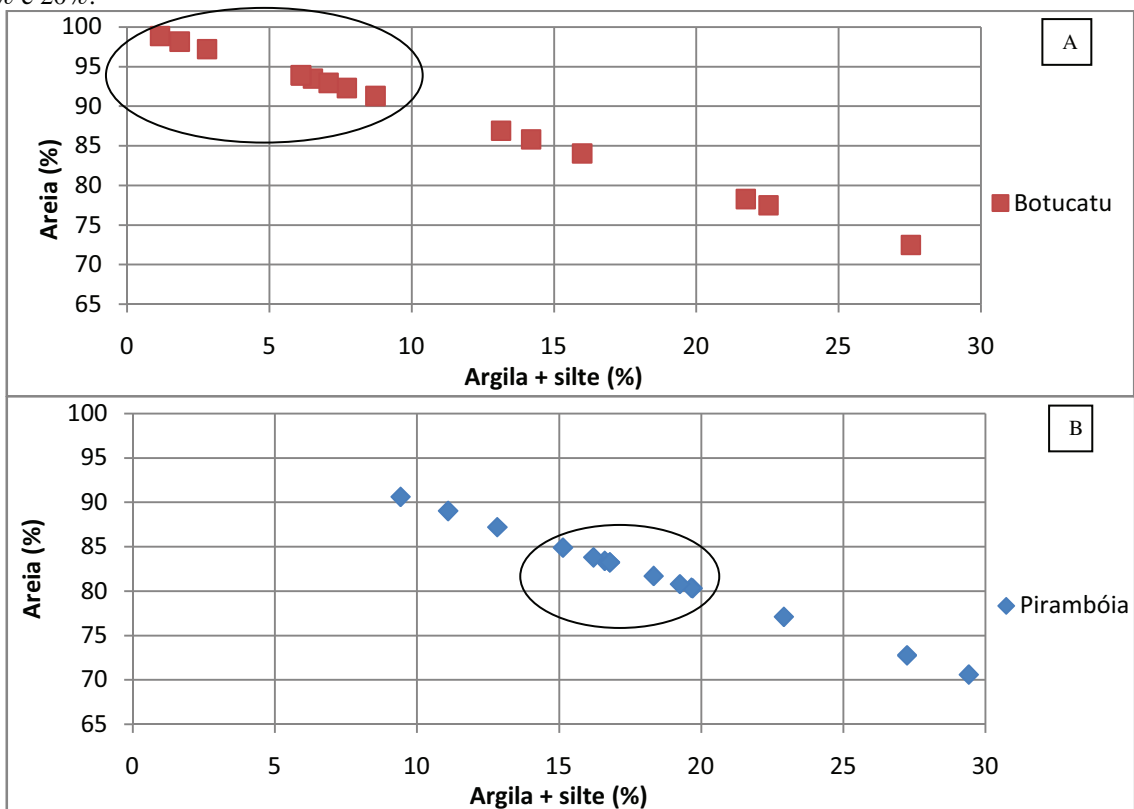
Os teores mais elevados de silte + argila da Formação Pirambóia (Figura 36 - B) refletem o ambiente sedimentar eólico úmido, no qual o nível freático elevado ocasiona a formação de depósitos de interduna ou mesmo lagoas locais, com deposição de silte e argila.

Figura 35 – Limites máximos e mínimos (linha cheia) e valor médio (linha tracejada) das distribuições granulométricas. Observa-se que os arenitos da Formação Pirambóia mostram maior teor de finos, (fração argila entre 0% e 6%), bem como predominância de grãos entre 0,05mm e 0,74mm.



Fonte: Elaborada pelo autor.

Figura 36 – Os arenitos da Formação Botucatu (A) mostram predominância (>50%) de teores de silte + argila entre 0% e 10%, enquanto para os arenitos da Formação Pirambóia (B) predominam teores silte + argila entre 15% e 20%.



Fonte: Elaborada pelo autor.

Formação Serra Geral (Cretáceo)

Essa Formação está localmente constituída por rochas efusivas básicas (Fácies Gramado). Em afloramentos ocorrem derrames superpostos com espessuras de 15m a 60m. As rochas efusivas básicas mesocráticas com coloração cinza, textura afanítica e disjunção colunar (Figura 37 - A), com alto grau de fraturamento subvertical.

Basalto amigdaloides são comuns no topo e base dos derrames (Figura 37 – B e C), ocorrendo ainda brechas vulcânicas e intrusões na forma de diques e *sills* de diabásio. Os corpos intrusivos têm espessura significativa, como se verifica na Pedreira da Brasília-Guaíba (Figura 38), onde o *sill* de diabásio tem espessura igual ou superior a 60m.

Verificou-se uma textura predominante subofítica (Figura 39 - A) e pontualmente intersetal (Figura 39 - B). A assembleia mineral primária é formada por plagioclásio, piroxênio e olivina, ocorrendo secundariamente argilominerais e minerais opacos.

Figura 37 – (A) Rochas basálticas da Formação Serra Geral recobrendo os arenitos da Formação Botucatu (UTM = E 485.621 / N 6.721.980 Pedreira da Incopel - Estância Velha/RS). (B) Basalto amigdaloidal caracterizando o topo dos derrames basálticos na região (UTM = E 484.809 / N 6.722.355 Pedreira Sultepa: SR – 03 Caixa 01 trecho de 3,40m à 5,20m). (C) Basalto amigdaloidal caracterizando a base dos derrames basálticos em contato com o arenito Botucatu (UTM = E 484.592 / N 6.722.246 Pedreira Sultepa: SR – 05 Caixa 12 contato com 61,20m).



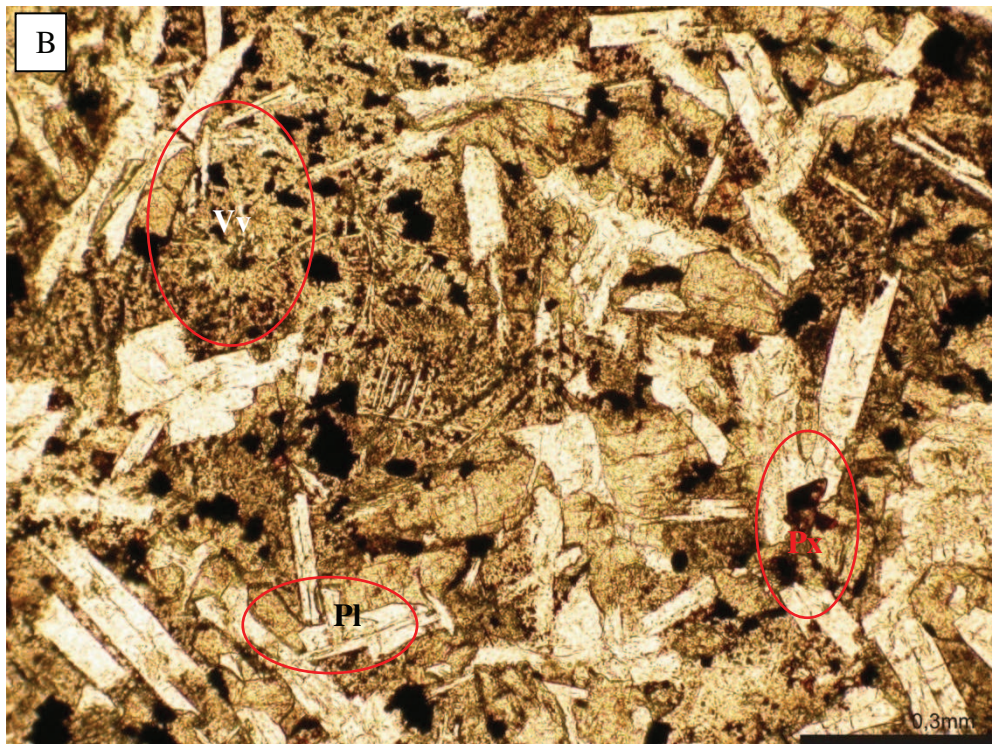
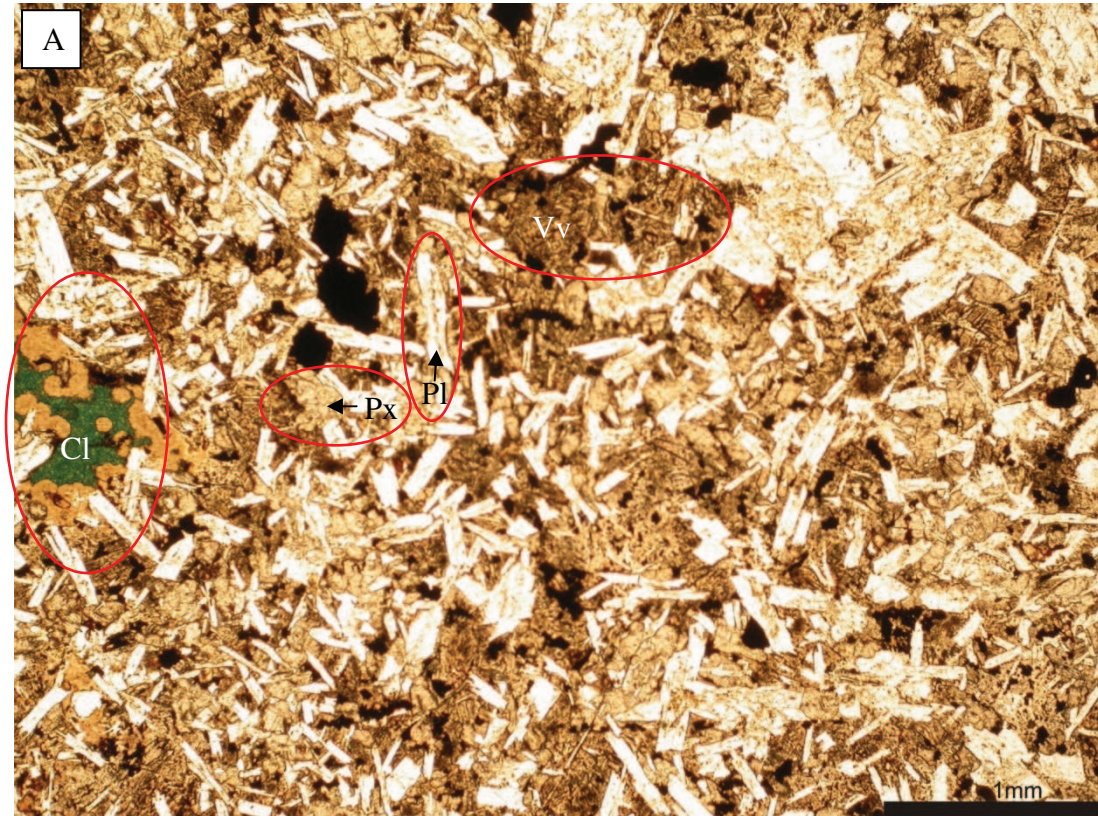
Fonte: Elaborada pelo autor.

Figura 38 – *Sill* de diabásio com disjunção colunar, coloração cinza e textura afanítica (UTM = E 474.498 / N 6.718.853 Pedreira da Brasília Guaíba - Portão/RS).



Fonte: Elaborada pelo autor.

Figura 39 – (A) Textura subofítica, com cristais de plagioclásio (Pl), piroxênio (Px), pontualmente com vidro vulcânico (Vv) intersetal e vesículas sendo preenchidas por celadonita (Cl) (LN 4X) (UTM = E 484.560 / N 6.722.048 Pedreira da Sultepa - Estância Velha/RS). (B) Cristais euédricos e subeuédricos de Plagioclásio (Pl) e anédricos de piroxênio (Px) e vidro vulcânico (Vv) intersetal (LN 10X) (UTM = E 484.560 / N 6.722.048 Pedreira da Sultepa - Estância Velha/RS).



Fonte: Elaborada pelo autor.

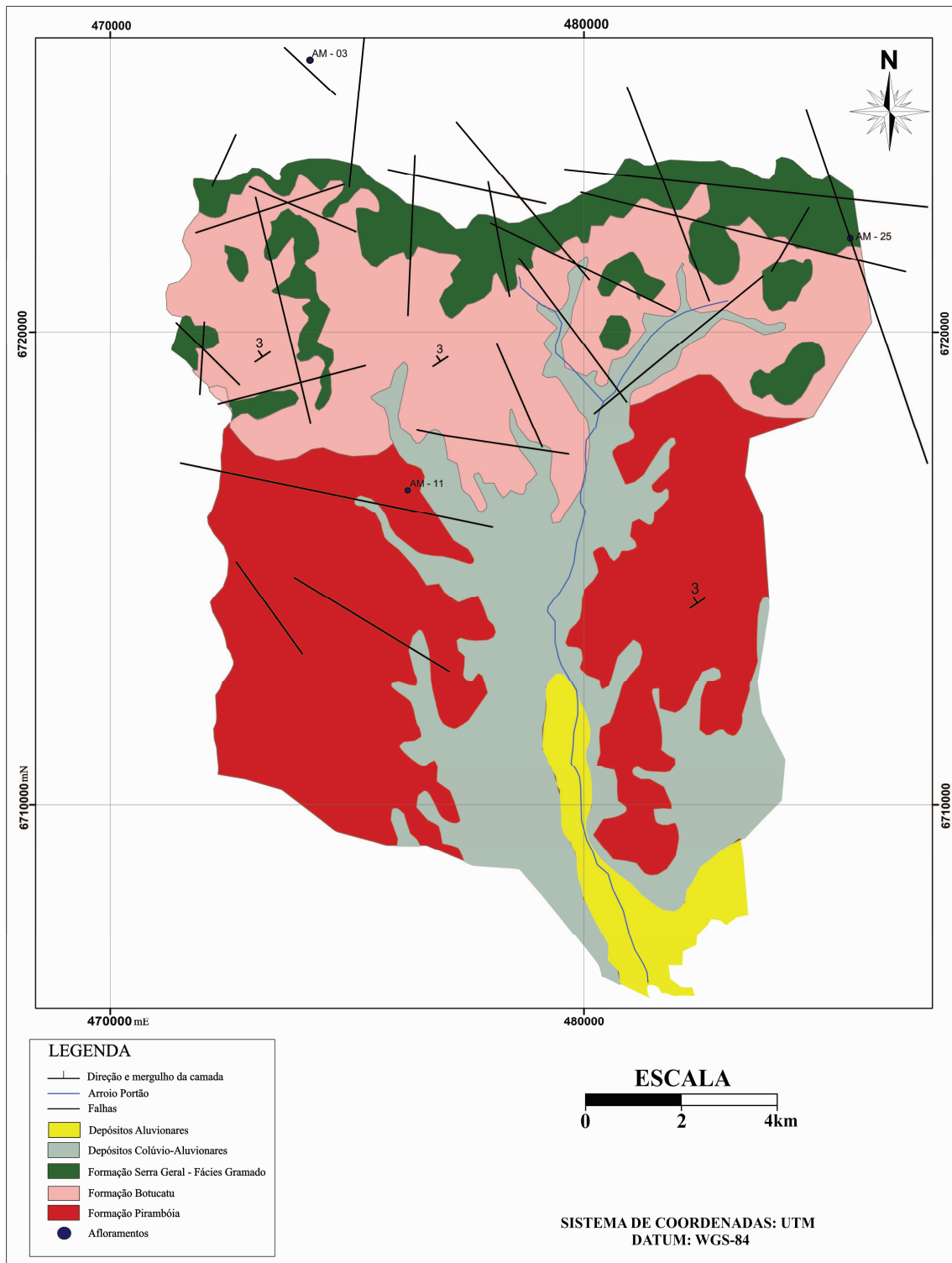
5.2 ESTRUTURA E TECTÔNICA

Os lineamentos tectônicos identificados na área estão indicados no mapa de lineamentos (Figura 40). Os lineamentos da Formação Pirambóia apresentam-se menos frequentes, o que ocorre pela dificuldade de identificação devido ao uso do solo.

A frequência dos lineamentos foi analisada segundo o número de ocorrências ou a extensão acumulada em cada orientação. Os resultados da análise de frequência são apresentados na tabela 04, observando-se que as maiores extensões acumuladas para as formações Botucatu e Serra Geral são coincidentes, quais sejam: 270° - 290° e 340° - 350° (Figura 41).

Estima-se que essas orientações correspondam aos lineamentos responsáveis pela compartimentação do aquífero em blocos tectônicos escalonados. Por sua vez, dependendo da orientação das tensões tectônicas, esses lineamentos poderão corresponder às zonas de tração, atuando como zonas de maior ou menor condutividade hidráulica de acordo com sua gênese.

Figura 40 – Mapa geológico com lineamentos tectônicos.



