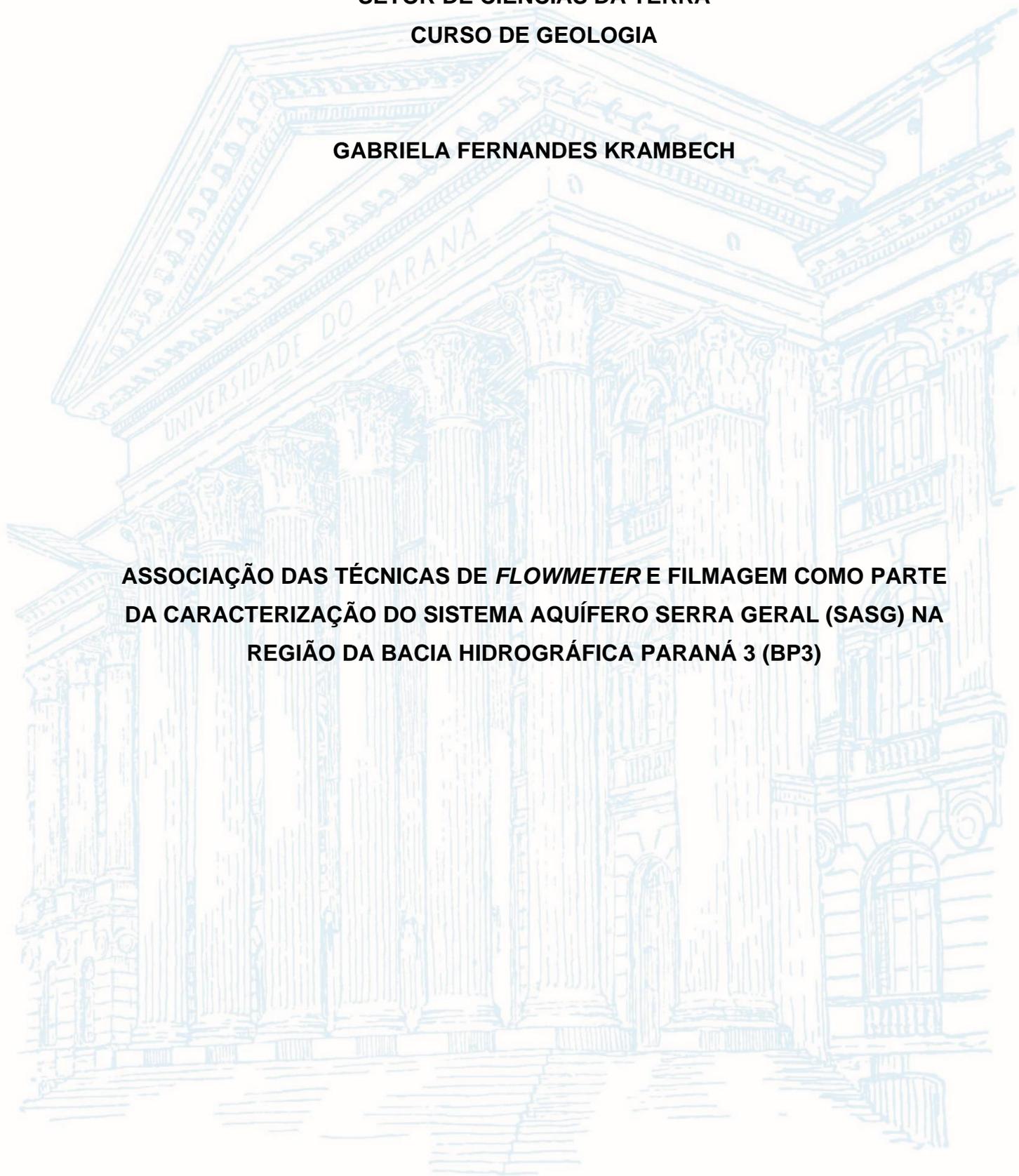


**UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ
SETOR DE CIÊNCIAS DA TERRA
CURSO DE GEOLOGIA**

GABRIELA FERNANDES KRAMBECH

**ASSOCIAÇÃO DAS TÉCNICAS DE *FLOWMETER* E FILMAGEM COMO PARTE
DA CARACTERIZAÇÃO DO SISTEMA AQUÍFERO SERRA GERAL (SASG) NA
REGIÃO DA BACIA HIDROGRÁFICA PARANÁ 3 (BP3)**



CURITIBA
2024

GABRIELA FERNANDES KRAMBECH

**ASSOCIAÇÃO DAS TÉCNICAS DE *FLOWMETER* E FILMAGEM COMO PARTE
DA CARACTERIZAÇÃO DO SISTEMA AQUÍFERO SERRA GERAL (SASG) NA
REGIÃO DA BACIA HIDROGRÁFICA PARANÁ 3 (BP3)**

Projeto de Pesquisa apresentado à disciplina
Trabalho de Conclusão de Curso II (GC-120) do
Curso de Graduação em Geologia da
Universidade Federal do Paraná.

Orientador: Profº. Drº. Gustavo Barbosa Athayde
Coorientador: Drº. William Rudolf Lopes Peyerl.

**CURITIBA
2024**

TERMO DE APROVAÇÃO

GABRIELA FERNANDES KRAMBECH

**ASSOCIAÇÃO DAS TÉCNICAS DE *FLOWMETER* E FILMAGEM COMO PARTE
DA CARACTERIZAÇÃO DO SISTEMA AQUÍFERO SERRA GERAL (SASG) NA
REGIÃO DA BACIA HIDROGRÁFICA PARANÁ 3 (BP3)**

Monografia apresentada ao curso de Graduação em Geologia, Setor de Ciências da Terra, Universidade Federal do Paraná, como requisito parcial à obtenção do título de Bacharel em Geologia.

Prof(a). Dr(a)/Msc. _____

Orientador(a) – Departamento _____, INSTITUIÇÃO

Prof(a). Dr(a)/Msc. _____

Departamento _____, INSTITUIÇÃO

Prof(a). Dr(a)/Msc. _____

Departamento _____, INSTITUIÇÃO

Curitiba, 20 de dezembro de 2024.

AGRADECIMENTOS

A entrega deste trabalho representa não apenas o encerramento da minha graduação em Geologia, mas também reflete os esforços, ensinamentos e apoio de muitas pessoas que fizeram parte dessa jornada.

Assim, agradeço aos meus pais, madrastra, padrasto e irmãs por todas as conversas, incentivos, ajuda nos momentos difíceis e de dúvidas, por sempre tentarem entender o que é a Geologia e buscarem fazer parte disso, seja trazendo uma rocha de um lugar diferente, fazendo perguntas ou mandando aquela reportagem que fala sobre algum assunto geológico.

Agradeço à Universidade Federal do Paraná (UFPR), que me proporcionou uma formação gratuita e de qualidade e o ambiente para o desenvolvimento das habilidades e conhecimentos necessários para minha formação como geóloga.

Agradeço ao meu orientador, Prof. Dr. Gustavo Barbosa Athayde, e ao meu coorientador, Dr. Willian Peyerl, pelas orientações, conselhos e ensinamentos que contribuíram para o desenvolvimento deste trabalho.

Aos professores do departamento de Geologia, pela dedicação nas salas de aula e nas aulas de campo, pelas conversas e orientações fundamentais para minha formação e pelas conversas e momentos descontraídos.

Aos meus amigos que cresceram comigo, Juliana, Rômulo e Nicole, que apesar de escolhermos caminhos diferentes, seguimos juntos. Aos amigos que a Geologia me deu: Liv, Ingrid, Yasmin, Verônica, Maiara, Clara, Heloísa, Andressa, Arthur e Cristian, alguns de vocês me acompanharam desde o início e outros chegaram na metade, mas todos me acompanharam até o final. Agradeço por tantos momentos compartilhados, desde as melhores noites de HH até os dias mais difíceis e desafiadores. Vocês tornaram esta jornada mais leve e cheia de memórias inesquecíveis.

Ao meu amor, que me chama de “pedra preciosa”, que me escuta pacientemente falar das rochas, que me apoia e incentiva.

Por fim, agradeço à Geologia, por me permitir enxergar belezas que só os olhos geológicos reconhecem.

RESUMO

A Bacia do Paraná 3 é uma importante bacia hidrográfica localizada no oeste do estado do Paraná, sendo formada por drenagens que abastecem o Rio Paraná e o Reservatório de Itaipu. A bacia está associada ao Sistema Aquífero Serra Geral (SASG) e fornece recursos hídricos para o abastecimento público e a agricultura. O SASG é um aquífero fraturado, com porosidade secundária formada por descontinuidades tectônicas e atectônicas, na região é composto por rochas das formações Pitanga e Paranapanema (Grupo Serra Geral), caracterizadas por serem derrames vulcânicos de composição básica. Devido a porosidade de aquíferos fraturados estar relacionada a descontinuidades e não ser intrínseca às rochas que o compõem, existe grande complexidade em compreender a hidrodinâmica desse tipo de reservatório. Utilizando a associação do uso de filmagens de alta resolução e do *heat pulse flowmeter (HPFM)* como técnicas investigativas, a análise de dois poços tubulares profundos localizados na cidade de Foz do Iguaçu-PR revelou características importantes do SASG na região. Constatou-se a importância das zonas de brecha e de contatos entre litoestruturas diferentes como os principais pontos de permeabilidade do aquífero e de circulação do fluxo subterrâneo, além disso as descontinuidades observadas em zonas maciças possuem grande importância para a recarga do aquífero. A associação das técnicas utilizadas se mostrou eficiente para colaborar com a caracterização hidrogeológica do SASG no contexto da BP3, através de análises regionais.