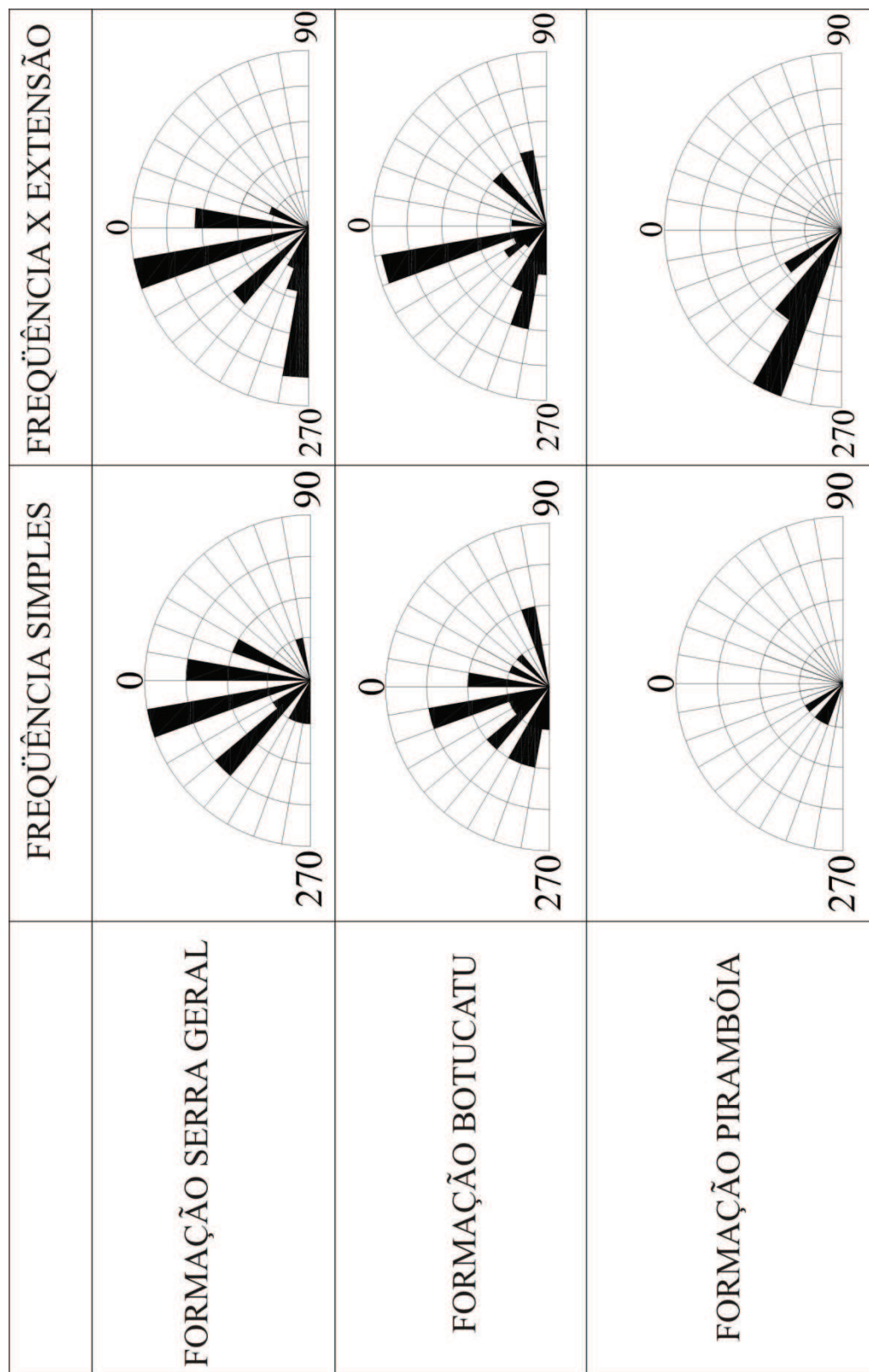
Fonte: Modificada de Wildner et al. (2008).

Tabela 04 – Orientação, extensão e frequência dos lineamentos identificados na área. Os números em vermelho representam as maiores extensões acumuladas para cada formação.

FORMAÇÃO	ORIENTAÇÃO	FREQUÊNCIA SIMPLES		EXTENSÃO	
		NÚMERO DE LINEAMENTOS	(%)	EXTENSÃO (m)	(%)
SERRA GERAL	0 - 10	3	18	6130	16
	20 - 30	2	12	2280	6
	70 - 80	1	6	280	1
	270 - 280	1	6	7710	21
	280 - 290	1	6	3300	9
	290 - 300	1	6	2400	6
	310 - 320	3	18	5340	14
	320 - 330	1	6	340	1
	340 - 350	4	24	9390	25
	TOTAL	17	100	37170	100
BOTUCATU	0 - 10	2	11	2220	5
	20 - 30	1	6	510	1
	40 - 50	1	6	4610	10
	70 - 80	2	11	5280	11
	270 - 280	1	6	3160	7
	280 - 290	2	11	7130	15
	290 - 300	2	11	4410	10
	310 - 320	2	11	2020	4
	320 - 330	1	6	3440	7
	330 - 340	1	6	2420	5
	340 - 350	3	17	10960	24
TOTAL	18	100	46160	100	
PIRAMBÓIA	290 - 300	1	33	6500	51
	300 - 310	1	33	3800	30
	320 - 330	1	33	2400	19
	TOTAL	3	100	12700	100
TOTAL GERAL	38		96030		

Fonte: Elaborada pelo autor.

Figura 41 – Diagramas de orientação dos lineamentos detectados em fotografias aéreas e imagens de satélite. Os diagramas de frequência simples referem-se apenas ao número de lineamentos detectados, enquanto os diagramas frequência X extensão referem-se ao comprimento em cada intervalo de classe (orientação) em relação ao comprimento total de todos os lineamentos.

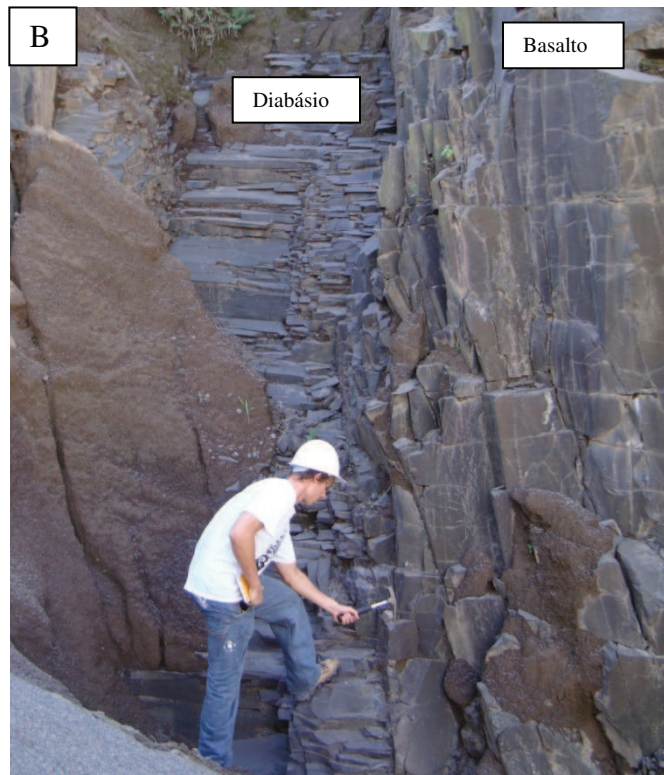
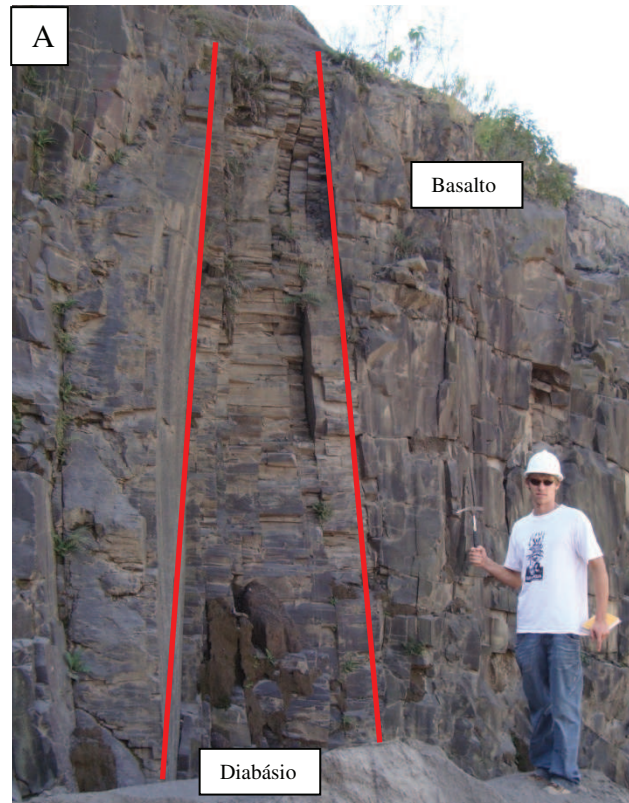


Fonte: Elaborada pelo autor.

Foram detectadas inúmeras intrusões vulcânicas na forma de diques diabásio, as quais cortam as rochas das formações Serra Geral (Figura 42 – A e B), Botucatu (Figura 43 - A) e Pirambóia (Figura 43 - B).

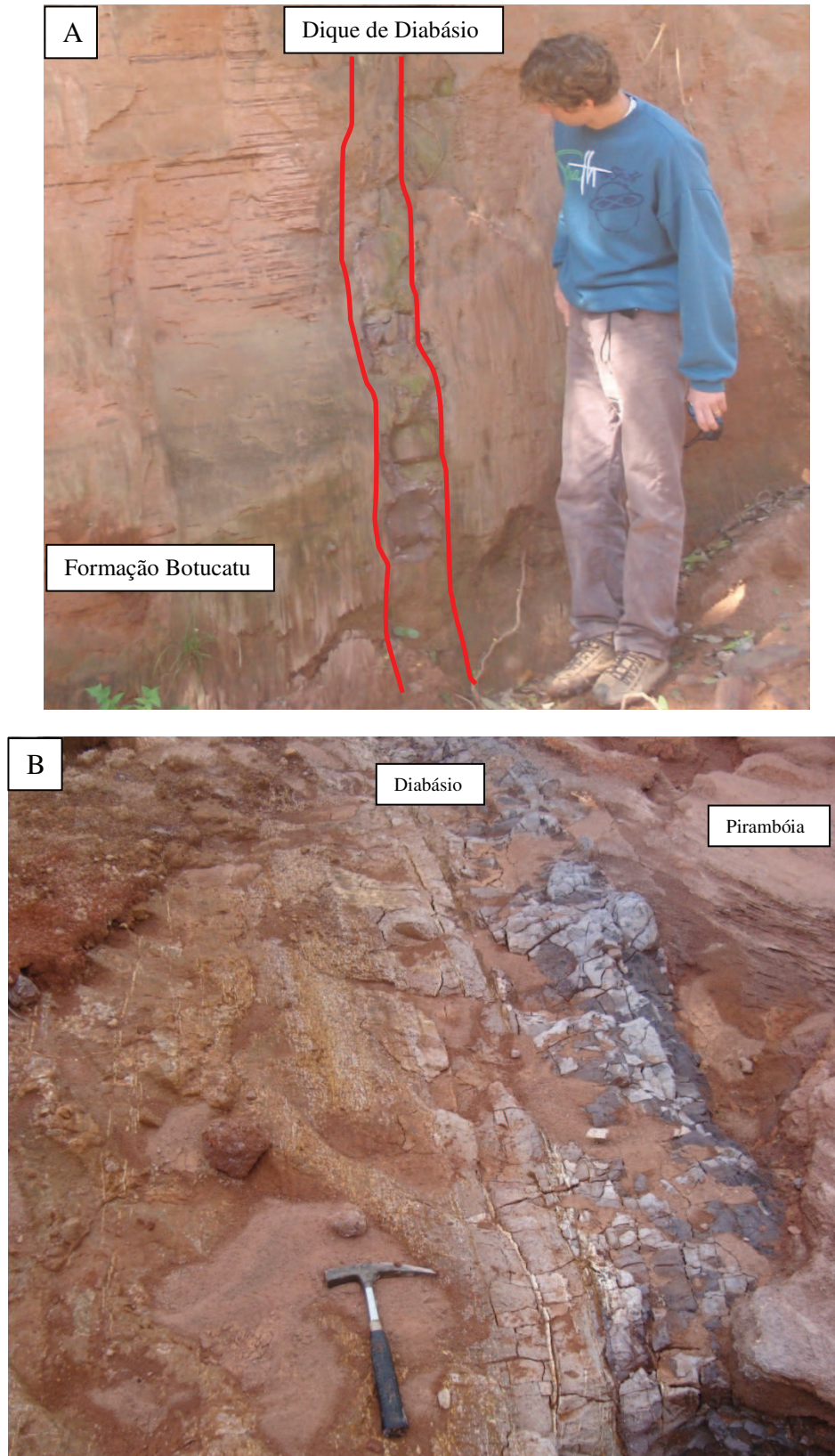
Essas intrusões apresentam orientações segundo os azimutes 290° e 340° , coincidentemente com os lineamentos de maior extensão acumulada anteriormente identificados. As intrusões com maiores espessuras, como também com maior incidência, encontram-se no intervalo 335° - 340° , estimando-se que lineamentos com essa orientação tenham atuado como zonas de tração, facilitando a ocorrência de intrusões vulcânicas.

Figura 42 – (A) Dique de diabásio vertical, com orientação 335°, atravessando as rochas vulcânicas com disjunção colunar (UTM = E 485.624 / N 6.722.119 - Pedreira da Incopel, município de Estância Velha/RS). (B) Dique de diabásio vertical, com orientação 340°, atravessando as rochas vulcânicas com disjunção colunar (UTM = E 485.644 / N 6.722.122 - Pedreira da Incopel, município de Estância Velha/RS).



Fonte: Elaborada pelo autor.

Figura 43 – (A) Dique de diabásio vertical, com orientação 290°, cortando as rochas sedimentares da Formação Botucatu (UTM = E 474.746 / N 6.720.533 – AM – 03, município de Portão/RS). (B) Dique de diabásio alterado, com orientação 340°, cortando as rochas sedimentares da Formação Pirambóia (UTM = E 476.276 / N 6.716.645 – AM – 11, município de Portão/RS).



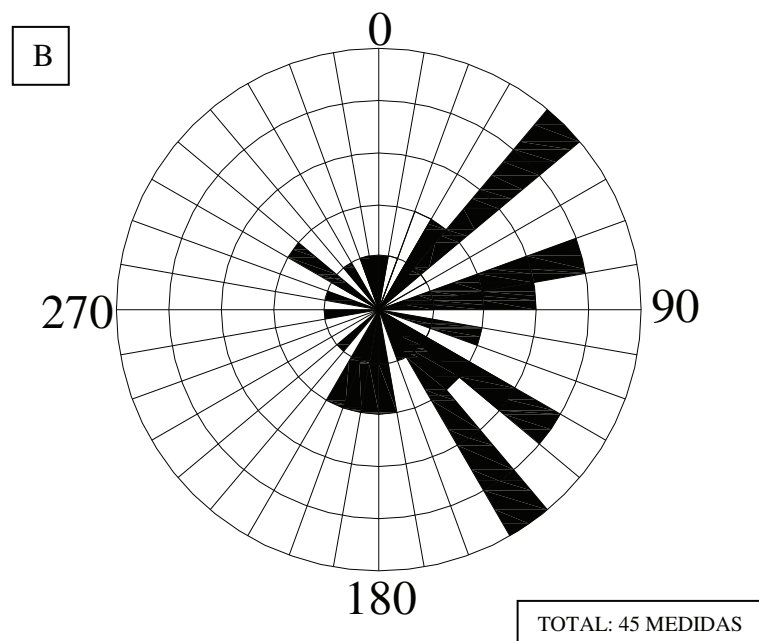
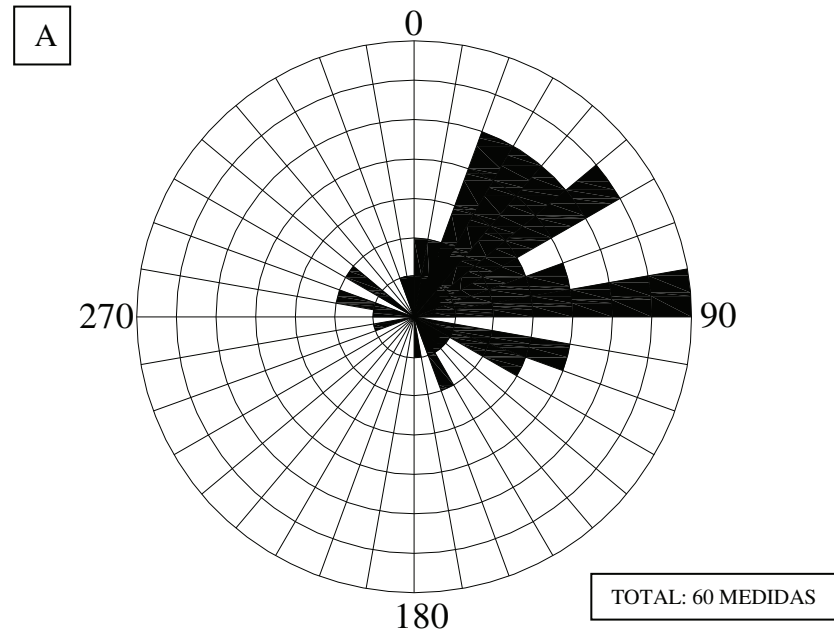
Fonte: Elaborada pelo autor.

5.3 PALEOCORRENTES

Observou-se distintos padrões para as formações Botucatu e Pirambóia, com uma orientação predominante de 20° a 90° para as paleocorrentes a primeira (Figura 44 - A) enquanto para a segunda formação predominam paleoventos para 40° a 150° (Figura 44 - B).

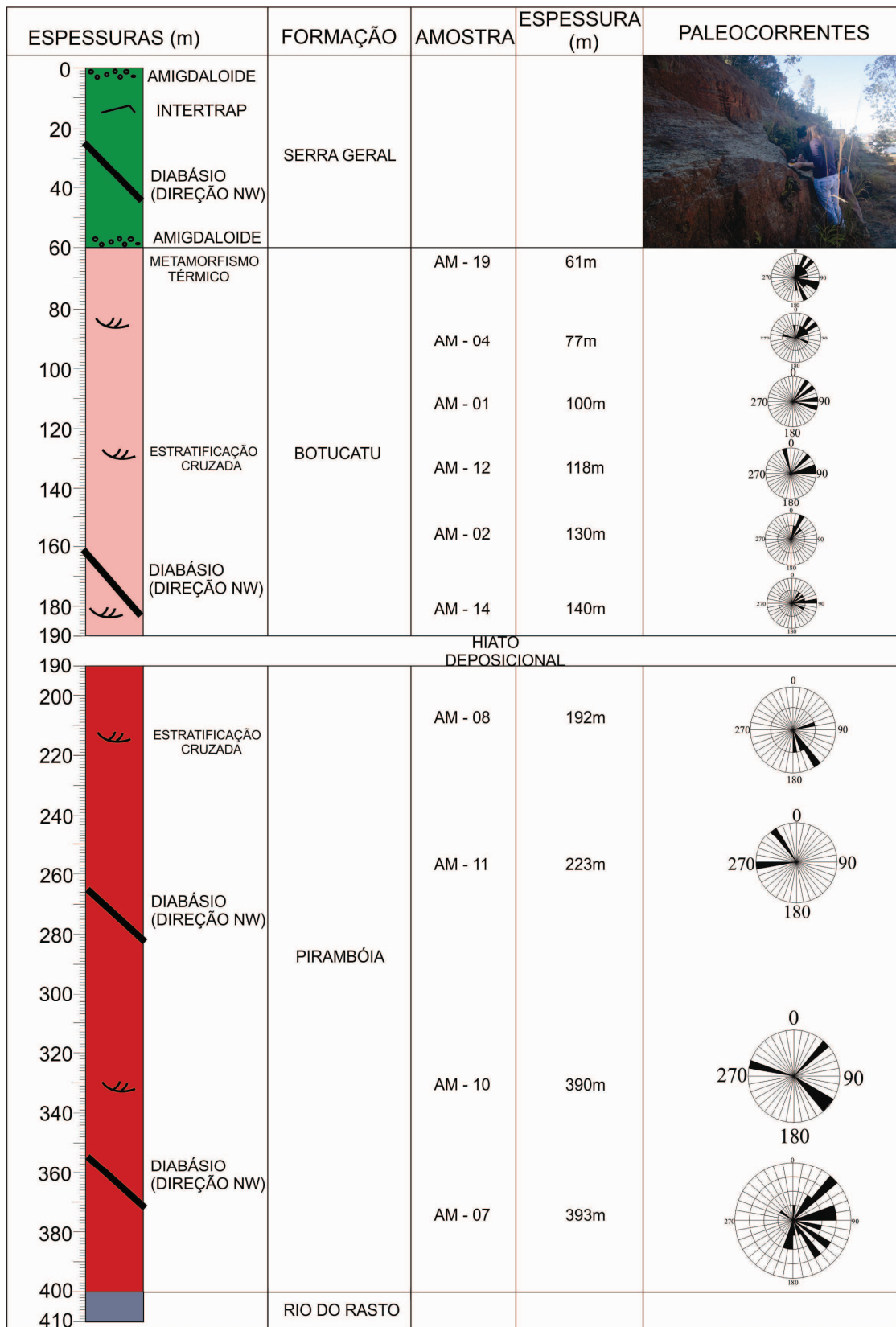
A variação temporal das paleocorrentes pode ser observada no perfil colunar (Figura 45). Verifica-se que, no Permiano Superior, predominam paleoventos para o quadrante sudeste com algumas variações para NE e NW, sendo que no Cretáceo predominam paleoventos para NE.

Figura 44 – (A) Comportamento geral das paleocorrentes da Formação Botucatu, considerando um total de 60 medidas de campo com predominância para o quadrante NE. (B) Comportamento geral das paleocorrentes da Formação Pirambóia, considerando 45 medidas de campo. Verifica-se uma bimodalidade NE e SE.



Fonte: Elaborada pelo autor.

Figura 45 – Variação vertical das paleocorrentes.



Fonte: Elaborada pelo autor.

5.4 POROSIDADE E CIMENTAÇÃO

Os valores de porosidades total e efetiva determinados e estimados são apresentados no Quadro 03 e no Quadro 04 abaixo.

Quadro 03 – Valores de porosidade total (η_t) determinados (DET): (η_{tc}) porosidade total pelo cilindro cortante (η_{tt}), porosidade total pelo testemunho de sondagem e estimados (EST): (η_{tg}) porosidade total pela granulometria lâmina e (η_{tl}) porosidade total pela lâmina petrográfica em amostras da Formação Pirambóia (cor vermelha) e Formação Botucatu (cor preta).

NÚMERO DA AMOSTRA	FORMAÇÃO		MÉTODO				
	PIRAMBÓIA	BOTUCATU	η_t (%)	DET. η_{tc}	DET. η_{tt}	EST. η_{tg}	EST. η_{tl}
AM - 18	X		10				X
AM - 07	X		12				X
AM - 05		X	13				X
AM - 01		X	15				X
AM - 17	X		18		X		
AM - 16	X		19		X		
AM - 27		X	20		X		
AM - 10	X		25			X	
AM - 11 / AM - 12	X	X	26			X / X	
AM - 08 / AM - 04	X	X	27			X/X	
AM - 02		X	28			X	
AM - 28	X		31			X	
AM - 18	X		32			X	
AM - 30	X		32				
AM - 31 / AM - 07 / AM - 29 / AM - 01 / AM - 03	XXX	XX	33	X		XXX/X	
AM - 32 / AM - 33 / AM - 06 / AM - 19	XX	XX	34			XX/XX	
AM - 15 / AM - 17 / AM - 34 / AM - 05	XXX	X	35	X		XXX	
AM - 16 / AM - 06	X	X	36	X		X	
AM - 09 / AM - 14 / AM - 04		XXX	37	X		XX	
AM - 14 / AM - 03		XX	38	XX			
AM - 11 / AM - 08 / AM - 05 / AM - 01 / AM - 13	XX	XXX	39	XX		XXX	
AM - 26 / AM - 12 / AM - 09		XXX	40	XX		X	
AM - 10 / AM - 02	X	X	41	X/X			
AM - 07	X		43	X			
AM - 24		X	45			X	
AM - 27		X	46			X	
AM - 25		X	47			X	

Fonte: Elaborada pelo autor.

Quadro 04 – Valores de porosidade efetiva (η_e) determinados (DET): (η_{ec}) porosidade efetiva pelo cilindro cortante e (η_{et}) porosidade efetiva pelo testemunho de sondagem em amostras da Formação Pirambóia (cor vermelha) e Formação Botucatu (cor preta).

NÚMERO DA AMOSTRA	FORMAÇÃO		MÉTODO		
	PIRAMBÓIA	BOTUCATU	η_e (%)	DET. η_{ec}	DET. η_{et}
AM - 27		X	14		X
AM - 17	X		17		X
AM - 16	X		18		X
AM - 03		X	32	X	
AM - 04		X	35	X	
AM - 07 / AM - 11	XX		38	XX	
AM - 02 / AM - 10	X	X	39	X/X	

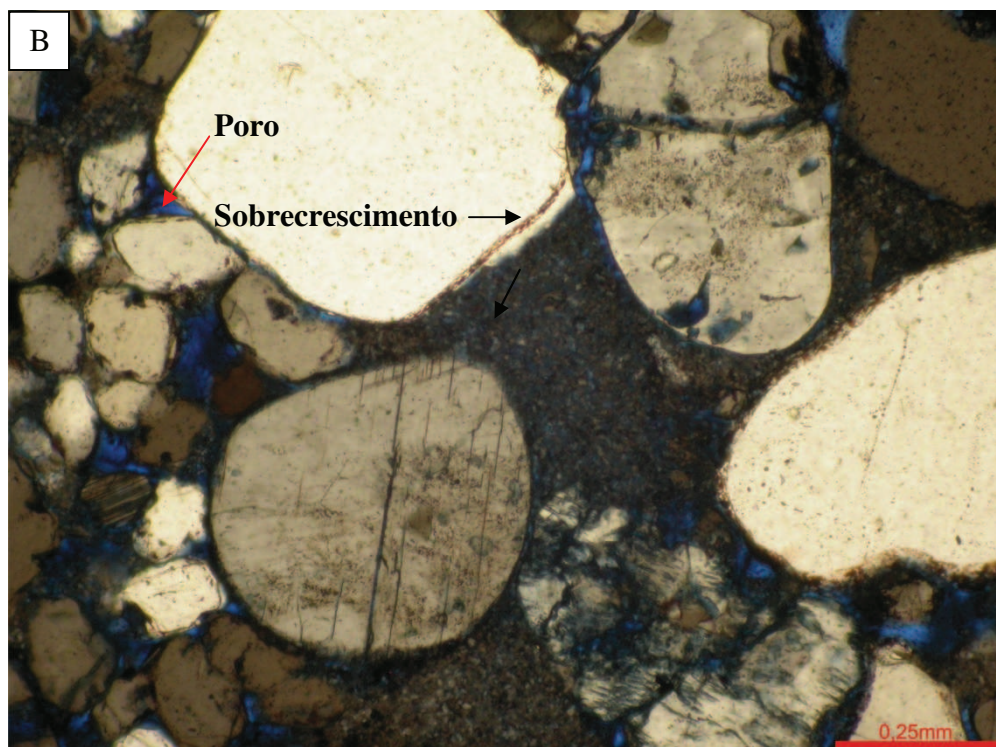
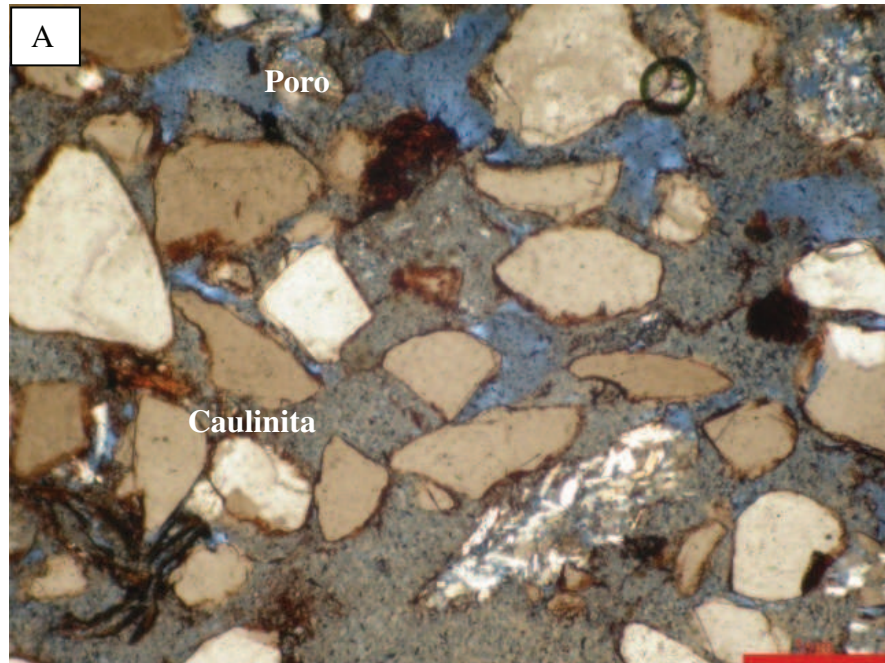
Fonte: Elaborada pelo autor.

A porosidade dos arenitos está associada ao tamanho, forma, seleção e arranjo dos grãos, bem como ao tipo e intensidade dos processos de cimentação. A caulinitização dos feldspatos (Figura 46 - A) é fator importante na redução do espaço poroso, assim como outros processos como o sobrecrescimento do quartzo (Figura 46 - B) por efeito térmico, as cimentações carbonática (Figura 47 - A) e ferruginosa (Figura 47 - B).

As variações de intensidade e tipo de cimentação resultam em variados graus de coerências dos arenitos. No contato com a Formação Serra Geral, onde são intensos os processos de sobrecrescimento de quartzo, cimentação carbonática e óxido de ferro, os arenitos apresentam coerências elevadas (Figura 48 - A). Por sua vez, a caulinitização dos feldspatos, mesmo com a precipitação de óxido de ferro entre os grãos (Figura 48 - B), está associada à ocorrência de arenitos friáveis.

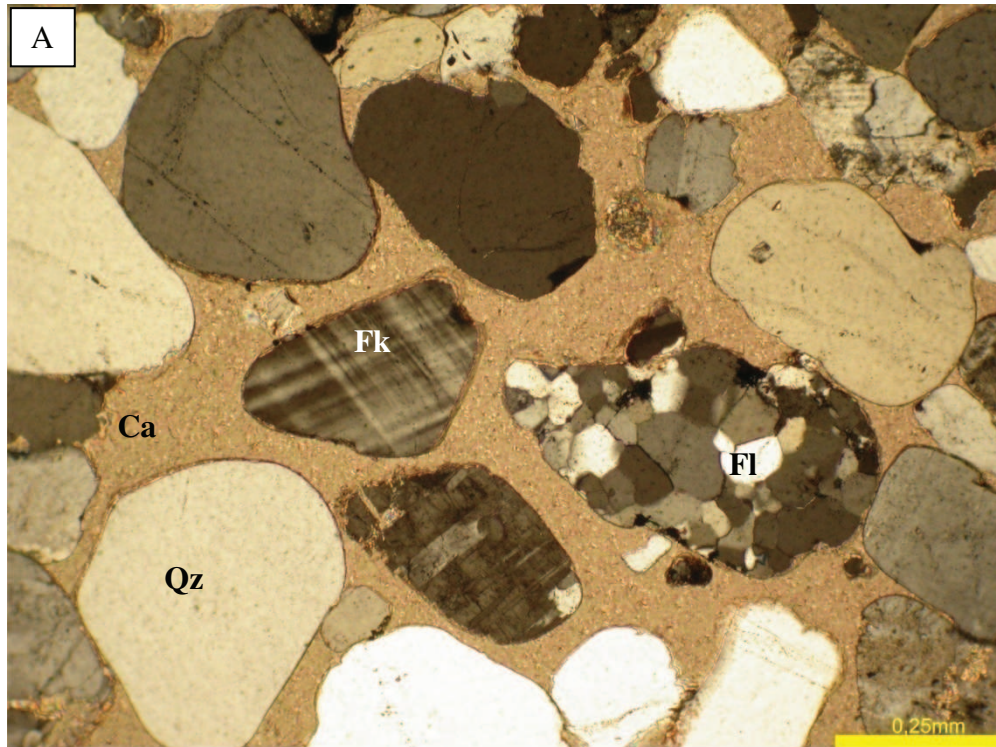
A dissolução parcial de feldspatos gera mudanças na porosidade original e caulinita. Os processos de cimentação carbonática e sobrecrescimento de quartzo, além de pouco disseminados, são anteriores à caulinitização dos feldspatos. Na Figura 47 - A, observam-se grãos inalterados de feldspato e quartzo, os quais se encontram envoltos pela cimentação carbonática.

Figura 46 – (A) Redução do espaço poroso devido à caulinitização dos feldspatos em arenitos da Formação Pirambóia, micrografia (LP 4X). Observa-se o contato de grãos angulosos e moderadamente selecionados, com granulometria de areia fina a areia média (UTM = E 484.755 / N 6.711.604 amostra AM – 07, município de Portão/RS). (B) Redução da porosidade do arenito fino quartzoso, sendo que os grãos se apresentam bem selecionados com uma redução da porosidade intergranular, devido à cimentação silicosa dada pelo sobrecrescimento do quartzo (LP 10X) (UTM = E 483.700 / N 6.722.239 amostra AM – 05, município de Estância Velha/RS).



Fonte: Elaborada pelo autor.

Figura 47 – (A) Porosidade nula devido à cimentação carbonática (Ca) em arenito da Formação Botucatu no contato com a Formação Serra Geral. Arenito quartzoso (Qz); os grãos se apresentam bem selecionados com pouco feldspato alcalino (Fk) e fragmentos líticos (Fl) (LP 10X) (UTM = E 485.644 / N 6.722.122 amostra AM – 28 - Pedreira da Incopel, município de Estância Velha/RS). (B) Redução da porosidade intergranular devido à cimentação ferruginosa. Arenito friável quartzoso, com pouco feldspato alcalino, plagioclásio e fragmentos líticos, sendo que os grãos se apresentam bem selecionados (LN 4X) (UTM = E 481.514 / N 6.718.800, município de Estância Velha/RS).



Fonte: Elaborada pelo autor.

Figura 48 – (A) Arenito coerente com estratificação cruzada de grande porte, na Formação Botucatu (UTM = E 485.624 / N 6.722.119 - município de Estância Velha/RS). (B) Arenito friável da Formação Pirambóia com sulcos de erosão. Observam-se as cores avermelhadas devido à pigmentação ferruginosa, bem como horizontes esbranquiçados devido ao processo de caulinitização (UTM = E 476.276 / N 6.716.645 – AM – 11, município de Portão/RS).



Fonte: Elaborada pelo autor.

Como verificado petrograficamente a caulinitização dos feldspatos reduzem tanto a porosidade total como a efetiva dos arenitos. O efeito desse processo sobre as porosidades está correlacionado com o teor de finos (argila + silte) dos arenitos (Figura 49). Para baixos teores de finos (argila + silte), a porosidade efetiva (η_{ec}) dos arenitos friáveis é inferior à porosidade total (η_{tc}), tendendo a igualar-se a esta à medida que o teor de finos aumenta.