Palavras-chave: filmagem de poços; *flowmeter*; caracterização hidrogeológica;

ABSTRACT

The Paraná 3 Basin is a significant watershed located in the western region of Paraná state, formed by drainages that supply the Paraná River and the Itaipu Reservoir. The basin is associated with the Serra Geral Aquifer System (SGAS) and provides water resources for public supply and agriculture. The SGAS is a fractured aquifer with secondary porosity formed by tectonic and non-tectonic discontinuities. In the region, it is composed of rocks from the Pitanga and Paranapanema formations (Serra Geral Group), characterized as basaltic volcanic flows. Since the porosity of fractured aquifers is related to discontinuities and not intrinsic to the rocks themselves, understanding the hydrodynamics of such reservoirs is highly complex. By combining high-resolution borehole imaging and heat pulse flowmeter (HPFM) techniques, the analysis of two deep tubular wells located in the city of Foz do Iguaçu, PR, revealed key characteristics of the SGAS in the region. The study highlighted the importance of breccia zones and contacts between different lithostructures as the primary points of aquifer permeability and subsurface flow circulation. Additionally, the observed discontinuities in massive zones play a significant role in aquifer recharge. The combination of these techniques proved efficient in supporting the hydrogeological characterization of the SGAS within the context of the Paraná 3 Basin through regional analyses.

Keywords: borehole imaging; flowmeter; hydrogeological characterization;

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1. Mapa de localização da BP3. Fonte: a autora (2024).	14
Figura 2. Mapa geológico da BP3. Fonte: a autora, 2024.	15
Figura 3. Correlação entre a classificação geoquímica de Peate et al (1992) e Licht (2018). Fonte: Valore et al. (2023), modificado de Lindsay et al. (2021).	16
Figura 4. Perfil geológico elaborado por Costa (2015).	17
Figura 5. (a) Mapa do arcabouço estrutural do Paraná adaptado de Zálan et al. (1987), com destaque em vermelho (19) para a Zona de Cisalhamento Jacutinga e, em azul, para o Lineamento Rio Piquiri (12). (b) Lineamentos traçados por Athayde (2008), em escala 1:600	18
Figura 6. Desenho esquemático do <i>heat pulse flowmeter (HPFM)</i> , com destaque para sistema de funcionamento do sensor de fluxo. Fonte: Hess, 1986.	20
Figura 7. Exemplos de imagens fornecidas pela filmagem de poços e utilizadas neste trabalho. (a) Poço RBV01 e (b) poço RBV02.	21
Figura 8. Exemplo de curvas geradas pelo sensor de fluxo. (a) Curva indicando fluxo ascendente e (b) curva indicando fluxo descendente. O ponto de interpretação (linha vermelha) é definido pelo usuário.	23
Figura 9. Localização dos poços estudados. Fonte: a autora (2024).	24
Figura 10. Perfil construtivo e litológico do poço RBV01. As capturas exibem as estruturas observadas durante a filmagem do poço, correspondentes as profundidades. Fonte: a autora (2024).	26
Figura 11. Perfil construtivo e litológico do poço RBV 02. As capturas exibem as estruturas observadas durante a filmagem do poço, correspondentes as profundidades. Fonte: a autora (2024).	28
Figura 12. Exemplos de brechas visualizadas nas filmagens dos poços. (a) e (d) Brechas com formação de cavidades nos poços RBV01 e RBV02, respectivamente. (b) e (c) Brechas mais litificadas nos poços RBV01 e RBV02, respectivamente.	29
Figura 13. (a) e (b) Vesículas e amígdalas com preenchimento parcial ou completo por minerais secundários, nos poços RBV01 e RBV02, respectivamente. (c) Predomínio de vesículas no poço RBV01. (d) Predomínio de amígdalas no poço RBV02.	30
Figura 14. (a) Descontinuidade sub-horizontal no poço RBV01. (b) Descontinuidades preenchidas por minerais secundários no poço RBV01. (c) Estrutura inclinada	

tracejada em vermelho, observada na visualização vertical do poço RBV02. (d)	
Descontinuidade com abertura milimétrica no poço RBV02.	31
Figura 15. Perfil de fluxo do poço RVB01 acompanhado do perfil construtivo litológico correspondente. Em azul, pontos indicando valores de média de velocidade de fluxo e, em laranja, os valores diferenciais. As linhas que conectam os pontos são interpretativas. Fonte: a autora (2024)	33
Figura 16. Perfil de fluxo do poço RVB02 acompanhado do perfil construtivo litológico correspondente. Em azul, pontos indicando valores de média de velocidade de fluxo e, em laranja, os valores diferenciais. As linhas que conectam os pontos são interpretativas. Fonte: a autora (2024)	35
Figura 17. Correlação entre os perfis litológicos e os perfis de fluxo nos poços RBV02 e RBV01.....	37

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Descrição litoestrutural macroscópica da superfície interna do poço tubular profundo RBV01. Fonte: a autora (2024)	25
Tabela 2. Descrição litoestrutural macroscópica da superfície interna do poço tubular profundo RBV02. Fonte: a autora (2024)	27
Tabela 3. Tabulação dos dados de velocidade de fluxo do poço RBV01, com as respectivas direções verticais e as estruturas associadas e os valores diferenciais.	32
Tabela 4. Tabulação dos dados de velocidade de fluxo do poço RBV02, com as respectivas direções verticais e as estruturas associadas	34

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

SASG	Sistema Aquífero Serra Geral
BP3.	Bacia Hidrográfica Paraná 3
<i>HPFM.</i>	<i>Heat pulse flowmeter</i>
UFPR	Universidade Federal do Paraná
BR	Brecha
VA	Vesículas e amígdalas
MA	Rocha maciça
NE	Nível estático

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	12
2. REFERENCIAL TEÓRICO	14
2.1. LITOESTRATIGRAFIA DO SASG NA BP3	14
2.2. CARACTERÍSTICAS DOS DERRAMES VULCÂNICOS DO GRUPO SERRA GERAL	16
2.3. CARACTERIZAÇÃO HIDROGEOLÓGICA DO SASG	17
2.4. FILMAGEM DE POÇOS TUBULARES.....	18
2.5. SENSOR TÉRMICO DE FLUXO - <i>HEAT PULSE FLOWMETER (HPFM)</i> ...	19
3. MATERIAL E MÉTODOS	20
3.1. FILMAGEM DOS POÇOS TUBULARES PROFUNDOS	21
3.2. SENSOR TÉRMICO DE FLUXO – <i>HEAT PULSE FLOWMETER (HPFM)</i> ...	22
4. RESULTADOS	23
4.1. PERFIS LITOLÓGICOS E CONSTRUTIVOS DOS POÇOS	24
4.2. DIREÇÃO E VELOCIDADE DE FLUXO	31
5. DISCUSSÕES.....	35
6. CONCLUSÕES.....	38
REFERÊNCIAS.....	39
APÊNDICE A – CAPTURAS DE TELA (FILMAGENS) - POÇO RBV01	41
APÊNDICE B – CAPTURAS DE TELA (FILMAGENS) - POÇO RBV02	51

1. INTRODUÇÃO

A exploração sustentável dos recursos hídricos subterrâneos é essencial para o desenvolvimento econômico e social, especialmente em regiões onde a disponibilidade de água superficial é limitada, ou durante períodos de prolongada estiagem. No contexto da Bacia Hidrográfica Paraná 3 (BP3), o Sistema Aquífero Serra Geral (SASG) destaca-se como uma importante fonte de água subterrânea, fornecendo 89% da demanda destinada ao abastecimento público, e 50% do volume captado pela agricultura (HIDROSFERA, 2021).

A BP3 está localizada no oeste do Paraná, formando um triângulo com vértices nas cidades de Guaíra, Foz do Iguaçu e Cascavel, a bacia abrange um total de 28 municípios e ocupa cerca de 7.944,5 km². É formada por uma extensa rede de drenagens que abastecem o rio Paraná e o reservatório da Usina Hidrelétrica de Itaipu (Caviglione et al., 2021) (Figura 1).

Em relação aos aspectos geológicos, a BP3 está inserida na Bacia Sedimentar do Paraná, especificamente na área de afloramento dos derrames vulcânicos do Grupo Serra Geral, englobados localmente pelas formações Pitanga e Paranapanema. De acordo com Milani et al. (2007), a Bacia Sedimentar do Paraná é classificada como uma bacia intracratônica que abrange grande parte do território nacional, atravessando os estados do Rio Grande do Sul, Santa Catarina, Paraná, São Paulo, Minas Gerais, Goiás e Mato Grosso do Sul, além de ocupar áreas na Argentina, Paraguai e Uruguai.