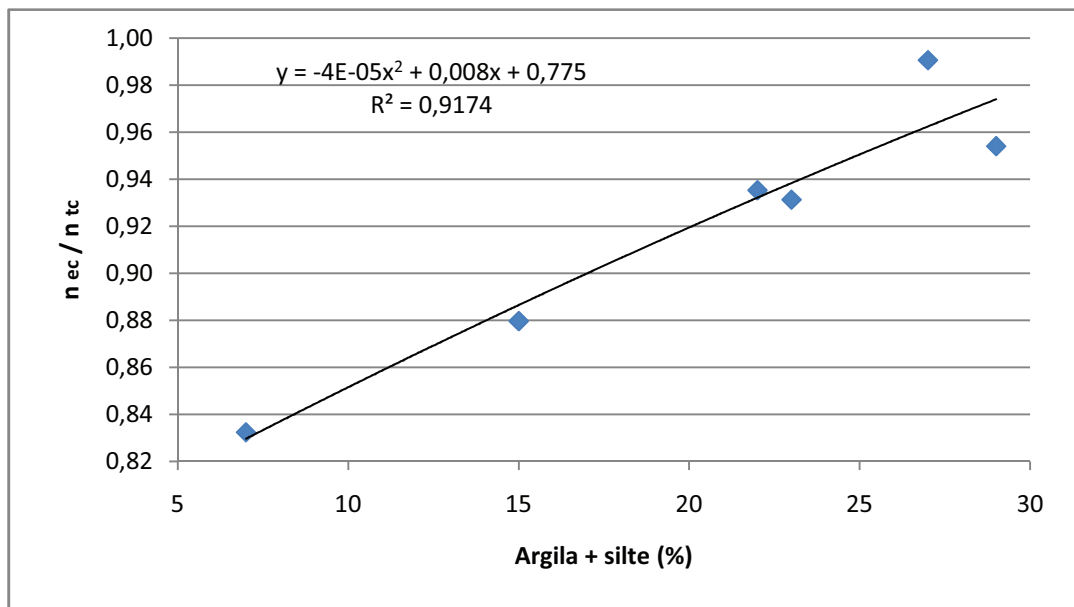
Esse comportamento sugere que o espaço poroso dos arenitos friáveis é progressivamente colmatado com o aumento do teor de finos, reduzindo-se progressivamente a diferença entre as porosidades total e efetiva. A Figura 50 permite observar esse fenômeno, verificando-se um aumento da razão $(\eta_e) / (\eta_t)$ com a intensificação da caulinitização.

A maior parte dos poros remanescentes, não preenchidos por caulinita, são saturáveis e contribuem para a porosidade efetiva. Tendo-se verificado em campo que a caulinitização ocorre de forma diferenciada conforme a estratificação, o que é evidenciado pelas cores amarelo-esbranquiçadas (Figura 51), as porosidades total e efetiva devem também variar de acordo com a estratificação dos arenitos friáveis.

Integrando-se todas as determinações diretas da porosidade de arenitos friáveis e coerentes (Figura 52), verifica-se que se mantém o comportamento anteriormente identificado na Figura 49, obtendo-se, porém, menores razões $(\eta_{et}) / (\eta_{tt})$ para os arenitos coerentes. Esse comportamento indica que os arenitos fortemente cimentados têm maior proporção de poros inacessíveis à saturação.

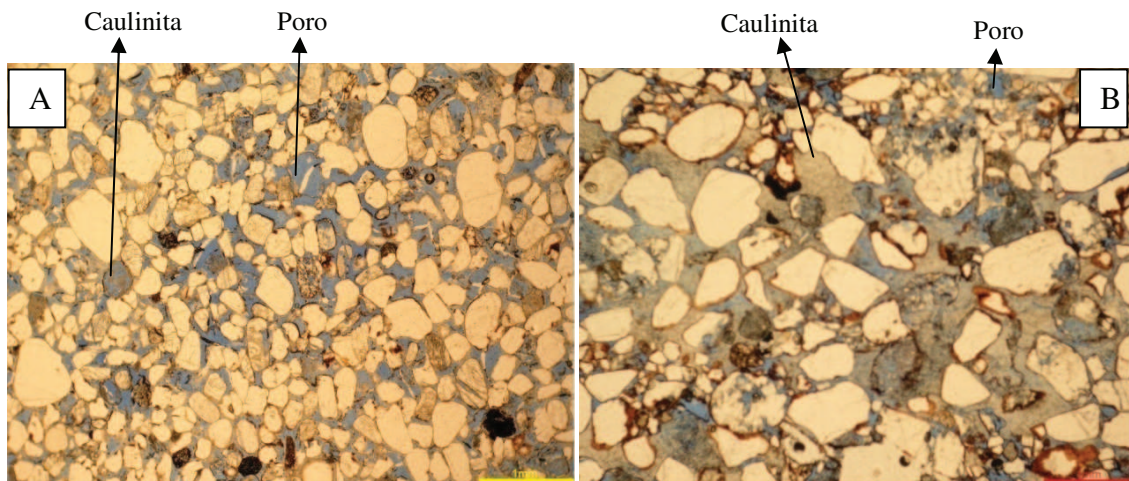
De forma geral, a razão $(\eta_e) / (\eta_t)$ e o teor de finos (argila + silte) podem ser utilizados como indicadores dos processos de caulinitização dos feldspatos e friabilização dos arenitos. Os arenitos coerentes apresentam teores de finos argila + silte = 2% a 9% e razão $(\eta_{et}) / (\eta_{tt}) = 0,7$. Por sua vez, os arenitos friáveis atingem valores de $(\eta_{ec}) / (\eta_{tc}) = 1,0$ e argila + silte = 27% a 29%.

Figura 49 – Relação da razão porosidade efetiva (η_{ec}) / porosidade total (η_{tc}) com o teor de finos (argila + silte) dos arenitos friáveis. As porosidades foram determinadas pelo método do cilindro cortante.



Fonte: Elaborada pelo autor.

Figura 50 – (A) Lâmina mostrando a porosidade (em azul) em amostra do arenito Botucatu com valor na razão $\eta_e / \eta_t = 0,83$ e (B) lâmina da Formação Pirambóia com um aumento considerável na quantidade de cimento argiloso com valor na razão $\eta_e / \eta_t = 0,88$.



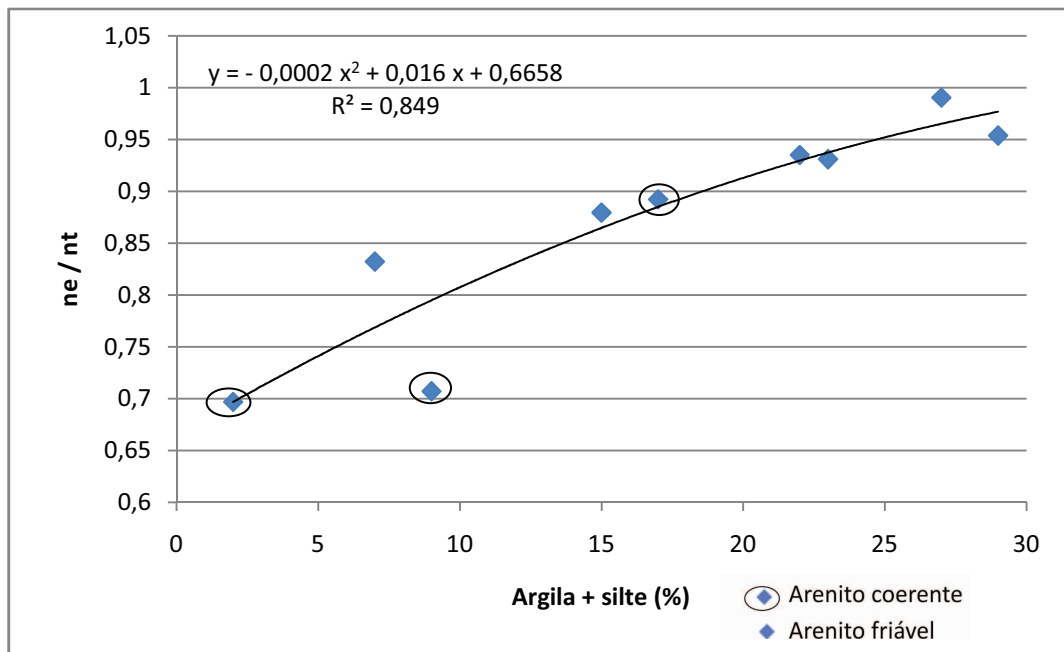
Fonte: Elaborada pelo autor.

Figura 51 – Arenito bimodal com estratificação cruzada acanalada (Formação Botucatu). Observam-se níveis esbranquiçados correspondentes à alteração dos feldspatos (UTM = E 483.700 / N 6.7222.39 AM – 05, município de Estância Velha/RS).



Fonte: Elaborada pelo autor.

Figura 52 – Correlação entre a razão porosidade efetiva (η_e) / porosidade total (η_t) e o teor de finos (argila + silte) dos arenitos coerentes e friáveis. As porosidades foram determinadas no testemunho de sondagem (arenitos coerentes) e pelo cilindro cortante (arenitos friáveis).



Fonte: Elaborada pelo autor.

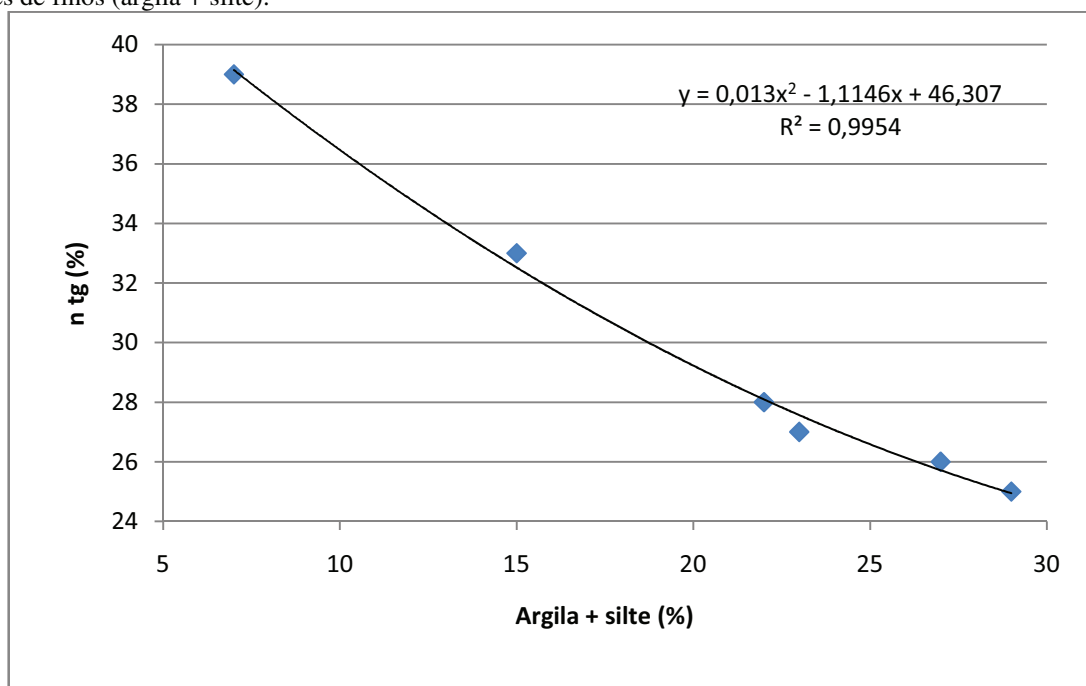
Uma questão a ser avaliada é a aplicabilidade de técnicas de estimativa indireta das porosidades através da granulometria, como a proposição de Johnson (1967). Aplicando-se as técnicas desse autor, observa-se, que com o aumento do teor de finos (argila + silte), diminuem os valores de porosidade total pela granulometria (η_{tg}) (Figura 53). Comparando-se as determinações diretas da porosidade total pelo cilindro cortante (η_{tc}) dos arenitos friáveis (Figura 54) com a porosidade total pela granulometria (η_{tg}), verifica-se que ambas são correlacionáveis ($R^2 = 0,9525$).

Para baixos teores de finos (argila + silte = 7% é $\eta_{tg} / \eta_{tc} = 1,03$), com a intensificação da caulinitização (argila + silte = 29%), a relação se reduz para $\eta_{tg} / \eta_{tc} = 0,62$.

Comportamento semelhante é verificado também para determinações direta da porosidade efetiva pelo cilindro cortante (η_{ec}) (Figura 55) dos arenitos friáveis. Os resultados encontrados indicam que as porosidades totais e efetivas dos arenitos friáveis podem ser estimadas indiretamente pela técnica da porosidade total pela granulometria (η_{tg}), desde que aplicada às correções obtidas para o teor de argila + silte (Figura 54 e 55).

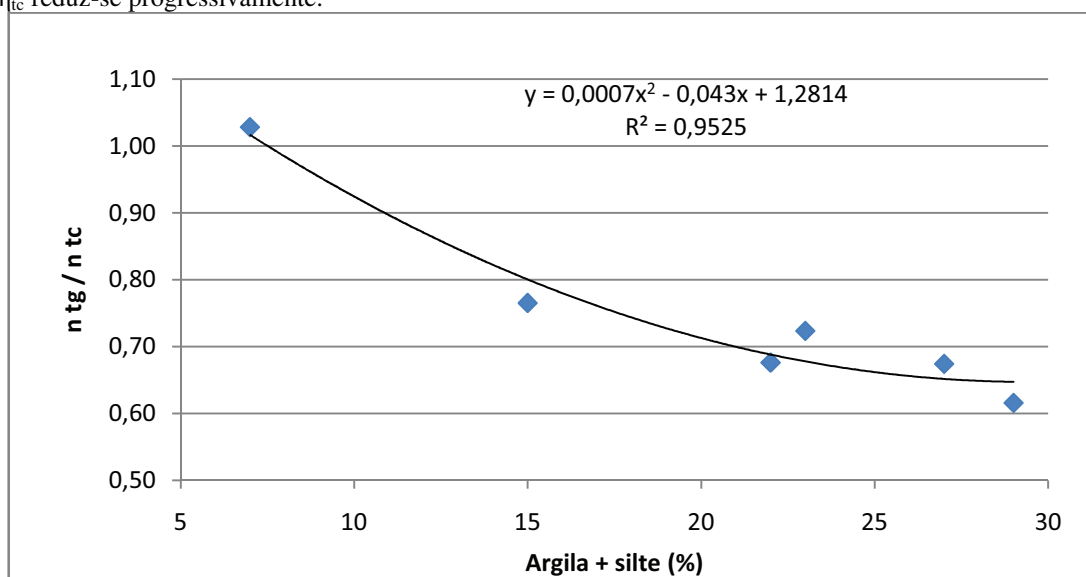
Integrando-se todos os dados de determinação direta das porosidades efetiva de arenitos coerentes (η_{et}) e friáveis (η_{ec}) (Figura 56), verifica-se que a correlação não é tão clara como a identificada unicamente para os arenitos friáveis (Figura 55), a perda de correlação para o conjunto integral de amostras é decorrente das baixas porosidades efetivas dos arenitos coerentes (η_{et}) em relação às porosidades totais (η_{tg}) e é evidenciada por duas distintas curvas.

Figura 53 – A porosidade total estimada granulometricamente (η_{tg}) reduz-se progressivamente para baixos teores de finos (argila + silte).



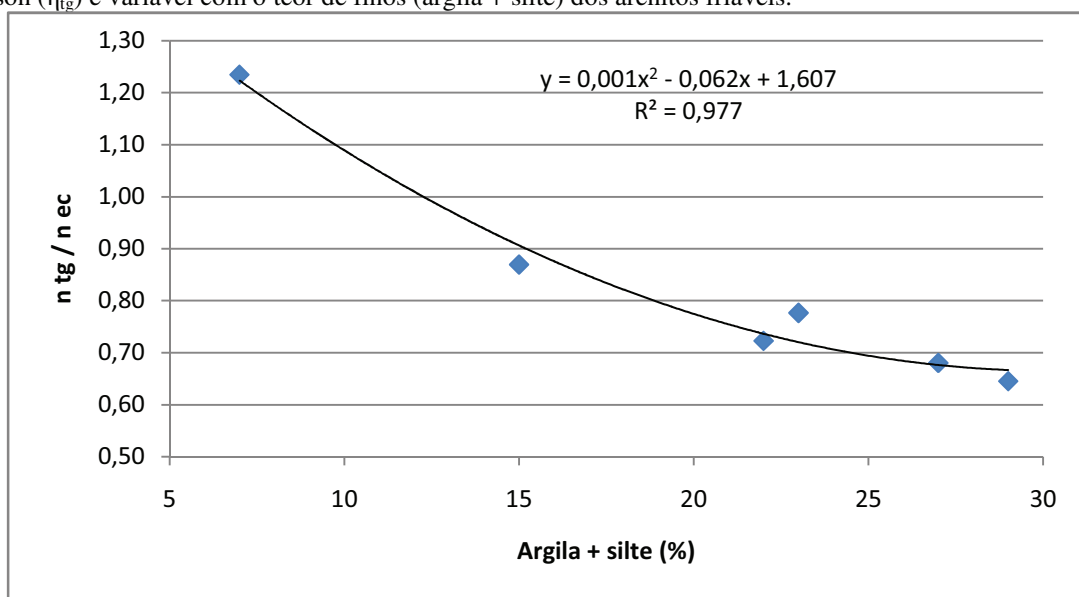
Fonte: Elaborada pelo autor.

Figura 54 – A porosidade total estimada granulometricamente (η_{tg}) é próxima à porosidade total determinada pelo cilindro cortante (η_{tc}) para baixos teores de finos. Com o aumento de finos dos arenitos friáveis, a taxa η_{tg} / η_{tc} reduz-se progressivamente.