Associado às rochas do Grupo Serra Geral, o Sistema Aquífero Serra Geral (SASG) é classificado como um reservatório fraturado que pode alcançar profundidades de até 1,35 km (Athayde, 2013). A água é armazenada em uma rede de fraturas e falhas, caracterizando o SASG como um aquífero de porosidade e permeabilidade fissural (ou secundária) (Rosa Filho et al., 2011). Quanto à pressão hidrostática, na área de estudo o SASG é interpretado como um aquífero livre (Rosa Filho et al., 2011). A porosidade e a permeabilidade do SASG estão relacionadas a descontinuidades tectônicas (falhas, juntas, fraturas) e atectônicas (contato entre derrames, zonas amigdaloidais/vesiculares e fraturas de resfriamento), resultantes do comportamento intrínseco às rochas que o compõem (Athayde, 2008). Devido a essas condições, aquíferos fraturados como o SASG são complexos e exigem estudos detalhados para compreender a dinâmica hidráulica do sistema.

Técnicas de alta resolução, como filmagem e sensores térmicos de fluxo (*heat pulse flowmeter - HPFM*), permitem caracterizar qualitativamente e quantitativamente as zonas de maior permeabilidade em aquíferos (Filipi, 2021).

A hipótese explorada neste trabalho é de que a associação das técnicas de filmagem de poço e sensor térmico de fluxo é uma abordagem eficiente para definir um comportamento padrão de fluxo nos diferentes tipos de discontinuidades e, assim, contribuir para a caracterização hidrodinâmica do SASG no contexto da BP3.

A partir de dados gerados durante o desenvolvimento do Projeto Hidrosfera na região da BP3, foram selecionados dois poços (RBV01 e RBV02) em que foram aplicadas as técnicas de filmagem e *HPFM*. Os poços estão locados no Refúgio Biológico Roberto Lange (Foz do Iguaçu-PR).

Assim, o objetivo deste trabalho é integrar as filmagens dos poços com os dados de fluxo obtidos pelo *HPFM*. Para isso, foram definidos os seguintes objetivos específicos:

- Identificar e descrever as principais características litoestruturais e demarcar as diferentes zonas de discontinuidades nos poços tubulares profundos RBV01 e RBV02;
- Gerar perfis de fluxo a partir dos dados do *HPFM*;
- Correlacionar as características litoestruturais com as variações de velocidade de fluxo identificadas nos perfis de fluxo;

A caracterização detalhada dos aquíferos fraturados, como o SASG, é essencial para garantir a sustentabilidade do uso dos recursos hídricos. A utilização de tecnologias, como a filmagem em poços, permite uma compreensão mais robusta das condicionantes favoráveis a circulação de água nesse tipo de aquífero, contribuindo para a implementação de práticas de manejo mais eficientes das águas subterrâneas e garantindo a segurança hídrica da região.

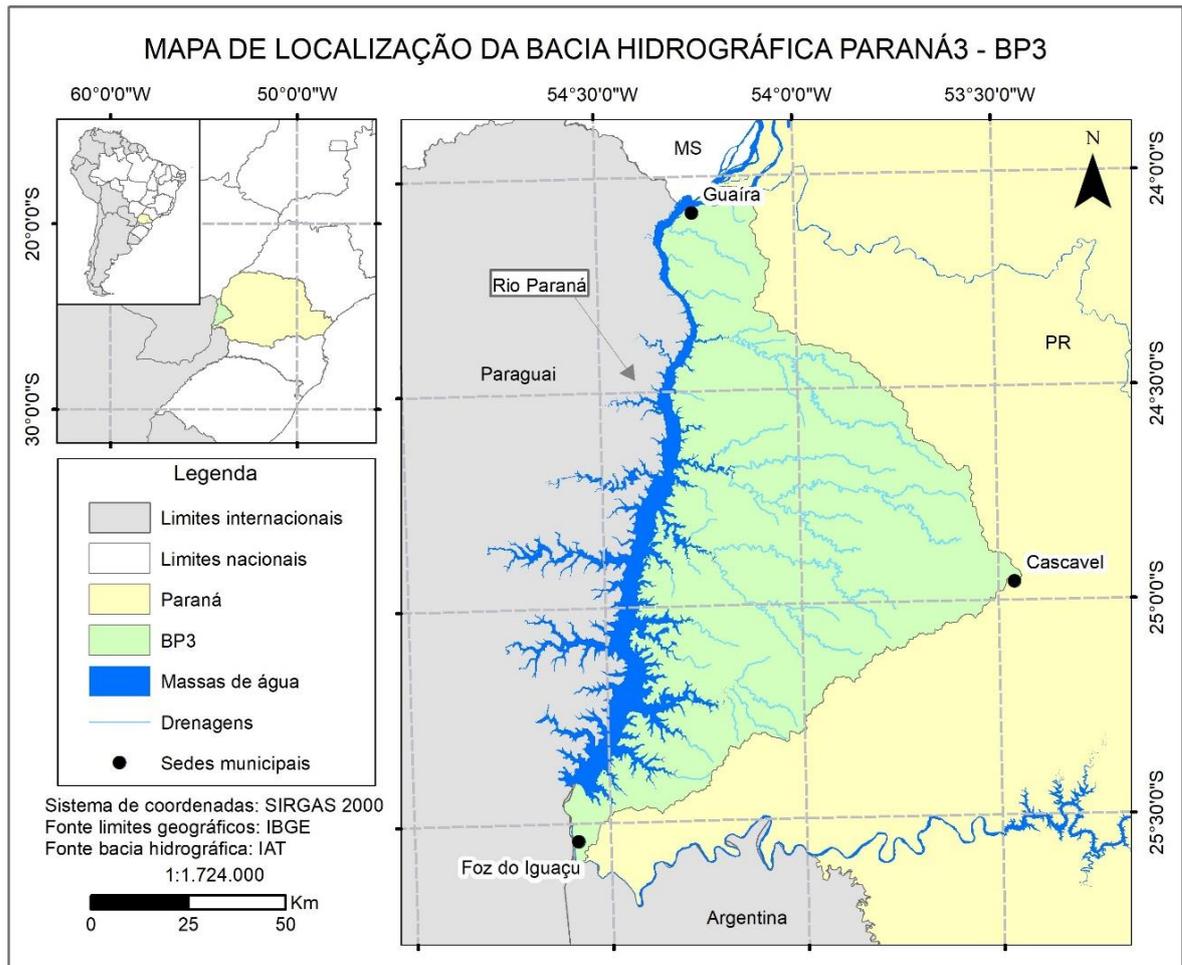


Figura 1. Mapa de localização da BP3. Fonte: a autora (2024).

2. REFERENCIAL TEÓRICO

2.1. LITOESTRATIGRAFIA DO SASG NA BP3

Segundo Milani et al. (2007), o arcabouço geológico da Bacia Sedimentar do Paraná é definido por seis supersequências (unidades aloestratigráficas de segunda ordem), separadas por hiatos deposicionais. Nesse contexto, as rochas que compõem a região da Bacia Hidrográfica Paraná 3 estão inseridas na Supersequência Gondwana III e possuem idade mesozoica. Essa unidade aloestratigráfica engloba as formações Pirambóia e Botucatu, além do Grupo Serra Geral, todos pertencentes ao Supergrupo São Bento (Licht & Arioli, 2018).

Recobrendo as formações que compõem a base do Supergrupo São Bento - Pirambóia e Botucatu-, está localizado o Grupo Serra Geral (cretáceo inferior), subdividido por Licht & Arioli (2018) em Subgrupo Serra Geral Sul e Subgrupo Serra Geral Centro-Norte, ambos associados à Província Ígnea do Paraná. Na Região da

BP3, afloram as Formações Pitanga, na base, e Paranapanema, no topo, que possuem relações de contato transicionais entre si e com a formação Botucatu subjacente (Figura 2).

As formações Pitanga e Paranapanema são caracterizadas como derrames basálticos formados predominantemente por lavas do tipo *pahoehoe* e localmente ocorrem lavas do tipo *aa* (*rubbly pahoehoe*), ambas também podem apresentar depósitos vulcanoclásticos associados (CPRM, 2021). A formação Pitanga, localizada na base do Grupo Serra Geral, possui ainda partes com textura hipohialina (Licht & Arioli, 2018), disjunções colunares de grande porte formadas pelo resfriamento de paleolagos de lavas e intercalações com arenitos e lamitos (CPRM, 2021). Essas intercalações são relacionadas aos arenitos *intertrapps* da Formação Botucatu, gerados no início dos derrames basálticos da Formação Pitanga, em que ocorrem camadas delgadas de arenito em meio a rocha ígnea, caracterizando o contato transicional entre as formações (Licht & Arioli, 2018).