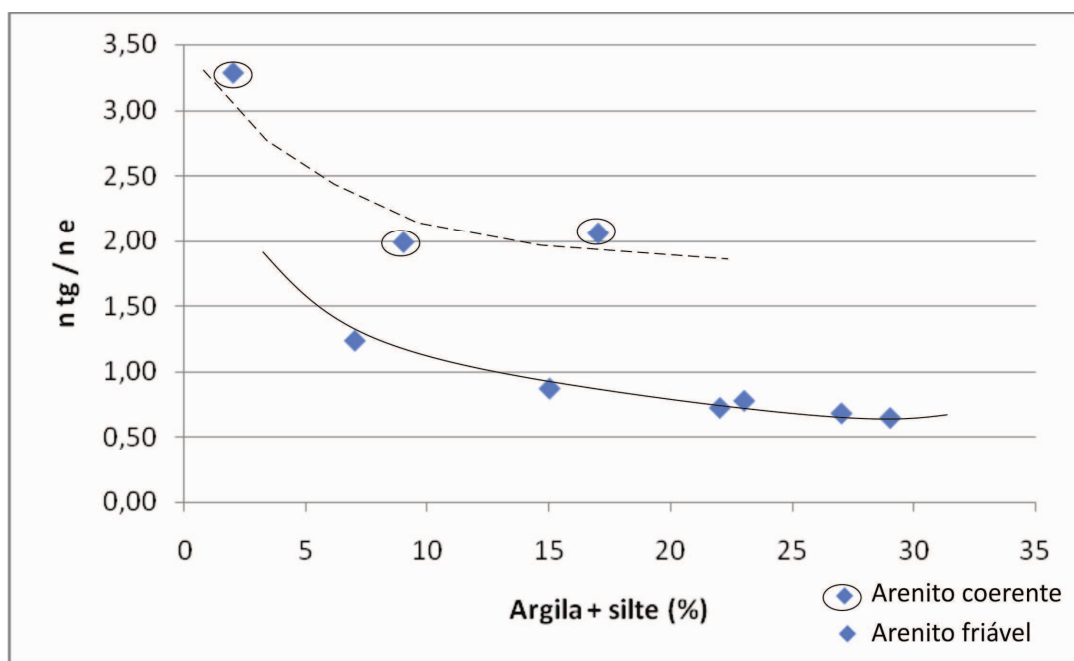
Fonte: Elaborada pelo autor.

Figura 55 – A taxa da porosidade efetiva (η_{ec}) estimada granulometricamente pela técnica do triângulo de Johnson (η_{tg}) é variável com o teor de finos (argila + silte) dos arenitos friáveis.



Fonte: Elaborada pelo autor.

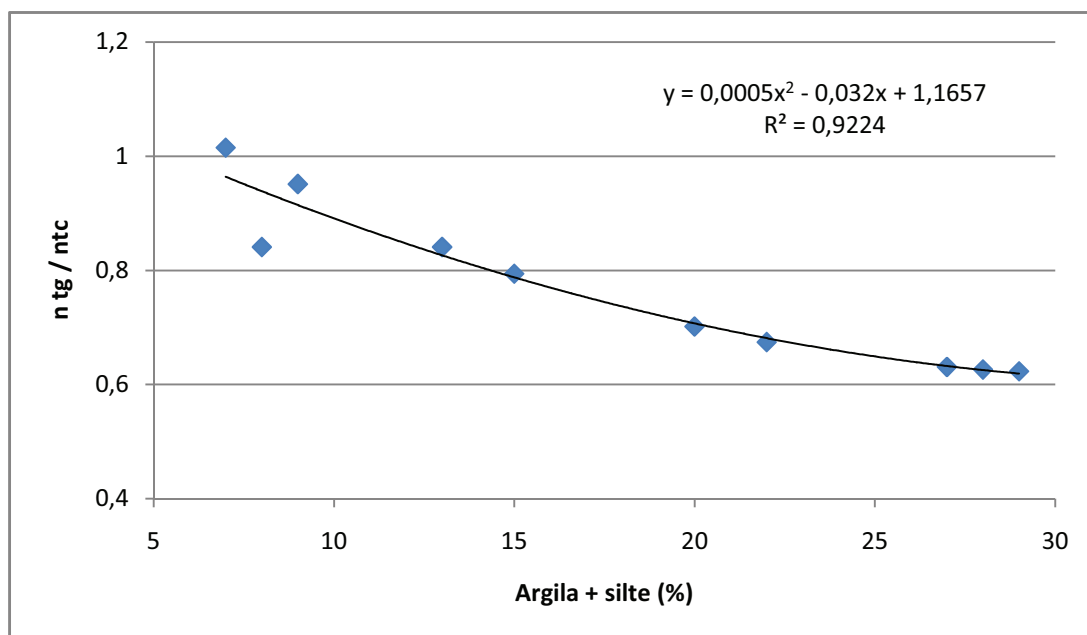
Figura 56 – Os arenitos friáveis são representados pela porosidade efetiva do cilindro cortante (η_{ec}) e os arenitos coerentes são representados pela porosidade efetiva dos testemunhos de sondagem (η_{et}) bastante inferior à porosidade total estimada granulometricamente pela técnica do triângulo de Johnson (η_{tg}).



Fonte: Elaborada pelo autor.

Agregando um conjunto teste de 04 amostras de determinações diretas de porosidade total, é feita uma verificação da aplicabilidade da $\eta_{tg} / \eta_{tc} = 0,0007 x^2 - 0,043 x + 1,2814$ ($x = \text{argila} + \text{silte}$) para estimativa da porosidade total dos arenitos friáveis, o que é apresentado na Figura 57.

Figura 57 – A porosidade total estimada granulometricamente (η_{tg}) é próxima à porosidade total determinada pelo cilindro cortante (η_{tc}) para baixos teores de finos. Com o aumento de finos dos arenitos friáveis, a taxa η_{tg} / η_{tc} reduz-se progressivamente.



Fonte: Elaborada pelo autor.

Tendo-se verificado que a estimativa da porosidade total é feita satisfatoriamente através da equação $\eta_{tg} / \eta_{tc} = 0,0007 x^2 - 0,043 x + 1,2814$ ($x = \text{argila} + \text{silte}$), a porosidade efetiva dos arenitos friáveis pode também ser estimada através da equação de correção identificada na técnica (A) $\eta_{ec} / \eta_{tc} = - 0,00004 x^2 + 0,008 x + 0,775$ ($x = \text{argila} + \text{silte}$), partindo-se da porosidade total do cilindro (η_{tc}) cortante e granulometria por peneiramento e sedimentação com defloculante determinada em laboratório.

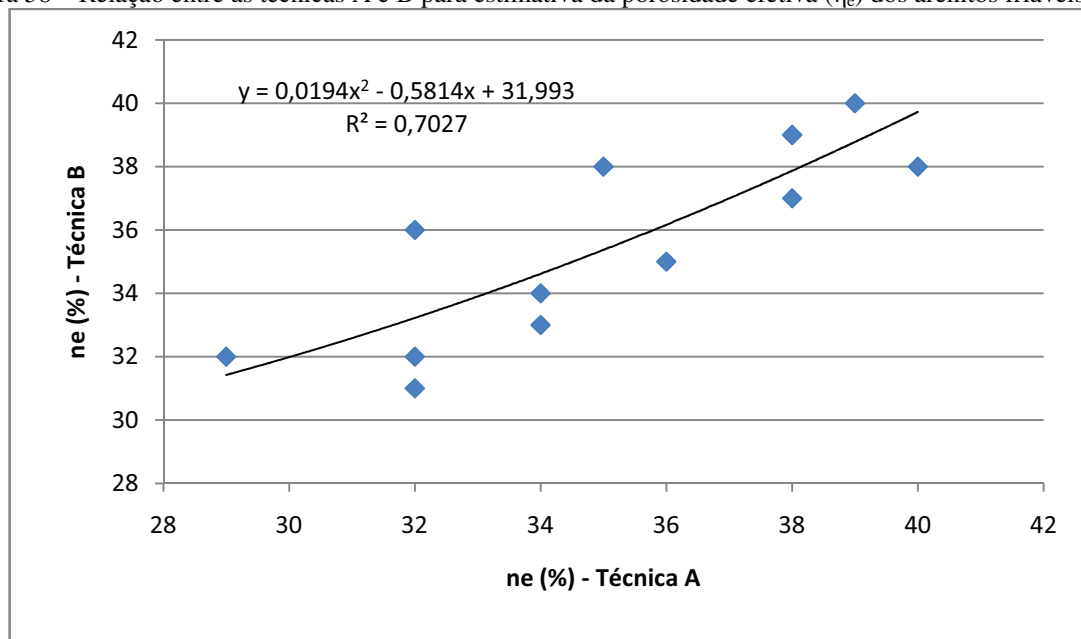
Outra forma de estimativa de porosidade efetiva dos arenitos friáveis, de grande utilidade de campo e modelagem de aquíferos, principalmente devido a sua simplicidade, rapidez e baixo custo, é a utilização das características granulométricas. Isso pode ser feito através da técnica de Johnson (1967), aplicando-se a correção identificada na técnica (B) $\eta_{tg} / \eta_{ec} = 0,001x^2 - 0,062x + 1,607$ ($x = \text{argila} + \text{silte}$).

Uma comparação entre ambas as formas de estimativa da porosidade efetiva (Quadro 05) é feita utilizando-se todo o conjunto de amostras de arenitos friáveis (Figura 58), observando-se que essas técnicas apresentam resultados aproximados.

Quadro 05 – Técnicas de estimativa da porosidade efetiva para arenitos friáveis.

TÉCNICA	DETERMINAÇÕES DIRETAS	ESTIMATIVA DA POROSIDADE EFETIVA
A	- Porosidade total (η_{tc}) pela técnica do cilindro cortante - Granulometria por peneiramento e sedimentação com defloculante	$\eta_t \rightarrow \eta_e = -0,00004 x^2 + 0,008 x + 0,775$ (x = argila + silte) $R^2 = 0,9174$
B	- Granulometria por peneiramento e sedimentação com defloculante	granulometria $\rightarrow \eta_{tg} \rightarrow$ $\eta_e = 0,001x^2 - 0,062x + 1,607$ (x = argila + silte) $R^2 = 0,977$

Fonte: Elaborada pelo autor.

Figura 58 – Relação entre as técnicas A e B para estimativa da porosidade efetiva (η_e) dos arenitos friáveis.

Fonte: Elaborada pelo autor.

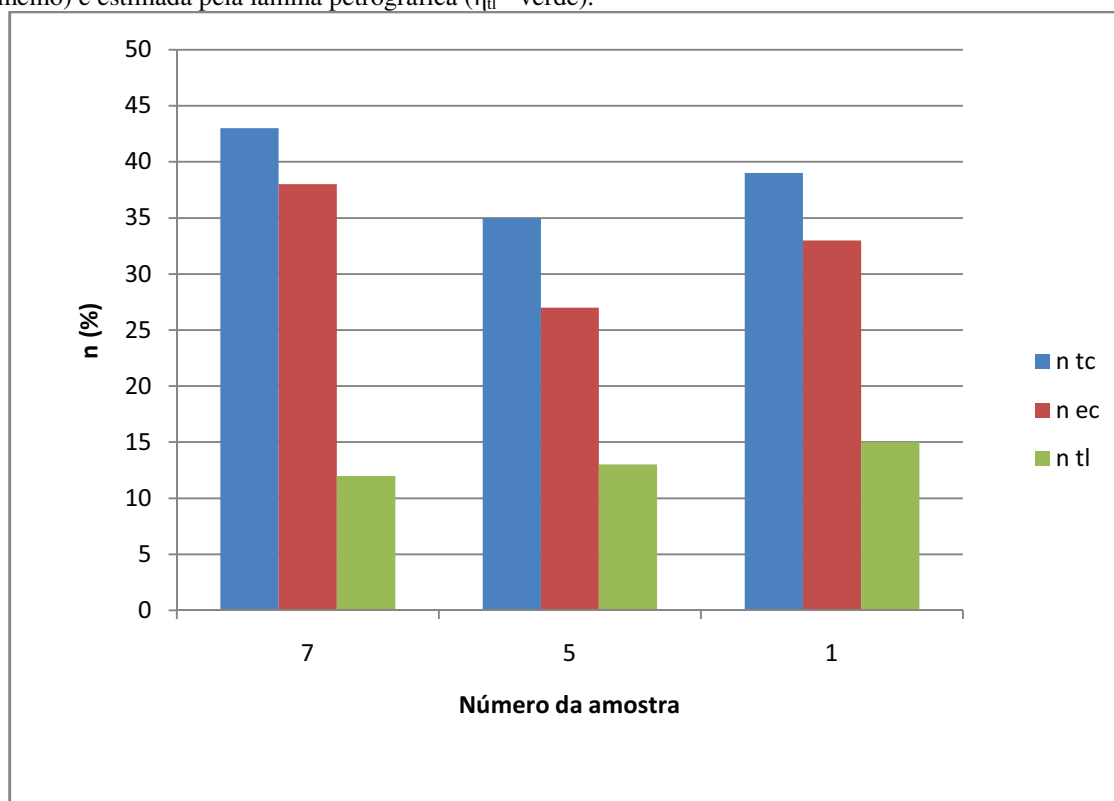
As porosidades totais estimadas petrograficamente (η_{tl}), comumente utilizada em estudos de permo-porosidade, mostram-se inferiores às porosidades totais (η_{tc}) e efetivas (η_{ec}) coletadas pelo cilindro cortante num mesmo ponto de coleta (Tabela 10 e Figura 59).

Tabela 05 - Valores de porosidade de arenitos friáveis e coerentes, determinados pelo cilindro cortante (η_{tc} e η_{ec}) e lâminas petrográficas (η_{tl}).

AMOSTRA	FORMAÇÃO	η_{tc} (%)	η_{ec} (%)	η_{tl} (%)
AM - 07	PIRAMBÓIA	43	38	12
AM - 05	BOTUCATU	35	27	13
AM - 01	BOTUCATU	39	33	15

Fonte: Elaborada pelo autor.

Figura 59 – Porosidade total e efetiva determinada em amostras com cilindro cortante (η_{tc} - azul) e (η_{ec} - vermelho) e estimada pela lâmina petrográfica (η_{tl} - verde).



Fonte: Elaborada pelo autor.

Os valores de porosidade total e efetiva, tanto diretamente determinados, como aqueles estimadas pela equação $\eta_{tg} / \eta_{tc} = 0,0007 x^2 - 0,043 x + 1,2814$ ($x = \text{argila} + \text{silte}$) ou pelas técnicas A e B (Tabela 06), apresentam valores próximos às porosidades encontradas por Heine (2008). As porosidades totais encontradas por esse autor através da perfilagem geofísica de poço variam entre 30% e 35%, e efetivas variam entre 18% a 30%. Por sua vez as porosidades totais determinadas ficam entre 35% a 43%, enquanto efetivas variam de 27% a 39%.

Tabela 06 – Porosidades total e efetiva obtidas pelas técnicas A e B para a Formação Pirambóia (cor vermelha) e para a Formação Botucatu (cor preta).

NÚMERO DA AMOSTRA	FORMAÇÃO					
	PIR	BOT	TÉC. A η_t (%)	TÉC. A η_e (%)	TÉC. B η_t (%)	TÉC. B η_e (%)
AM - 01		X	39	34	41	34
AM - 02		X	41	38	42	39
AM - 03		X	38	32	42	32
AM - 04		X	37	35	41	38
AM - 05		X	35	29	42	32
AM - 06		X	36	32	43	36
AM - 07	X		43	38	43	37
AM - 08	X		39	36	39	35
AM - 09		X	40	34	41	33
AM - 10	X		41	40	40	38
AM - 11	X		39	38	41	39
AM - 12		X	40	39	42	40
AM - 14		X	38	32	40	31

Fonte: Elaborada pelo autor.

Outro aspecto interessante a ser considerado é que a argililidade varia entre 28% a 45%, estimada pela técnica geofísica (HEINE, 2008), valores superiores aos encontrados em análises granulométricas (0% a 6%), bem como superiores aos teores argila + silte (1% a 29%). Esses resultados indicam que a avaliação geofísica superestima o teor de finos.

As porosidades efetivas determinadas pelo cilindro cortante mostram valores aproximados aos obtidos pela equação estimadora pela técnica B, ao longo do perfil colunar do SAG (Figura 60). Por sua vez, como essas equações foram desenvolvidas para arenitos friáveis, os desvios crescem no topo da coluna da formação Botucatu (- 4% a - 5%), onde passam a ocorrer arenitos coerentes em contato com as rochas vulcânicas da Formação Serra Geral.

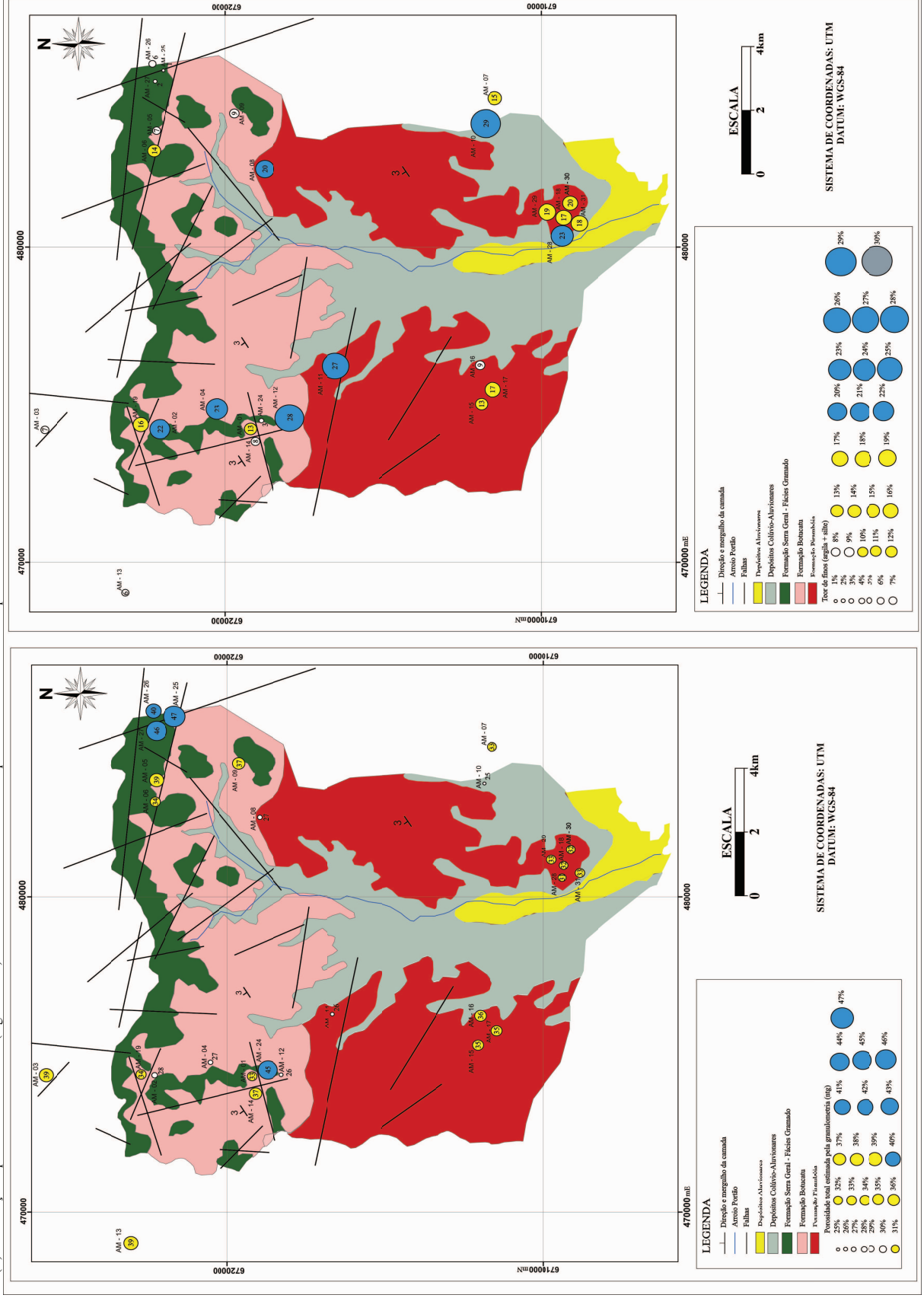
Figura 60 – Teor de finos (argila + silte) e porosidades totais e efetivas determinada em amostras com cilindro cortante (η_{tc} e η_{ec}) e estimadas pela técnica B ao longo do perfil colunar do SAG na sub-bacia do Arroio Portão.

ESPESSURAS (m)	FORMAÇÃO	AMOSTRA	ARGILA + SILTE (%)	n Determinado n _{tc} (%)	n _{ec} (%)	n Estimado téc B n _t (%)	n _e (%)	Δ n _e (%) ne determinado - ne estimado
0	AMIGDALOIDE							
20	INTERTRAP							
40	DIABÁSIO (DIREÇÃO NW)							
60	AMIGDALOIDE							
60	METAMORFISMO TÉRMICO	AM - 05	7	35	27	42	32	- 5
80		AM - 04	23	37	34	41	38	- 4
100		AM - 01	13	39	33	41	34	- 1
120	ESTRATIFICAÇÃO CRUZADA	AM - 12	28	40	38	42	40	- 2
140		AM - 02	22	41	38	42	39	- 1
160		AM - 14	8	38	30	40	31	- 1
180	DIABÁSIO (DIREÇÃO NW)							
190								
HIATO DEPOSICIONAL								
190								
200		AM - 08	20	39	35	39	35	0
220	ESTRATIFICAÇÃO CRUZADA							
240		AM - 11	27	39	37	41	39	- 2
260								
280	DIABÁSIO (DIREÇÃO NW)							
300								
320		AM - 10	29	41	39	40	38	+ 1
340								
360	DIABÁSIO (DIREÇÃO NW)							
380		AM - 07	15	43	37	43	37	0
400								
410	RIO DO RASTO							

Fonte: Elaborada pelo autor.

Uma forma de avaliar a variação espacial e o condicionamento geológico da porosidade é fornecida pelas Figuras 61 – A e B. Verifica-se que os maiores valores de porosidade total pela granulometria (η_{tg}) encontram-se próximos aos lineamentos tectônicos, enquanto teor de finos (argila + silte) mostra menores valores próximos a esses lineamentos. Esses resultados mostram que a porosidade total do SAG é um atributo espacialmente heterogêneo.

Figura 61 – (A) Distribuição dos valores de porosidade total pela granulometria (η_{tp}) dos arenitos frágeis determinados em amostras de superfície. Observa-se que a porosidade total aumenta nas proximidades dos lineamentos tectônicos. (B) Distribuição espacial do teor de finos (argila + silte) dos arenitos frágeis. Observa-se que teor de finos diminui nas proximidades dos lineamentos tectônicos.



Fonte: Modificada de Wildner et al. (2008).

5.5 PERMEABILIDADE

Os resultados das determinações de permeabilidade estão expressos na tabela 07, quadro 06 e na Figura 62.

Tabela 07 – Valores de permeabilidade na transversal (K_T), permeabilidade na longitudinal (K_L), permeabilidade na transversal estimado por d_{20} , diâmetro máximo correspondente a 20% em peso da amostra total (d_{20}), granulometria (argila + silte) e porosidade total pela granulometria obtidos para os arenitos da Formação Botucatu e Pirambóia.

AMOSTRA	K_T (cm/s)	K_L (cm/s)	K_T est d_{20} (cm/s)	d_{20}	Argila + silte (%)	n_{tg} (%)	FORMAÇÃO	
							BOT	PIR
AM-11	1,98x10-6	1,86x10-5	2,54x10-5	0,026	27	26		X
AM-10	5,57x10-6	6,73x10-5	2,32x0-5	0,023	29	25		X
AM-02	2,25x10-5	2,48x10-5	3,51x10-5	0,037	22	28	X	
AM-04	8,36x10-5	2,45x10-4	3,60x10-5	0,038	23	27	X	
AM-03	1,53x10-4	2,01x10-4	1,16x10-4	0,092	7	39	X	

Fonte: Elaborada pelo autor.

Os valores encontrados para as permeabilidades situam-se entre $2,32 \times 10^{-5}$ cm/s e $3,53 \times 10^{-4}$ cm/s e média de $9,6 \times 10^{-5}$ cm/s para a Formação Pirambóia, enquanto a Formação Botucatu mais permeável com média de $1,5 \times 10^{-4}$ cm/s e variando de $2,4 \times 10^{-5}$ cm/s e $3,4 \times 10^{-4}$ (Figura 62).

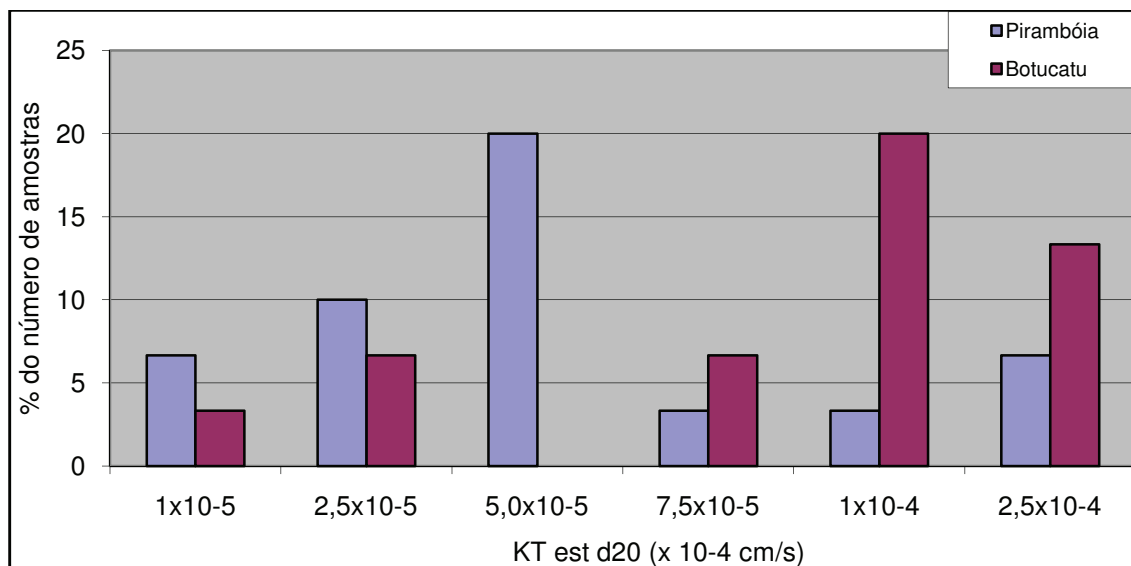
Segundo a classificação do DAEE/USP (1992), como apresentado no quadro 13, esses valores caracterizam estes aquíferos como pobres com pequena impermeabilidade.

Quadro 06 – Classificação do SAG para a sub-bacia do Arroio Portão.

Permeabilidade cm/s	10^{-9}	10^{-8}	10^{-7}	10^{-6}	10^{-5}	10^{-4}	10^{-3}	10^{-2}	10^{-1}	10^0	10^1
Classificação da Permeabilidade	Impermeável		Pouco Impermeável		Pequena Impermeabilidade		Permeável		Muito Permeável		
Classificação Hidrogeológica	Aquicludo		Aquitardo		Aquífero Pobre		Aquífero Regular a Bom		Aquífero Excelente		
Tipos de materiais	Argilitos Ardósias Granitos		Siltito Siltito Arenoso Argilitos		Areia Fina/Siltito Areia Siltosa Calcário Fraturnado		Areia Limpa Conglomerado Arenoso Areia Fina		Seixos Limpos		

Fonte: modificado de DAEE/USP (1992).

Figura 62 – Gráfico dos intervalos de valores de condutividade hidráulica estimado pelo d_{20} X porcentagem do número de amostras para as formações Pirambóia e Botucatu.



Fonte: Elaborada pelo autor.

Anisotropia e paleocorrentes

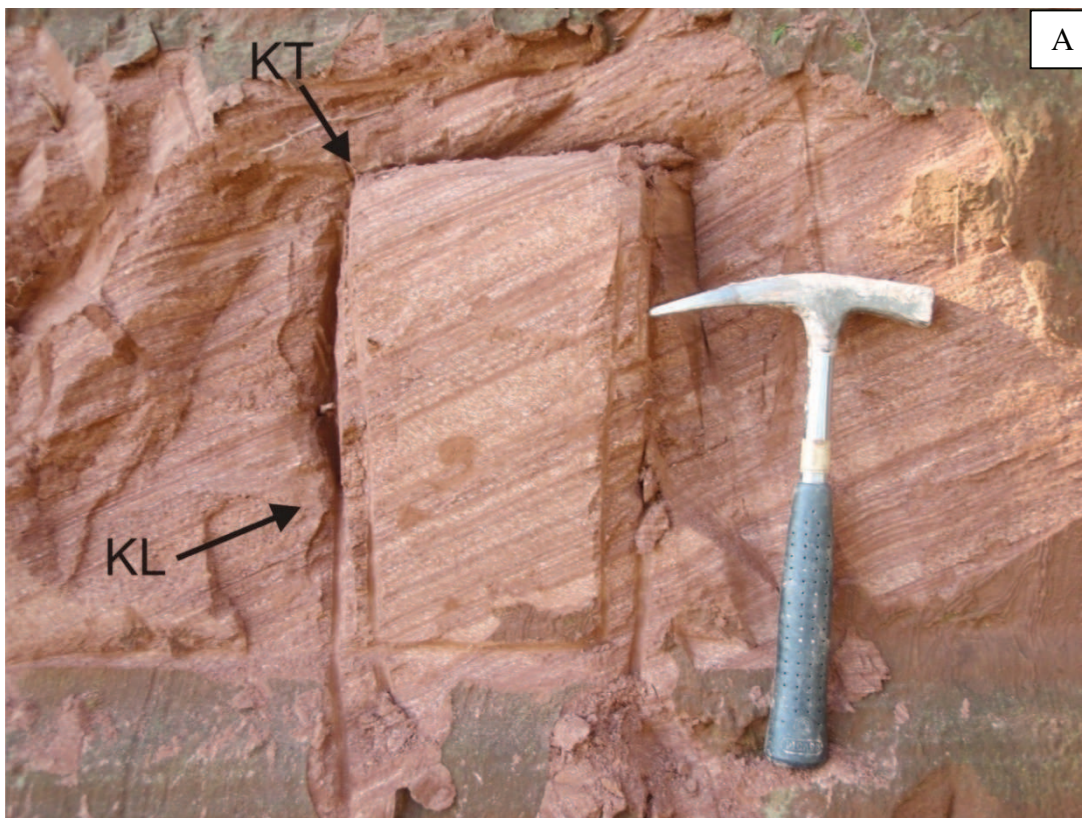
A permeabilidade obtida nos arenitos friáveis mostrou valores variáveis conforme orientação quanto à estratificação (Figura 63 - A). Os valores de permeabilidades longitudinais à estratificação são iguais ou maiores que aos das permeabilidades transversais. Como pode ser observado na Figura 63 - B constata-se que o aquífero é anisotrópico, mostrando que a permeabilidade está condicionada pela orientação dos estratos e pelas paleocorrentes do ambiente eólico.

A ordem de grandeza das variações de K_L em relação à K_T pode ser observada na Figura 64, verificando-se que a Formação Pirambóia apresenta os menores valores de K_T , porém atinge relações $K_L / K_T = 9$ a 11. A Formação Botucatu, embora com maiores valores de K_T , apresenta menor anisotropia, com taxa $K_L / K_T = 1$ a 3.

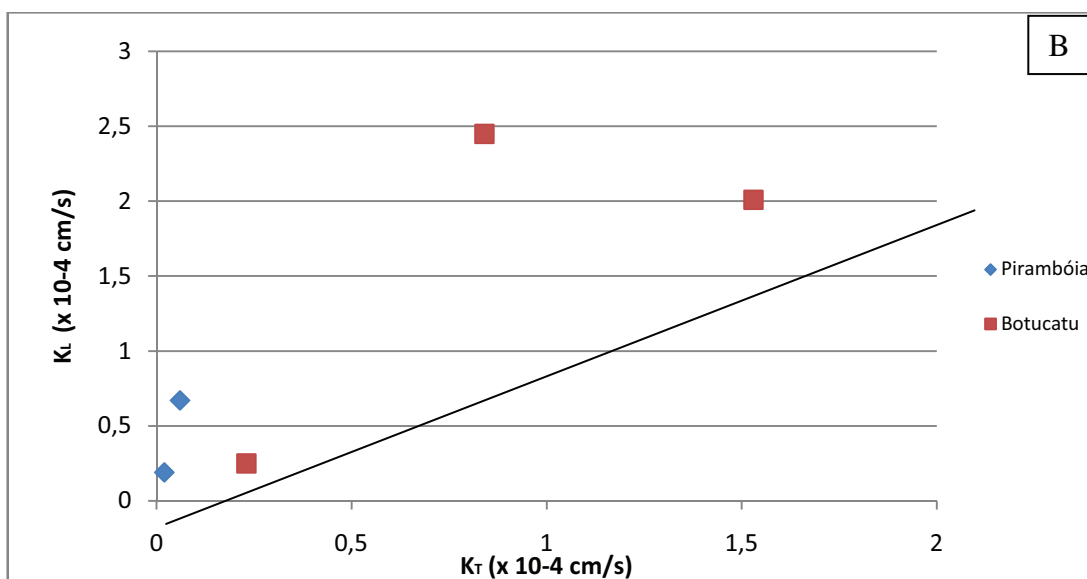
As variações de K_L / K_T em relação ao teor de finos são apresentadas na Figura 65, observando-se que, com o aumento de teor de finos (argila + silte), menor será o K_T em ambas as formações Botucatu e Pirambóia.

Figura 63 – (A) Permeabilidades longitudinais (K_L) e transversais (K_T) à estratificação. (B) Os valores de K_L são sempre iguais ou maiores que K_T . As permeabilidades da Formação Pirambóia são inferiores às da Formação Botucatu.

A – Retirada de amostra indicando-se a orientação de moldagem para testes da permeabilidade longitudinal (K_L) e transversal (K_T).

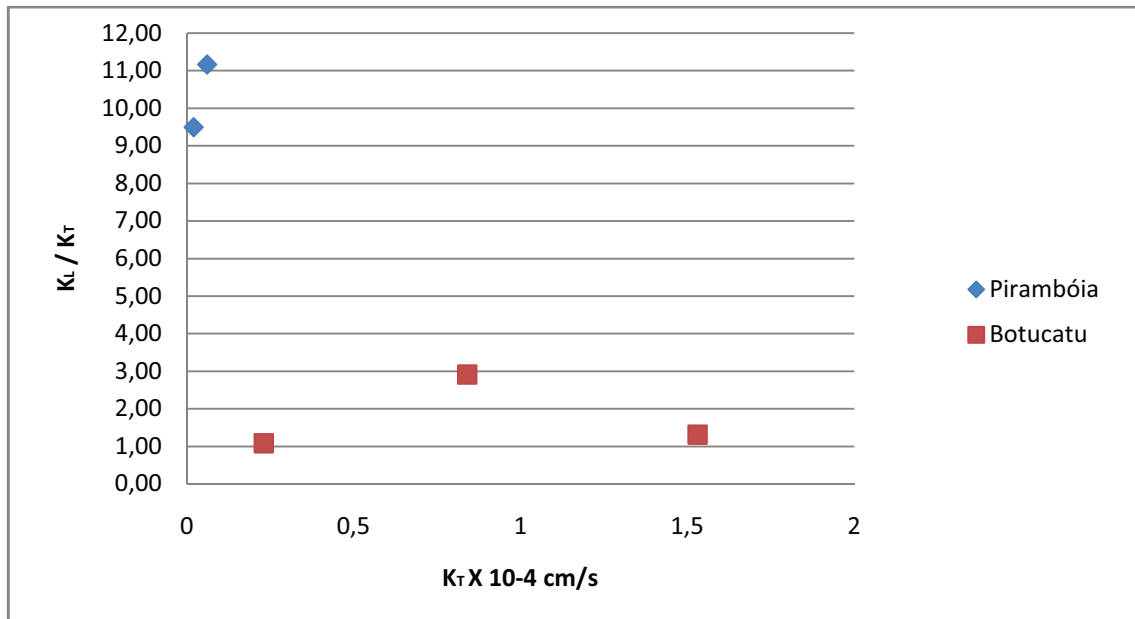


B – Relações entre as permeabilidades longitudinais (K_L) e transversais (K_T) a estratificação cruzada.