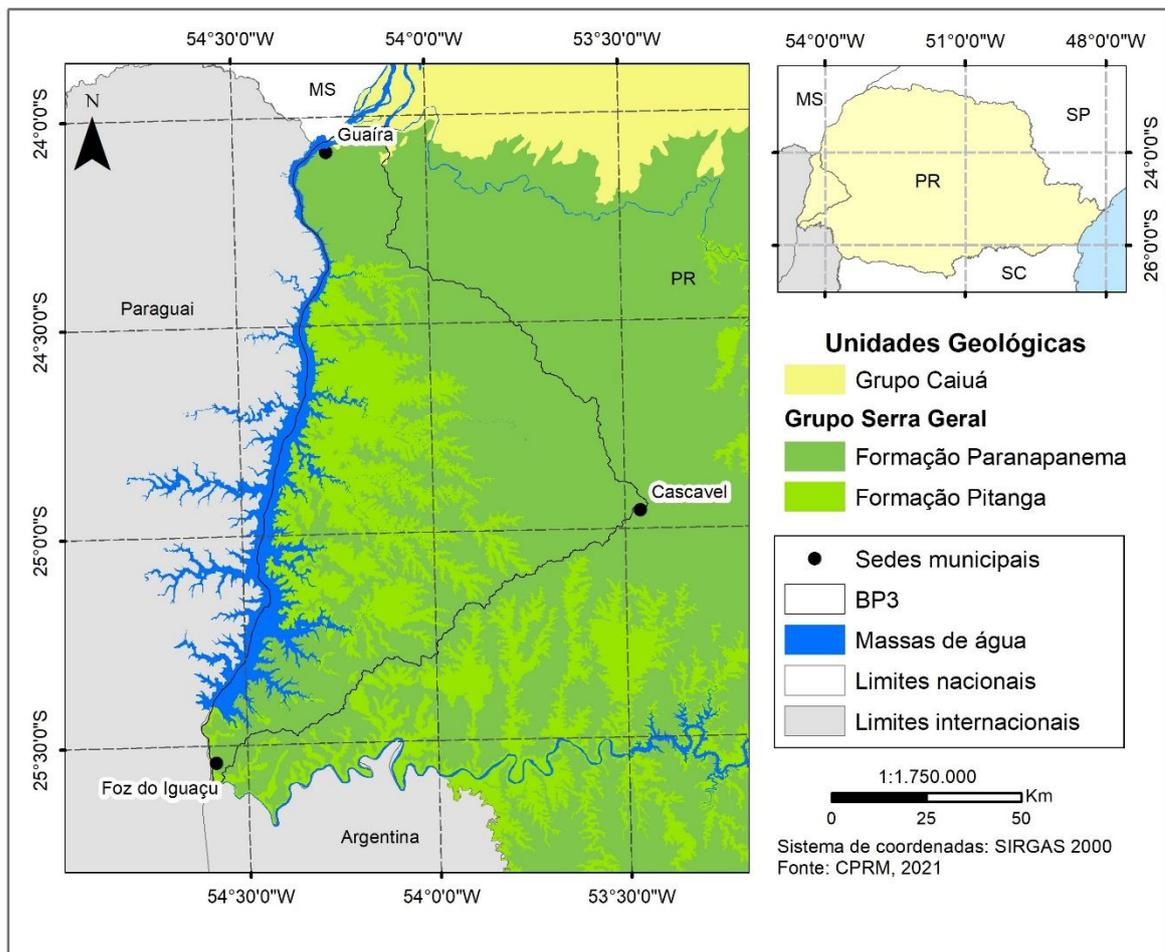


Figura 2. Mapa geológico da BP3. Fonte: a autora, 2024.

2.2. CARACTERÍSTICAS DOS DERRAMES VULCÂNICOS DO GRUPO SERRA GERAL

Os derrames vulcânicos do Grupo Serra Geral estão inseridos na Província Magmática Paraná-Etendeka, nomeada no Brasil por Província Ígnea do Paraná. Estas rochas, datadas do Cretáceo Inferior, são originárias de erupções predominantemente basálticas e, também, riolíticas, que recobriram extensas áreas da Bacia do Paraná em um curto intervalo de tempo geológico, representando uma *Large Igneous Province (LIP)* (Licht e Arioli, 2020).

Diversos estudos foram desenvolvidos na Bacia do Paraná, no estado do Paraná, com o intuito de compreender a segregação geoquímica e faciológica das rochas que compõem o Grupo Serra Geral. A partir disso, as rochas das formações Pitanga e Paranapanema são consideradas litologias básicas, com pouca quantidade de sílica em sua composição (LSi) (Peate, 1992). Geoquimicamente, a Formação Pitanga possui altos valores de titânio (Ti) e fósforo (P), já a Formação Paranapanema possui baixos valores de Ti e P (Licht e Arioli, 2018; Valore et al., 2023) (Figura 3).

Licht (2018)	SiO ₂ (wt %)	Zr (ppm)	TiO ₂ (wt %)	P ₂ O ₅ (wt %)	Peate et al. (1992)
Type 1 (S)*	<62.02	<522.15	<2.85	<0.413	Gramado, Esmeralda
Type 1 (C-N)*	<62.02	<522.15	<2.85	<0.413	Paranapanema
Type 2	<62.02	<522.15	<2.85	>0.413	–
Type 3	<62.02	<522.15	>2.85	<0.413	–
Type 4	<62.02	<522.15	>2.85	>0.413	Pitanga, Urubici
Type 9	>62.02	<522.15	<2.85	<0.413	Palmas
Type 13	>62.02	>522.15	<2.85	<0.413	–
Type 14	>62.02	>522.15	<2.85	>0.413	Chapecó

Figura 3. Correlação entre a classificação geoquímica de Peate et al (1992) e Licht (2018). Fonte: Valore et al. (2023), modificado de Lindsay et al. (2021).

De acordo com Costa (2015), que realizou um extenso trabalho estudando as características faciológicas dos derrames vulcânicos da região da Usina Hidrelétrica de Itaipu, em Foz do Iguaçu, são identificadas três fácies principais nos derrames da região, independentemente de qual das duas formações (Figura 4). As bordas são configuradas por zonas brechadas, logo abaixo ocorrem níveis ricos em vesículas e amígdalas, que se tornam menos densos em direção ao centro dos derrames, que

são caracterizados por possuírem estrutura maciça, podendo esses apresentar disjunções colunares.

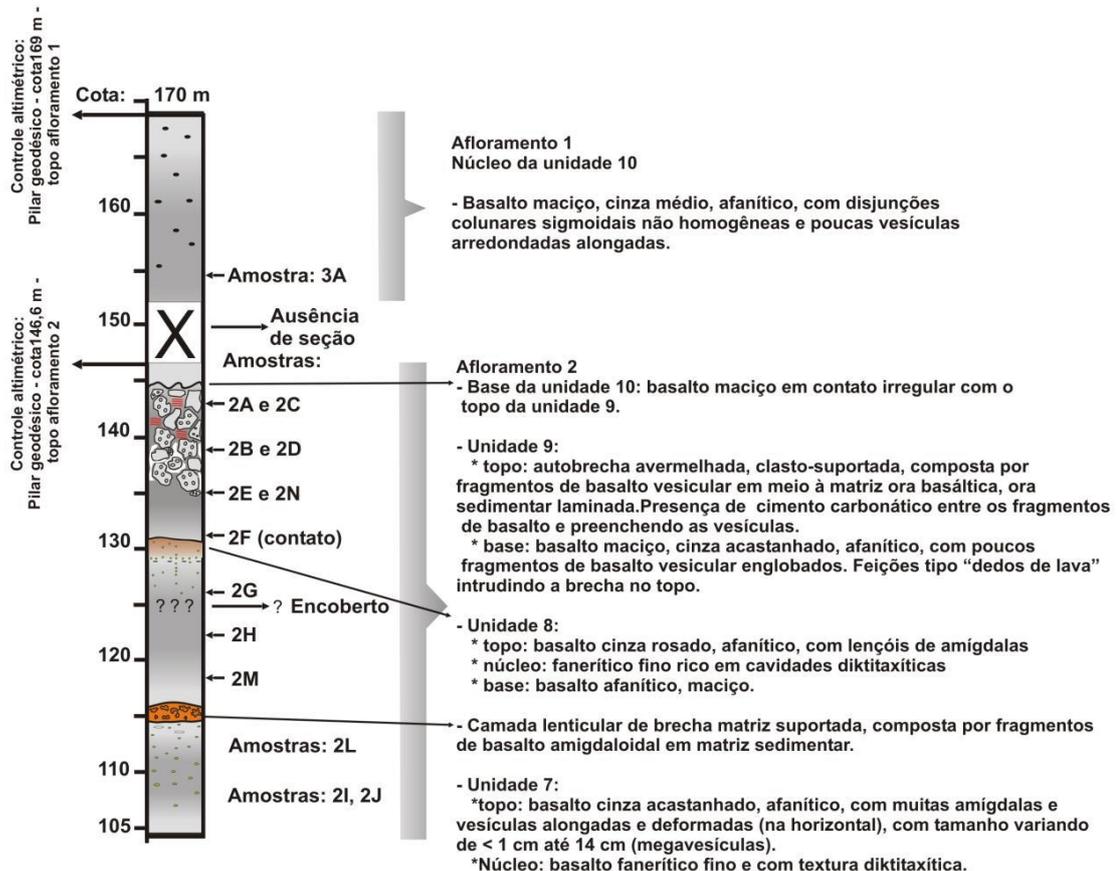


Figura 4. Perfil geológico elaborado por Costa (2015).

2.3. CARACTERIZAÇÃO HIDROGEOLÓGICA DO SASG

O Sistema Aquífero Serra Geral (SASG) é um aquífero de origem vulcânica com profundidades de até 1,35 km. Sua formação está ligada ao resfriamento das rochas que compõem o Grupo Serra Geral, durante o cretáceo inferior (Athayde, 2008). A água é armazenada em uma rede de fraturas, falhas e discontinuidades tectônicas, como disjunções colunares e contato entre derrames (Bettú et al., 2006). Isso caracteriza o SASG como um aquífero de porosidade e permeabilidade fissural (ou secundária), condizente com reservatórios de origem ígnea ou metamórfica (Rosa Filho et al., 2011).

As discontinuidades tectônicas são correlatas a dois grandes lineamentos que se cruzam próximo a área de estudo: a Zona de Cisalhamento Jacutinga, de direção NE, e o lineamento Rio Piquiri, com direção NW (Zálan et al. 1987). Os lineamentos

na BP3 acompanham preferencialmente essas mesmas direções (Athayde, 2008) (Figura 5).

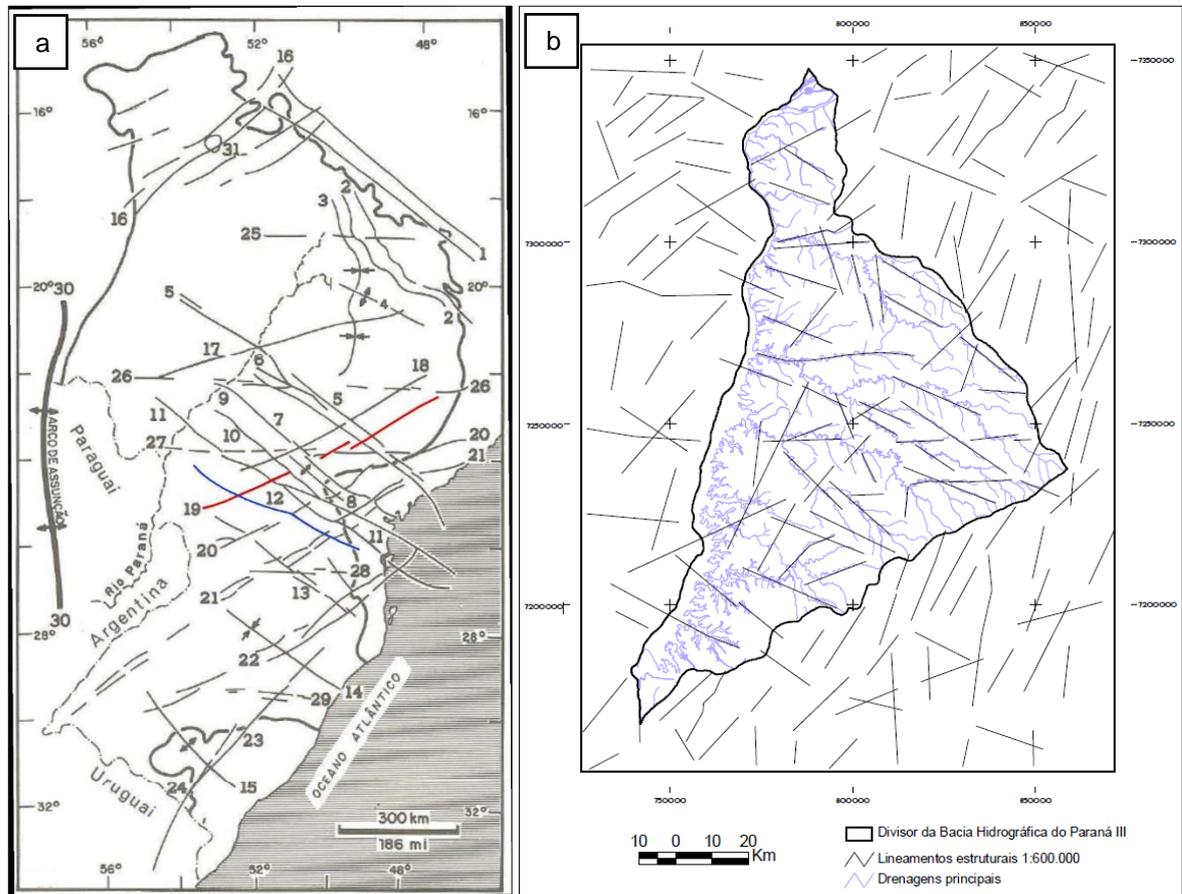


Figura 5. (a) Mapa do arcabouço estrutural do Paraná adaptado de Zálan et al. (1987), com destaque em vermelho (19) para a Zona de Cisalhamento Jacutinga e, em azul, para o Lineamento Rio Piquiri (12). (b) Lineamentos traçados por Athayde (2008), em escala 1:600

De forma geral e localmente na BP3, o fluxo de água do SASG flui para oeste, em direção ao Rio Paraná, uma das principais zonas de descarga do reservatório (Athayde & Athayde, 2016).

As águas do SASG na BP3 são favoráveis para o consumo humano, sendo classificadas hidroquimicamente como bicarbonatadas, com variações nos teores de sódio e cálcio, e, subordinadamente, ocorrem águas carbonatadas sódicas e sulfatada-bicarbonatadas sódicas (Athayde, 2008).

2.4. FILMAGEM DE POÇOS TUBULARES

O imageamento televisionado de poços tubulares é uma técnica de observação direta que teve seu início em 1960, fornecendo imagens em preto e branco e, com os

avanços tecnológicos, a partir de 1980, as imagens passaram a ser em cores e ter alta resolução (Prensky, 1999). Esse tipo de filmagem permite a visualização de fundo (orientação vertical) e das paredes do poço (orientação horizontal) a uma distância muito próxima, com possibilidade de giros em 360°, fornecendo uma cobertura completa da superfície de poços não revestidos, o que garante um bom imageamento tanto das partes secas quanto nas profundidades saturadas em água (fluidos transparentes) (Prensky, 1999).

2.5. SENSOR TÉRMICO DE FLUXO - *HEAT PULSE FLOWMETER (HPFM)*

O sensor térmico de fluxo – *heat pulse flowmeter (HPFM)* – é um equipamento que permite identificar as zonas hidraulicamente ativas, as diferenças de carga hidráulica entre as descontinuidades atravessadas pela perfuração e, também, a direção vertical do fluxo da água nos poços tubulares (Le Borgne et al., 2007). A sonda possui uma haste equipada com centralizadores e a central de funcionamento é composta por uma grade, um sensor elétrico superior e outro inferior. Após a sonda ser posicionada na profundidade de interesse, o equipamento é acionado e a grade é aquecida eletricamente, transmitindo calor para a água localmente, então, a direção do fluxo é determinada a partir da detecção do calor por um dos sensores (Hess, 1986) (Figura 6). O acionamento do sensor superior indica que o fluxo é ascendente, já o acionamento do sensor inferior indica que a direção do fluxo é descendente (Busse et al., 2016).

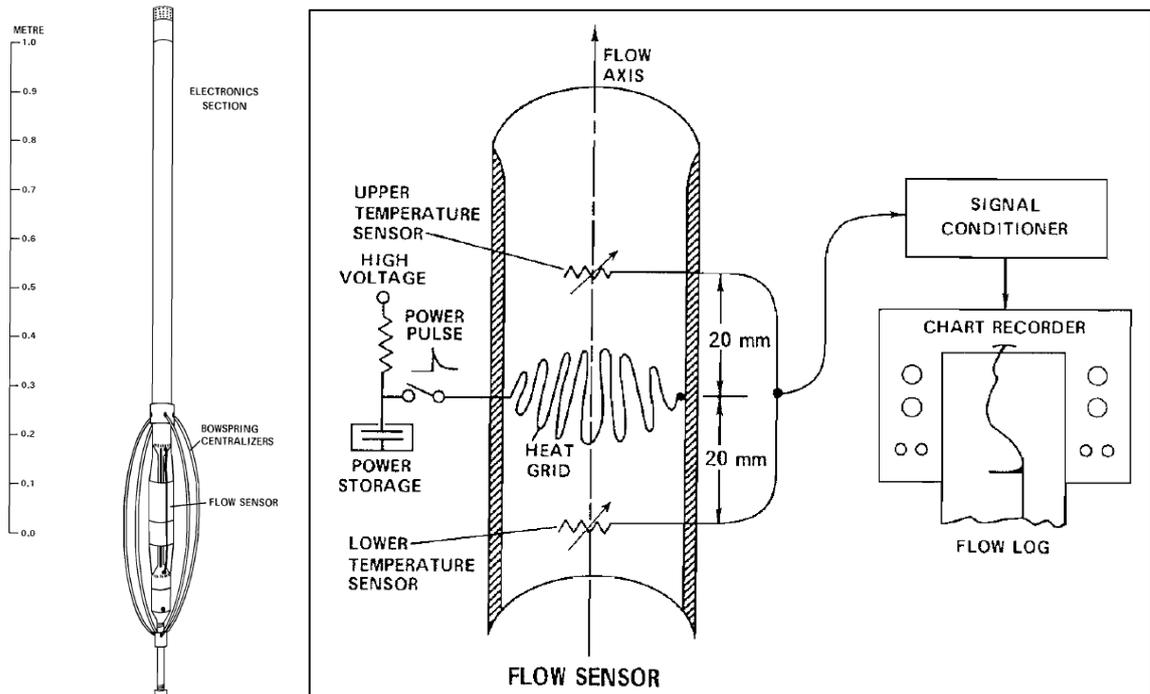


Figura 6. Desenho esquemático do *heat pulse flowmeter (HPFM)*, com destaque para sistema de funcionamento do sensor de fluxo. Fonte: Hess, 1986.