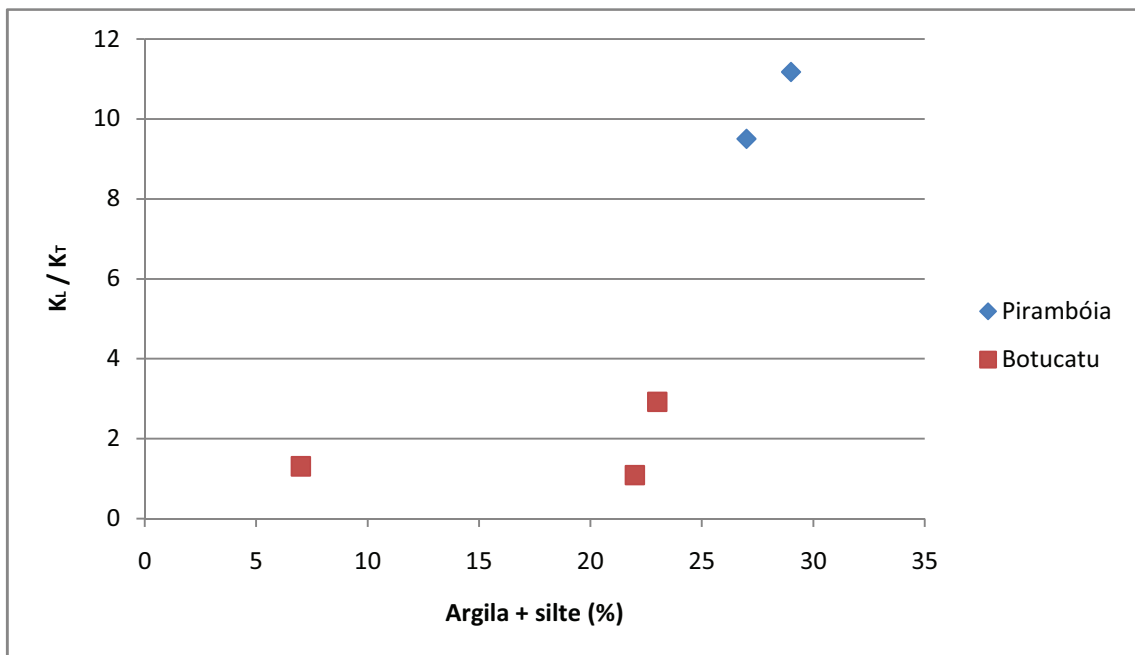
Fonte: Elaborada pelo autor.

Figura 64 – Variação da anisotropia da permeabilidade nas formações Botucatu e Pirambóia.



Fonte: Elaborada pelo autor.

Figura 65 – Variação da anisotropia da permeabilidade em relação ao teor de finos (argila + silte) nas formações Botucatu e Pirambóia.



Fonte: Elaborada pelo autor.

Granulometria, porosidade e permeabilidade

Algumas relações entre a granulometria e a permeabilidade utilizadas normalmente para solos, como citados por autores como Hazen (1911) e Shepherd (1989), verificam-se para rochas sedimentares friáveis da sub-bacia do Arroio Portão/RS.

O método de Hazen não pode ser utilizado, pois nenhuma amostra apresentou na curva granulométrica diâmetro efetivo dos grãos (d_{10}) entre 0,1 e 3,0mm, enquanto que o método de Shepherd não foi possível de ser utilizado por apresentar valores extremamente elevados de permeabilidade.

A permeabilidade transversal (K_T) retrata melhor o efeito da caulinitização, uma vez que os estratos mais caulinitizados restringem o fluxo da água subterrânea.

As relações entre K_T e a granulometria são apresentadas nas Figuras 66 e 67. Esses resultados mostram que as equações (1) e (2) podem ser utilizadas para estimativa de K_T a partir da granulometria dos arenitos.

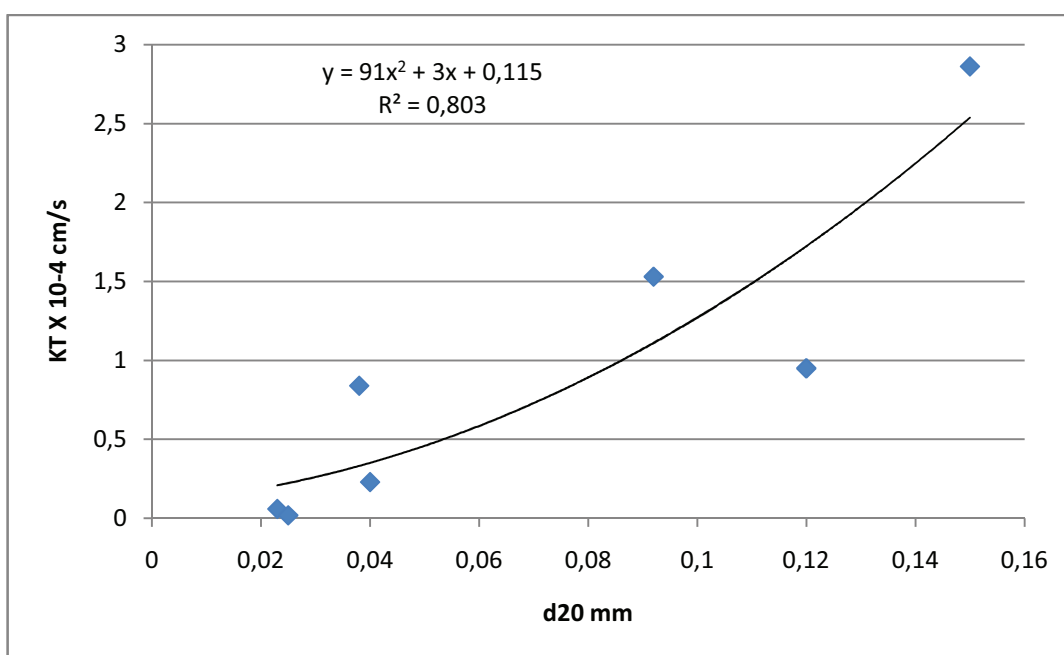
$$K_T = 91 \cdot (x)^2 + 3 \cdot (x) + 0,115 \text{ expressa em cm/s} \quad (1)$$

$$(x = d_{20}) \quad R^2 = 0,803$$

$$K_T = -0,001 \cdot (x)^2 - 0,039 \cdot (x) + 2,459 \text{ expressa em cm/s} \quad (2)$$

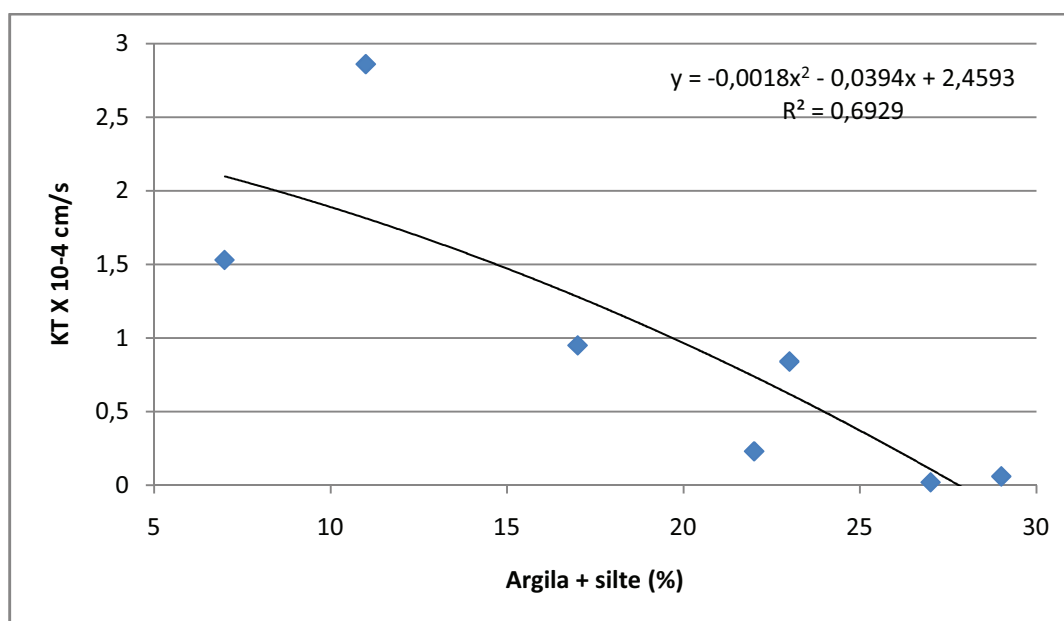
$$(x = \% \text{ argila} + \text{ silte}) \quad R^2 = 0,692$$

Figura 66 – Relações da permeabilidade transversal (K_T) com d_{20} (diâmetro para 20% passante).



Fonte: Elaborada pelo autor.

Figura 67 – Relações da permeabilidade transversal (K_T) com o teor de finos (argila + silte).



Fonte: Elaborada pelo autor.

A relação entre os valores estimados para K_T pela equação (1) e a porosidade total pela granulometria (η_{tg}) mostra que nos arenitos friáveis das formações Botucatu e Pirambóia na área em estudo quando houver um acréscimo na porosidade, há um respectivo aumento na permeabilidade (Figura 68), não se considerando as amostras coerentes e próximas do contato entre as formações Botucatu e Serra Geral.

As amostras da Formação Botucatu com maiores valores de permeabilidade se encontram no contato com a Formação Serra Geral sobre os lineamentos tectônicos que facilitam uma percolação de fluidos.

Quando aumenta o teor de finos (argila + silte) nas amostras, em relação aos valores estimados para K_T pela equação (1), observa-se que menor será a permeabilidade (Figura 69).

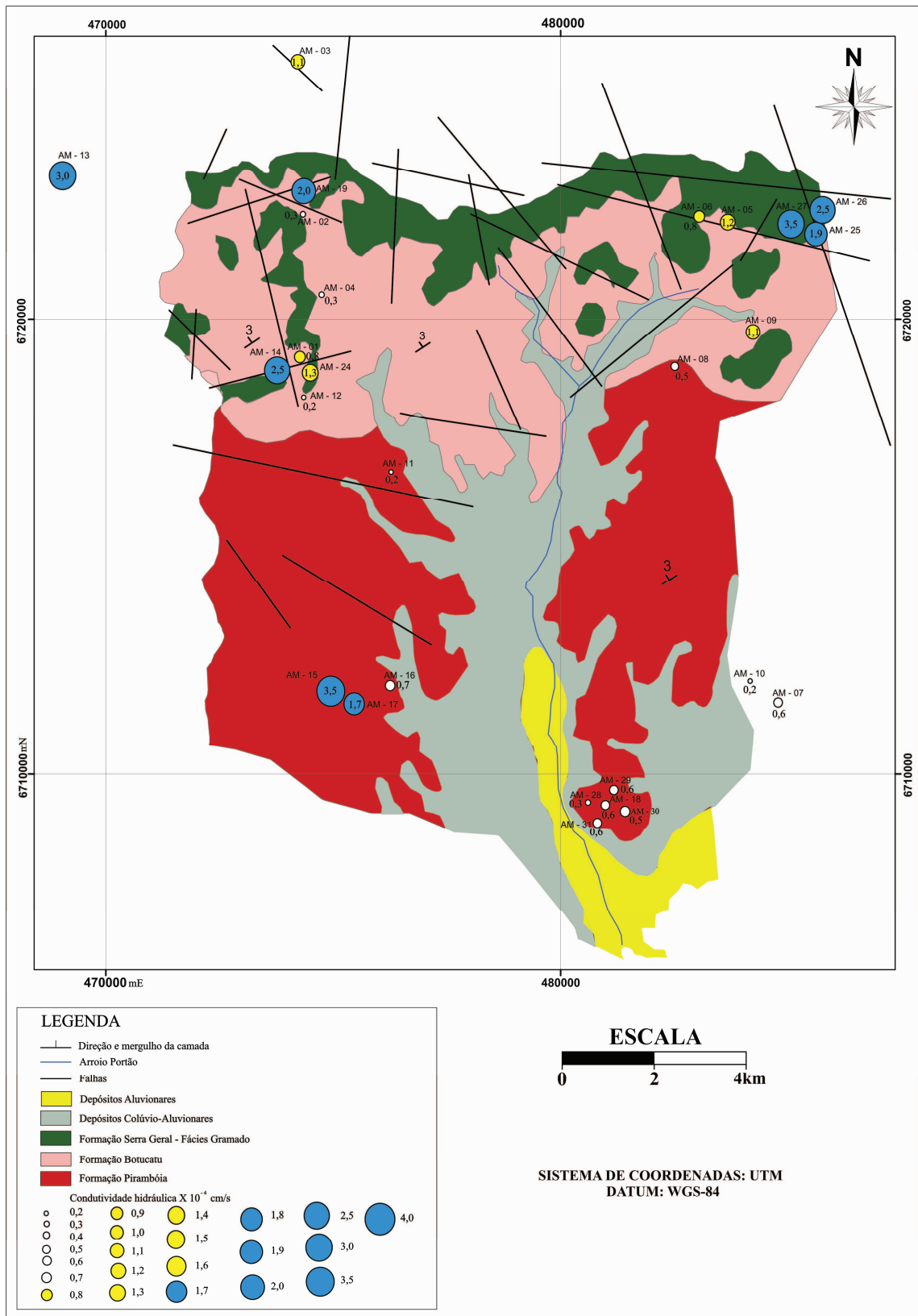
Controle estrutural da permeabilidade

Modelos numéricos estacionários para o fluxo subterrâneo, elaborados por Heine (2008) para a área próxima de Ivoti/RS, somente obtiveram ajuste satisfatório quando atribuídas aos lineamentos tectônicos permeabilidades de $8,0 \times 10^{-1}$ cm/s na transversal e $2,0 \times 10^{-1}$ cm/s na longitudinal, os quais correspondiam a valores superiores aos demais elementos do modelo.

A espacialização dos valores estimados de K_T (Figura 70) mostra que a permeabilidade aumenta nas imediações dos lineamentos tectônicos, o que está de acordo com a hipótese de modelamentos acima descrito.

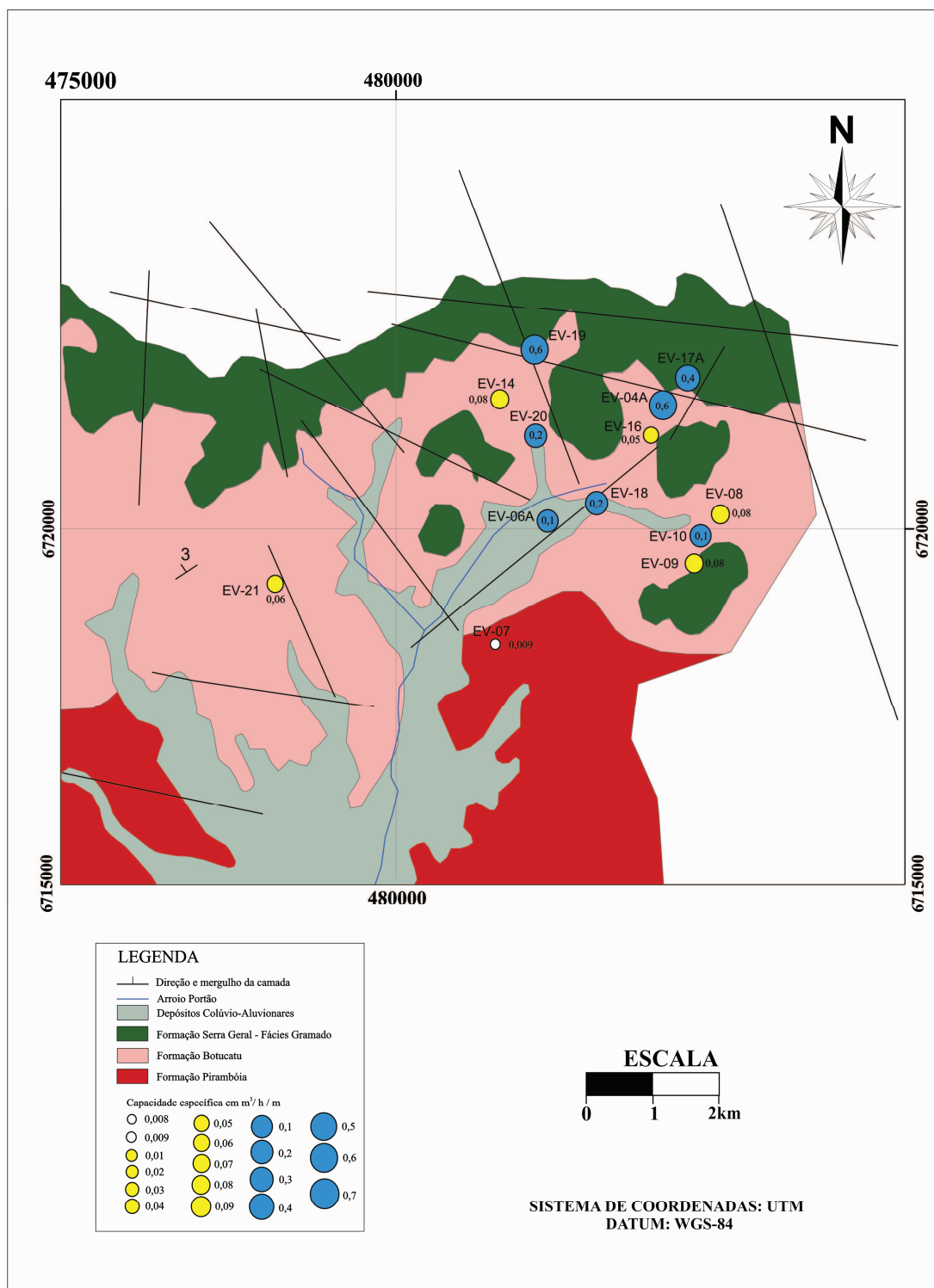
Comportamento análogo foi observado para a capacidade específica de poços tubulares da CORSAN (Figura 71). Os maiores valores encontram-se no cruzamento de lineamentos tectônicos, principalmente lineamentos com orientação NW.