A análise dos dados de fluxo é realizada por meio de um gráfico que permite identificar zonas de entrada e saída ao longo do perfil do poço. De acordo com Busse et al. (2016), mudanças abruptas na taxa ou na direção de fluxo vertical são sinais de que está ocorrendo entrada ou saída de água no poço, além disso, a diferença na taxa de fluxo entre as zonas permeáveis indica a quantidade de influxo ou efluxo entre as diferentes camadas.

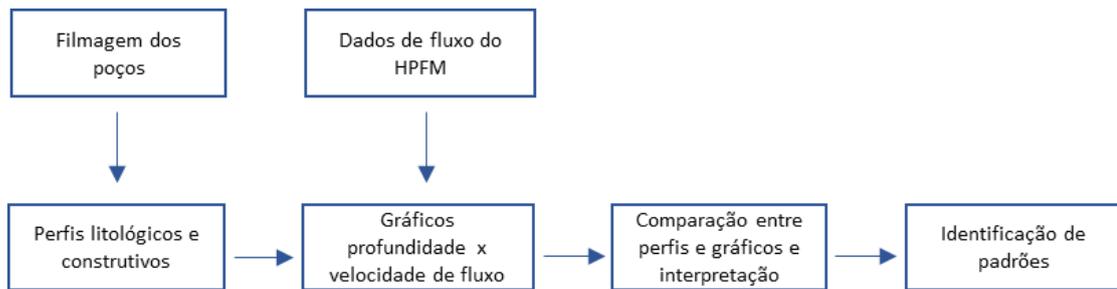
3. MATERIAL E MÉTODOS

Os dados utilizados para a realização deste trabalho foram obtidos durante o desenvolvimento do Projeto Hidrosfera, que visa compreender a dinâmica entre as águas superficiais e subterrâneas na BP3. Esse projeto tem sido concretizado através da cooperação entre o Laboratório de Recursos Hídricos (LPH) da UFPR, Itaipu ParqueTec e a Itaipu Binacional. Dentre outras técnicas aplicadas para determinação de parâmetros qualitativos e quantitativos das águas da BP3, as filmagens e as sondagens utilizando o *HPFM* foram realizadas em diversos poços dentro da bacia.

Considerando o apresentado, dois poços foram selecionados para avaliar a hipótese levantada neste trabalho. Denominados RBV01 e RBV02, ambos os poços

estão localizados no Refúgio Biológico Roberto Lange, na cidade de Foz do Iguaçu (PR), os poços foram nomeados com as iniciais do local de instalação.

Os resultados foram obtidos pela junção e comparação entre (1) as informações coletadas durante a observação das filmagens e (2) os valores de fluxo obtidos após o processamento de dados do *HPFM* (2). A metodologia é apresentada a seguir:



3.1. FILMAGEM DOS POÇOS TUBULARES PROFUNDOS

As filmagens foram realizadas utilizando o equipamento da marca Laval Underground Surveys, modelo R-CAM 1300 XLT, que conta com uma câmera dupla ligada a um monitor através de um cabo e um sistema de iluminação. O equipamento é operado manualmente. As formas de visualização orientadas verticalmente e horizontalmente mostraram imagens do fundo e das paredes do poço, respectivamente, o que permitiu a observação e descrição das estruturas da rocha, a captura de imagens (Figura 7) e a elaboração dos perfis construtivos e litológicos de cada poço. As descrições macroscópicas foram organizadas em tabelas e os perfis construídos através do programa de vetorização *Inkscape*.

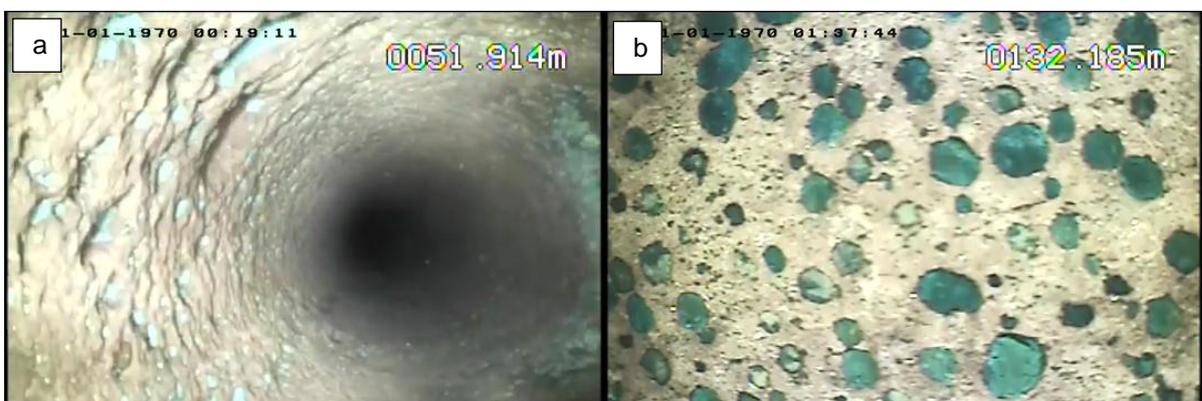


Figura 7. Exemplos de imagens fornecidas pela filmagem de poços e utilizadas neste trabalho. (a) Poço RBV01 e (b) poço RBV02.

3.2. SENSOR TÉRMICO DE FLUXO – *HEAT PULSE FLOWMETER (HPFM)*

O *software* utilizado para o processamento dos dados obtidos pela sonda *HPFM* fornece o valor da velocidade do fluxo em m/min e a direção vertical do fluxo em determinada profundidade e, para cada ponto de interesse, essas informações são expressas na forma de uma curva plotada em gráfico logarítmico. A curva é se inicia pelo primeiro contato de um dos sensores (superior ou inferior) com a água aquecida pela grade central, até atingir o pico de aquecimento, assim a representação da direção do fluxo no gráfico reflete na geração de curvas ascendentes ou descendentes. Com o objetivo de diferenciar as direções de fluxo no poço adotou-se o sinal negativo (-) atrelado ao valor de velocidade para fluxos descendentes e o sinal positivo (+) para fluxos ascendente, mas é apenas uma representação referente à direção da curva gerada pelo *software* (Figura 8). Assim, para o desenvolvimento desse trabalho, os gráficos resultantes do processamento foram disponibilizados em um banco de dados.

As profundidades dos pontos de interesse foram definidas pela visualização prévia de estruturas e descontinuidades através da filmagem do poço e pelos perfis de sondagem produzidos utilizando a perfilagem Caliper e Acústica (Hi-RAT), que fornecem informações sobre as descontinuidades.

Para cada entrada de água, buscou-se obter duas medidas de fluxo, no mínimo. Os valores foram tabelados e, em seguida, calculou-se a média aritmética para cada ponto, bem como os valores diferenciais, que indicam a variação de fluxo entre um ponto e outro. A partir da tabela de dados, foram elaborados perfis de fluxo na forma de gráficos de velocidade x profundidade.

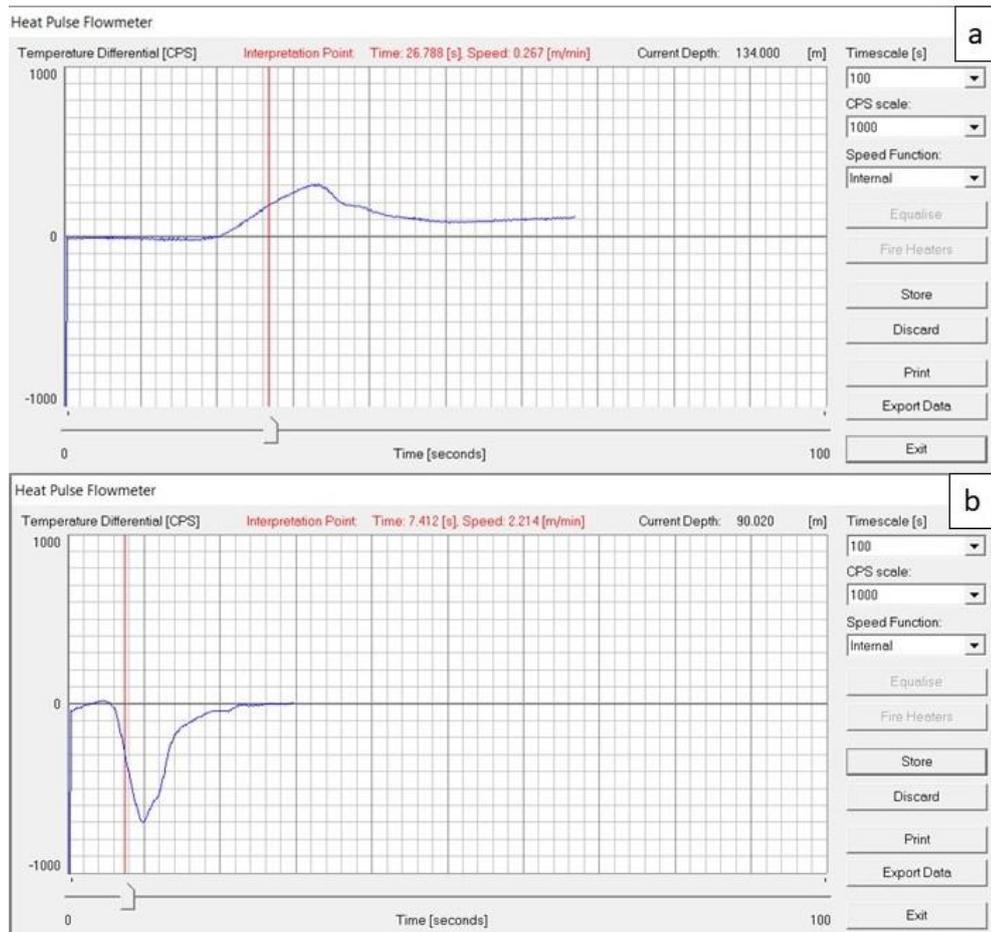


Figura 8. Exemplo de curvas geradas pelo sensor de fluxo. (a) Curva indicando fluxo ascendente e (b) curva indicando fluxo descendente. O ponto de interpretação (linha vermelha) é definido pelo usuário.

4. RESULTADOS

Os poços RBV01 e RBV02 estão perfurados cerca de 200m de distância um do outro, localizados no Refúgio Biológico Roberto Lange (Foz do Iguaçu-PR) (Figura 9).

Após serem reunidos os materiais referentes aos poços e seguindo a metodologia do trabalho, inicialmente fez-se a análise das filmagens, a captura de tela de diversos pontos dos poços (Apêndices A e B) e, como resultado, foram elaboradas tabelas descritivas e os perfis construtivos e litológicos de cada poço. Em seguida, os dados de fluxo foram tabelados e os gráficos gerados resultaram em perfis de fluxo.

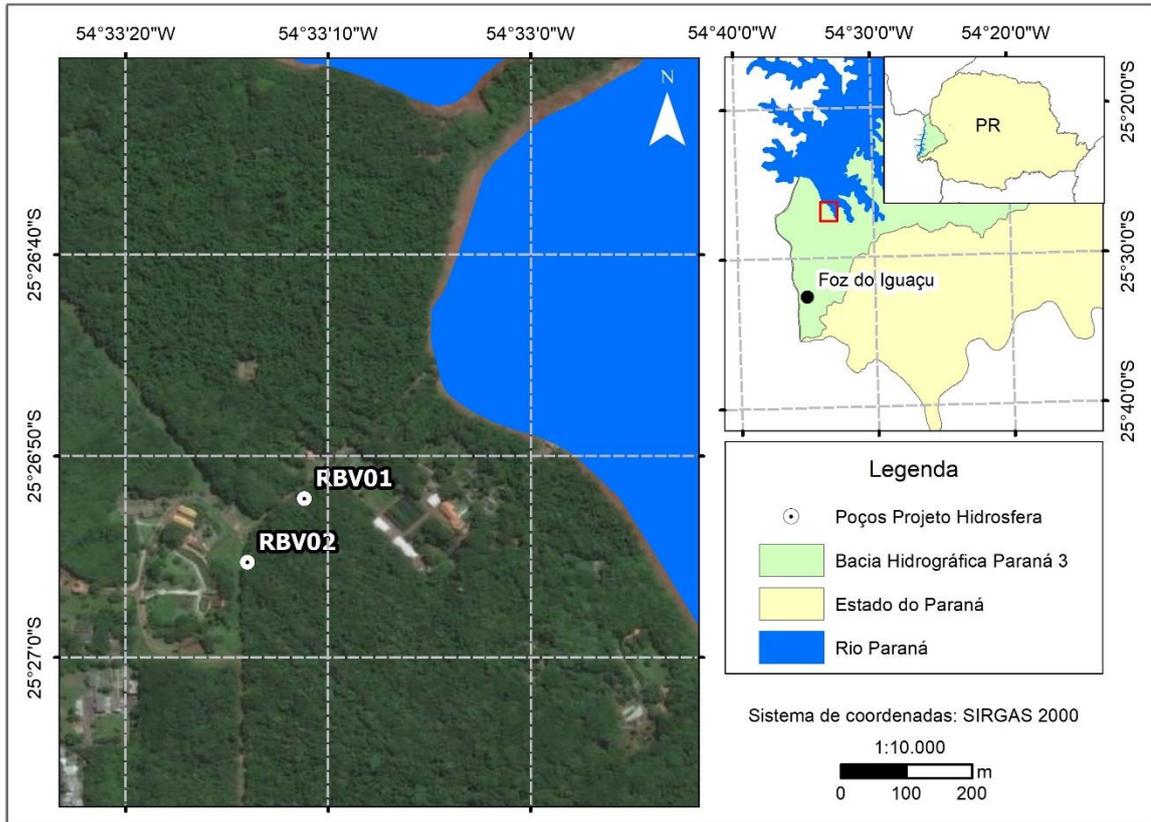


Figura 9. Localização dos poços estudados. Fonte: a autora (2024).

4.1. PERFIS LITOLÓGICOS E CONSTRUTIVOS DOS POÇOS

O poço RBV01 possui 191,0m de profundidade, está perfurado com diâmetro de 6" (15,24cm) e possui revestimento do início do poço até 21,0m de profundidade, com tubo PVC geomecânico. O nível estático do poço se encontra aos 20,0m.

A filmagem permitiu a observação e descrição de diferentes estruturas do poço (Tabela 1), sendo identificados três tipos principais: brecha (BR), rocha maciça (MA) e os níveis de vesículas e amígdalas (VA).

Tabela 1. Descrição litoestrutural macroscópica da superfície interna do poço tubular profundo RBV01. Fonte: a autora (2024)

Prof. Inicial	Prof. Final	Estrutura principal	Descrição
0,0	21,0		Revestimento PVC geomecânico 6"
21,0	27,0	BR	Rocha com estrutura de brecha, composta por blocos vesiculares e amigdaloidais, cor castanha avermelhada.
27,0	36,0	VA	Rocha com estrutura predominantemente vesicular e cor cinza claro. As vesículas diminuem de tamanho conforme aumenta a profundidade. Algumas vesículas possuem preenchimento parcial ou completo por minerais esverdeados e brancos, tornando-se amígdalas.
36,0	47,0	MA	Rocha de estrutura maciça de cor cinza claro. Apresenta predomínio de descontinuidades horizontais e sub-horizontais que possuem aberturas milimétricas. Espaçamento < 1m entre as descontinuidades.
47,0	51,0	BR	Rocha com estrutura de brecha, composta por blocos vesiculares e amigdaloidais. Superfície bastante irregular (escoriácea?), com cavidades de tamanho grande. Cor castanho avermelhado com partes amareladas.
51,0	57,0	VA	Nível com vesículas e amígdalas, estruturas alongadas lateralmente, com tamanhos centimétricos chegando a >5,0cm. Parcialmente ou totalmente preenchidas. Também são observadas trilhas vesiculares.
57,0	95,0	MA	Pacote maciço de cor cinza claro, com descontinuidades subverticais e sub-horizontais, com espaçamento de cerca de 1m, sendo mais frequentes por volta dos 75m, a partir de onde ocorre diminuição considerável da turbidez (provável entrada de água).
95,0	107,0	BR	Rocha de coloração castanha avermelhada, composta por blocos vesiculados e superfície mais coesa, sem formação de grandes cavidades.
107,0	126,0	MA	Rocha maciça de cor cinza claro com amígdalas esparsadas. As descontinuidades ocorrem com frequência métrica, com maior ocorrência de estruturas inclinadas e subverticais.
126,0	136,0	VA	Rocha cinza clara, com vesículas e amígdalas (predominante). As amígdalas estão preenchidas por minerais de cores claras e esverdeadas.
136,0	158,0	MA	Rocha cinza claro, com descontinuidades sub-horizontais e subverticais,
158,0	164,0	VA	Rocha de cor cinza claro, com vesículas e amígdalas preenchidas por minerais de cores claras e esverdeadas.
164,0	185,0	MA	Pacote maciço, de cor cinza claro e com descontinuidades predominantemente inclinadas e subverticais.
185,0	192,0		Visualização prejudicada pela turbidez da água

A partir da descrição detalhada das diferentes estruturas da rocha em que o poço foi perfurado, foi elaborado o perfil construtivo e geológico do poço (Figura 10)