Figura 70 – Distribuição espacial dos valores estimados de permeabilidade transversal a estratificação (K_T). As maiores permeabilidades ocorrem nas proximidades dos lineamentos tectônicos.



Fonte: Modificada de Wildner et al. (2008).

Figura 71 – Distribuição espacial da capacidade específica de poços tubulares. Os maiores valores encontram-se no cruzamento de lineamentos tectônicos, principalmente lineamentos NW.



Fonte: Modificada de Wildner et al. (2008).

6 CONCLUSÕES E CONSIDERAÇÕES FINAIS

Os resultados encontrados sustentam as seguintes conclusões:

- As rochas da sub-bacia do Arroio Portão apresentam uma geometria tabular e uma atitude regional N 45° E / 3° NW. A espessura estimada para a Formação Pirambóia é de 210m, enquanto a espessura determinada para a Formação Botucatu é de 130m; portanto, a espessura total do SAG é igual ou superior a 340m.

- Os arenitos das formações Pirambóia e Botucatu apresentam 04 tipos de cimentação: carbonática, silicosa, caulínica e ferruginosa. O tipo e as variações de intensidade da cimentação resultam em diferentes graus de coerência dos arenitos. No contato com a Formação Serra Geral, onde são intensos os processos de sobrecrescimento de quartzo, cimentação carbonática e precipitação de óxido de ferro, os arenitos apresentam coerência elevada. Por sua vez, a caulinitização dos feldspatos, mesmo com a precipitação de óxido de ferro entre os grãos, está frequentemente associada aos arenitos friáveis.

- Na Formação Botucatu, predominam teores de 0% a 10% de silte + argila, enquanto que, para a Formação Pirambóia esses situam-se entre 15% a 20%. Os teores de argila variam de 0% e 6%. Para ambas as formações, a fração fina atual não deve refletir a granulometria original do ambiente sedimentar, sendo provavelmente resultante a neoformação de argilominerais (caulinita).

- As paleocorrentes apresentaram dois padrões dominantes, para a Formação Pirambóia um nordeste e outro sudeste, para a Formação Botucatu ocorre apenas o padrão nordeste.

- A orientação dos lineamentos tectônicos para as formações Botucatu e Serra Geral é coincidente, predominando os sistemas: 270° - 290° e 340° - 350°.

- Inúmeras intrusões vulcânicas na forma de diques de diabásio foram detectadas, as quais cortam as rochas das formações Pirambóia, Botucatu e Serra Geral. Essas intrusões apresentam orientações segundo os azimutes 290° e 340°, coincidentemente com os lineamentos de maior extensão. Há maior incidência das intrusões segundo a orientação 335° - 340°.

- A porosidade efetiva dos arenitos friáveis pode ser estimada através da técnica (A), partindo-se da porosidade total do cilindro (η_{tc}) cortante e granulometria por peneiramento e sedimentação com defloculante determinada em laboratório, como também pela técnica (B), granulometria por peneiramento e sedimentação com defloculante determinada em laboratório e estimando pela técnica do triângulo de Johnson a porosidade total.

$$(A) \eta_{ec} / \eta_{tc} = - 0,00004 x^2 + 0,008 x + 0,775 \quad (x = \text{argila} + \text{silte}) \quad R^2 = 0,9174$$

$$(B) \eta_{tg} / \eta_{ec} = 0,001x^2 - 0,062x + 1,607 \quad (x = \text{argila} + \text{silte}) \quad R^2 = 0,977$$

- Os maiores valores de porosidade total estimados pela granulometria encontram-se próximos aos lineamentos tectônicos, enquanto o teor de finos (argila + silte) apresenta menores valores próximos aos lineamentos.

- No contato entre a Formação Botucatu e a Formação Serra Geral, a cimentação silicosa dada pelo sobrecrescimento de quartzo e a cimentação carbonática, ambas intragranulares, levam a uma porosidade e permeabilidade muito baixa ou nula.

- As permeabilidades da Formação Pirambóia situam-se entre $2,32 \times 10^{-5}$ cm/s e $3,53 \times 10^{-4}$ cm/s, enquanto a Formação Botucatu, mais permeável, varia de $2,4 \times 10^{-5}$ cm/s e $3,4 \times 10^{-4}$. Esses valores caracterizam estes aquíferos como pobres com alguma impermeabilidade.

- A estratificação controla a permeabilidade, sendo mais permeável longitudinalmente aos estratos que transversalmente. Isso caracteriza o SAG para os Aquíferos Pirambóia e Botucatu como anisotrópicos.

- A permeabilidade transversal (K_T) retrata melhor o efeito da caulinitização, uma vez que os estratos caulinitizados dificultam o fluxo da água subterrânea. A estimativa de K_T a partir da granulometria dos arenitos mostrou-se como uma ferramenta de fácil aplicação e confiável e pode ser feita através das equações:

$$K_T = 91 \cdot (x)^2 + 3 \cdot (x) + 0,115 \quad (\text{cm/s}) \quad (x = d_{20}) \quad R^2 = 0,803 \quad (1)$$

$$K_T = - 0,001 \cdot (x)^2 - 0,039 \cdot (x) + 2,459 \quad (\text{cm/s}) \quad (x = \text{argila} + \text{silte}) \quad R^2 = 0,692 \quad (2)$$

- A permeabilidade é maior nas imediações dos lineamentos tectônicos, principalmente os com orientação NW, coincidentemente os poços tubulares perfurados pela CORSAN nestes alinhamentos tiveram a melhor capacidade específica.

- Para futuros modelos de fluxo e o planejamento e a proteção do aquífero nesta região deve-se, com base nas características da fração fina dos arenitos e proximidade dos lineamentos tectônicos, utilizar diferentes valores de porosidade e permeabilidade para as rochas constituintes do SAG.

REFERÊNCIAS

ASSINE, Mario Luis; PIRANHA, Joseli Maria; CARNEIRO, Celso Dal Ré. Os Paleodesertos Pirambóia e Botucatu. In: MANTESSO-NETO, Virginio; BARTORELLI, Andrea; CARNEIRO, Celso Dal Ré; BRITO-NEVES, Benjamim Bley (Org.). **Geologia do Continente Sul-Americano: Evolução da Obra de Fernando Flávio Marques de Almeida**. São Paulo: Beca Produções Culturais Ltda, 2004. p. 77-90.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6502**: Rochas e solos - Terminologia. Rio de Janeiro, 1995.

_____. **NBR 7181**: Solo – Análise Granulométrica. Rio de Janeiro, 1984.

_____. **NBR 13292**: Solo – Determinação do coeficiente de permeabilidade de solos granulares à carga constante. Rio de Janeiro, 1995.

_____. **NBR 14545**: Solo – Determinação do coeficiente de permeabilidade de solos argiloso a carga variável. Rio de Janeiro, 2000.

BARBOZA, Ana Carolina Lisbôa; SILVA Jr., Gerson Cardoso; MELLO, Claudio Limeira. Caracterização de parâmetros hidráulicos em depósitos fluviais paleogênicos na Bacia de Volta Redonda, RJ. **Anuário do Instituto de Geociências – UFRJ**, Rio de Janeiro, v. 30, n. 2, p. 118-132, 2007.

BONET, Euclides Jose; GABRIELLI, M.. Propriedades das Rochas – Notas de aula. Petrobras, Salvador, BA, 1991.

CETESB. Projeto Construção e Manutenção de Poços. In: CURSO DA COMPANHIA ESTADUAL DE TECNOLOGIA E SANEAMENTO AMBIENTAL, 1., 1977, São Paulo.

CHILINGAR, George; MAIN, Richard; SINNOKROT, Ali. Relationship between porosity, permeability, and surface areas of sediments. **Journal of Sedimentary Research**, v. 33, n. 3, p. 759-765, 1963.

CLEARY, Robert. **Águas Subterrâneas**. Tampa: Marques-Saraiva Gráficos e Editores S.A., 2007.

CPRM. **Excursão Virtual pela Serra do Rio do Rastro**. Porto Alegre, 2002. Disponível em: <<http://www.cprm.gov.br/coluna/coluna.htm>>. Acesso em: 5 agosto 2009.

CPRM. **Excursão Virtual aos Aparados da Serra - RS/SC**. Salvador, outubro, 2004. Disponível em: <http://www.cprm.gov.br/Aparados/ap_geol_pag05.htm>. Acesso em: 2 agosto 2009.

DAEE/USP. **Projeto, Perfuração e Operação de Poços Profundos: Cursos de formação e especialização**. Ribeirão Preto, 1992. p. 1-249.

DANIEL, David Edwin. Laboratory Hydraulic Conductivity Tests for Saturated Soils. In: DANIEL, David Edwin; TRAUTWEIN, Stephen (Org.). **Hydraulic Conductivity and Waste Contaminant Transport in Soil**. Philadelphia: American Society for Testing and Materials, 1994 p. 30-78.

DRISCOLL, Fletcher. **Groundwater & Wells**. Minnesota: Johnson Screens, 1986.

E-GEO. **Léxico de Termos Hidrogeológicos**: Capacidade Específica de um furo. Disponível em: <http://e-geo.ineti.pt/bds/lexico_hidro/lexico.aspx?Termo=Capacidade+de+Campo>. Acesso em: 15 jul. 2010.

FACCINI, Ubiratan Ferrucio; GIARDIN, Arnoldo; MACHADO, José Luiz Flores. Sedimentologia de Aquíferos. Heterogeneidades Litofaciológicas e Hidroestratigrafia do Sistema Aquífero Guarani na Região Central do Estado do Rio Grande do Sul, Brasil. In: PAIM, Paulo Sérgio Gomes; FACCINI, Ubiratan Ferrucio; NETO, Renata Guimarães (Org.). **Geometria, arquitetura e heterogeneidades de corpos sedimentares. Estudo de casos**. São Leopoldo: Ponto-e-Vírgula Assessoria Editorial, 2003. cap.3, p. 147-173.

FETTER, Charles Willard. **Applied Hydrogeology**. New Jersey: Columbus, Charles E. Merrill Publishing Company, 1998.

GIANNINI, Paulo César Fonseca. Depósitos e Rochas Sedimentares. In: TEIXEIRA, Wilson; TOLEDO, Maria Cristina Motta de; FAIRCHILD, Thomas Rich; TAIOLI, Fabio (Org.). **Decifrando a Terra**. São Paulo: Oficina de Textos, 2000. cap. 14, p. 285-301.

GOLDBERG, Karin. **Caracterização das heterogeneidades do espaço permo-poroso do Sistema Aquífero Guarani**. 2003. 65 f. Relatório de bolsa recém doutor (Processo 02/60096.1) -- Programa de Pós-Graduação em Geologia. Universidade do Vale do Rio dos Sinos, São Leopoldo, RS, 2003.

GOMES, Carísia Carvalho. **Aula 4 Hidrogeologia – Coeficiente de armazenamento**. Disponível em: <<http://www.carisia.com.br/Hidrologia-Aula4coeficientedearmacenamento.pdf>>. Acesso em: 28 março 2010.

GORDON, Mackenzie Junior. Classification of the gondwanic rocks of Paraná, Santa Catarina and Rio Grande do Sul. In: Notas Preliminares e Estudos, 38., 1947, DNPM, Div. Geol. Min, 1947. p. 1-19.

HAUSMAN, Abrão. Províncias Hidrogeológicas do Estado do Rio Grande do Sul. **Acta Geológica Leopoldensia**, São Leopoldo, Série mapa, n. 2, p. 127, 1995.

HAZEN, Allen. Discussion. Dams on sand foundation. Transactions. **American Society of Civil Engineers**. v. 73, n. 2., p. 199-203, 1911.

HEINE, Carlos Alvin. **Análise de Sustentabilidade de uso do Sistema Aquífero Guarani em Ivoti – RS**. 2008. 219 f. Tese (Doutorado em Geologia) -- Programa de Pós-Graduação em Geologia. Universidade do Vale do Rio dos Sinos, São Leopoldo, RS, 2008.

JOHNSON, Ann. I. Specific Yield: Compilation of Specific Yield for Various Materials. **U.S. Geological Survey Water Supply Paper**, Washington 1662-D, p. 1-74, 1967.

KOCUREK, Gary; HAVHOLM, Karen. Eolian sequence stratigraphy – a conceptual framework. In: WEIMER, Paul; POSAMENTIER, Henry (Org.). **Siliciclastic sequence stratigraphy – recent developments and applications**. Tulsa: American Association of Petroleum Geologists, AAPG Memoir, 1993. cap. 16, p. 393-409.

LAVINA, Ernesto Luiz. Correa; FACCINI, Ubiratan Ferrucio; RIBEIRO, Hélio Jorge Portugal Severiano. Formação Pirambóia (Permo-Triássico) no Rio Grande do Sul. **Acta Geológica Leopoldensia**, São Leopoldo, v. 16, n. 36, p. 179-197, 1993.

PINTO, Juliane dos Santos. **Estudo da Condutividade de Hidráulica de Solos para Disposição de Resíduos Sólidos na Região de Santa Maria**. 2005. 154 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) -- Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, RS, 2005.

PRESS, Frank; SIEVER, Raymond; GROTZINGER, John; JORDAN, Thomas. **Para entender a Terra**. Porto Alegre: Bookman, 2006.

MACHADO, José Luiz Flores. **Compartimentação Espacial e Arcabouço Hidroestratigráfico do Sistema Aquífero no Rio Grande do Sul**. 2005. 237 f. Tese (Doutorado em Geologia) -- Programa de Pós-Graduação em Geologia. Universidade do Vale do Rio dos Sinos, São Leopoldo, RS, 2005.

METROPLAN. Fotos aéreas 1:60.000 para estereoscopia: 120008, 120005, 120007, 12004, 111009, 111008, 111007, 111006, 111005, 122007, 122006, 122005. 1990.

NOGUEIRA, João Baptista. **Mecânica dos Solos – Ensaios de Laboratório**. São Carlos: Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, 2005.

RABELO, Shirley Katyanne Lemos. **Estudo sobre a viabilidade do cálculo da porosidade com base em um conjunto reduzido de perfis e sua aplicação na Bacia de Almada/BA**. 2004. 169 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Reservatório e de Exploração) -- Laboratório de Engenharia e Exploração de Petróleo. Universidade Estadual do Norte Fluminense, Macaé, RJ, 2004.

ROCHA, Gerônimo Albuquerque. O grande manancial do Cone Sul. **Revista de Estudos Avançados: IEA/USP**, São Paulo, v. 30, n. 11, p. 191-212, 1997.

ROISENBERG, Ari; VIERO, Antonio Pedro. O vulcanismo mesozóico da Bacia do Paraná no Rio Grande do Sul. In: HOLZ, Michel; DE ROS, Luiz Fernando (Org.). **Geologia do Rio Grande do Sul**. Porto Alegre: Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2000. p. 355-374.

SCHNEIDER, R. L.; MÜHLMANN, H.; TOMMASI, E.; MEDEIROS, R. A.; DAEMON, R. F.; NOGUEIRA, A. A. Revisão Estratigráfica da Bacia do Paraná. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA, XXVIII, 1974 – Porto Alegre. **Anais...** Porto Alegre: 1974. p. 41-65.

SHEPHERD, Russell. Correlations of Permeability and Grain Size. **Groundwater**. v. 5, n. 27, p. 633-638, 1989.

STEWART, Kathy; TURNER, Simon; KELLEY, Simon; HAWKESWORTH, Chris; KIRSTEIN, Linda; MANTOVANI, Marta. 3-D, ^{40}Ar - ^{39}Ar geochronology in the Paraná continental flood basalt province. **Earth and Planetary Letters**, v. 143, p. 95-109, 1996.

VERRUIJT, Arnold. **Theory of Groudwater Flow**. London: Macmillan, 1970.

WILDNER, Wilson; RAMGRAB, Gilberto Emílio; LOPES, Ricardo da Cunha; IGLESIAS, Carlos Moacyr da Fontoura. **Mapa geológico do Estado do Rio Grande do Sul**. CPRM Serviço Geológico do Brasil, Geologia e recursos minerais do Estado do Rio Grande do Sul. Porto Alegre: CPRM, 2008. 1 DVD. Escala 1:750.000.

ZALÁN, P. V.; WOLF, S.; CONCEIÇÃO, J. C. L.; ASTOLFI, A. M.; VIEIRA, I. S.; APPI, V. T.; ZANOTTO, O. A. Tectônica e Sedimentação da Bacia do Paraná. In: SBG, SIMPÓSIO SUL-BRASILEIRO DE GEOLOGIA, 3., 1987, Curitiba. **Anais...** Curitiba: 1987, p. 441-477.

ZALÁN, P. V.; WOLF, S.; CONCEIÇÃO, J. C. L.; ASTOLFI, A. M.; VIEIRA, I. S.; APPI, V. T.; ZANOTTO, O. A.; MARQUES, A. Tectonics and Sedimentation of Paraná Basin. In: INTERNATIONAL GONDWANA SYMPOSIUM, 7., 1991, São Paulo. **Proceedings...** São Paulo: IGc-USP, 1991 p. 83-117.