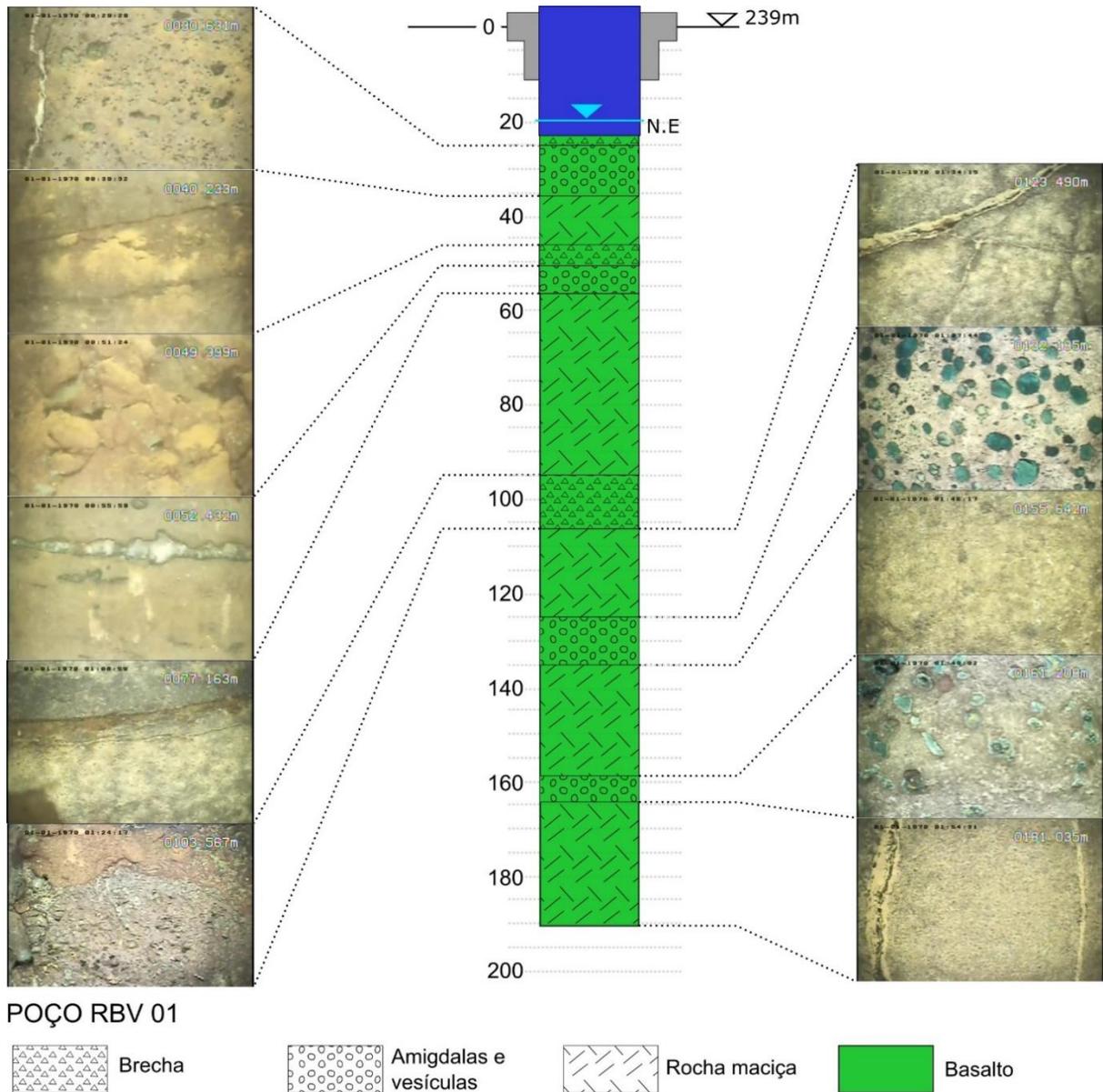


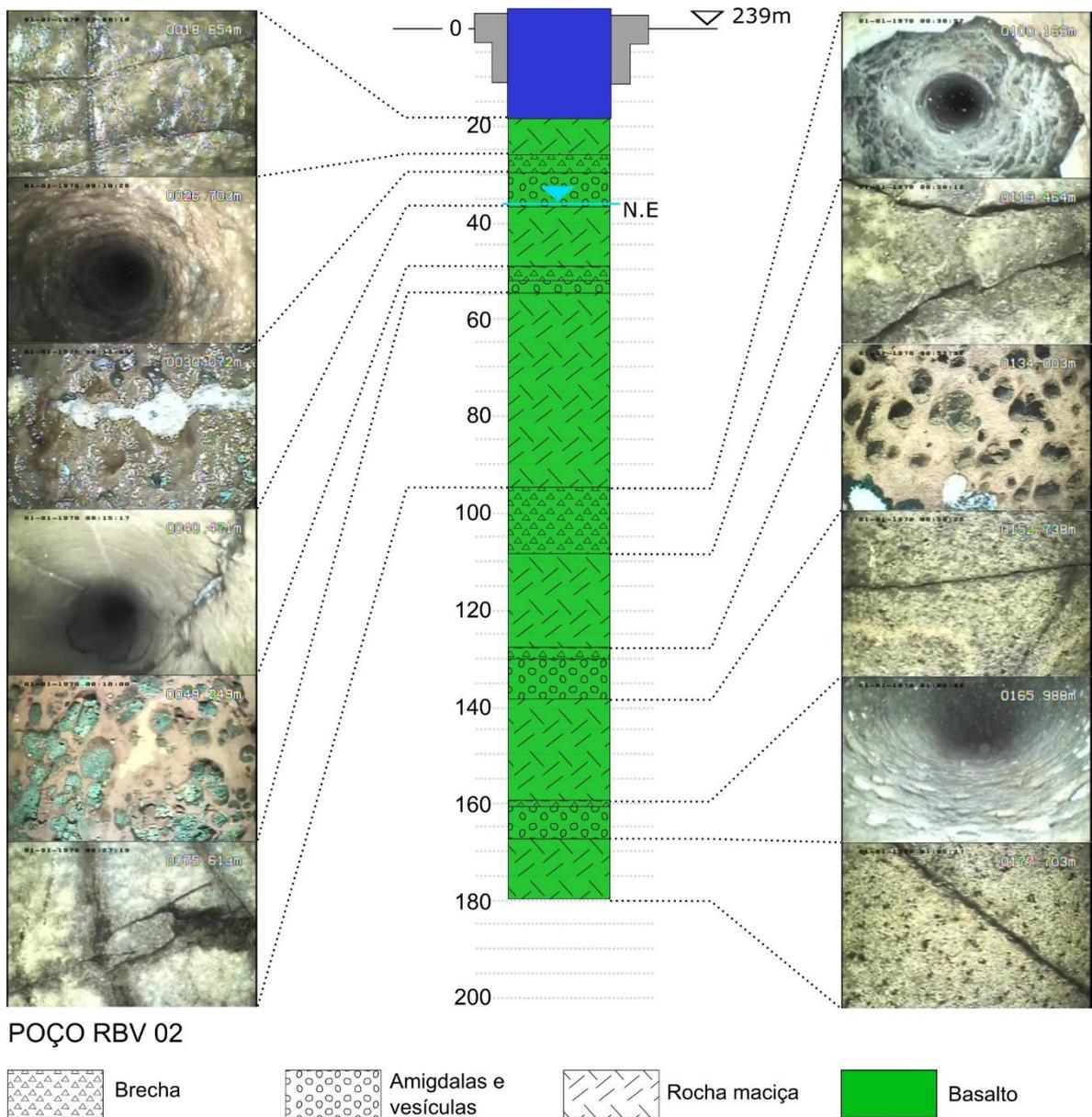
Figura 10. Perfil construtivo e litológico do poço RBV01. As capturas exibem as estruturas observadas durante a filmagem do poço, correspondentes as profundidades. Fonte: a autora (2024).

O poço RBV02 possui 179,0m de profundidade, diâmetro de 6", está revestido até 21,0m com tubo PVC geomecânico e o nível estático encontra-se aos 36m. Os níveis litoestruturais principais foram identificados como brecha (BR), rocha maciça (MA) e os níveis de vesículas e amígdalas (VA) (Tabela 2).

Tabela 2. Descrição litoestrutural macroscópica da superfície interna do poço tubular profundo RBV02. Fonte: a autora (2024)

Prof. Inicial	Prof. Final	Estrutura principal	Descrição
0,0	18,0		Revestimento PVC geomecânico 6"
18,0	26,0	MA	Rocha de cor cinza escuro, maciça, com descontinuidades sub-horizontais e inclinadas.
26,0	28,0	BR	Rocha de cor avermelhada. Vista de fundo. Parede do poço bastante incoerente indicando o aspecto escoriáceo da brecha, com formação de cavidades.
28,0	36,0	VA	Pacote acinzentado, com vesículas parcialmente preenchidas por minerais de cor esverdeada. Também ocorrem amígdalas alongadas horizontalmente.
36,0	49,0	MA	Rocha de cor cinza claro maciça, com descontinuidades sub-horizontais e inclinadas.
49,0	51,0	BR	Rocha de cor castanho avermelhado, com estrutura brechada composta por blocos vesiculares e amigdaloidais.
51,0	53,0	VA	Rocha com vesículas e amígdalas preenchidas por mineral de cor esverdeada.
53,0	95,0	MA	Pacote de rocha maciça com cores em tons de cinza. São observadas ocorrências isoladas de amígdalas grandes, com alongamento lateral. As descontinuidades são predominantemente inclinadas e subverticais.
95,0	113,0	BR	Rocha de cor castanho avermelhada, composto por blocos vesiculares e amigdaloidais cimentados. A superfície é muito irregular, com formação de cavidades (escoriácea). Ocorrem amígdalas de grande porte, parcialmente ou totalmente preenchidas (100m). Preenchimento por minerais brancos e esverdeados.
113,0	128,0	MA	Rocha de cor cinza claro e estrutura maciça. Apresenta descontinuidades sub-horizontais e inclinadas, com aberturas milimétricas a centimétricas.
128,0	130,0	BR	Rocha de estrutura brechada com coloração avermelhada e amarelada, composta por blocos cimentados.
130,	138,0	VA	Rocha com estrutura vesicular e amigdaloidal, o preenchimento se dá por minerais de cores claras e esverdeados.
138,0	161,0	MA	Rocha de cor cinza claro e estrutura maciça. Apresenta descontinuidades sub-horizontais e inclinadas.
161,0	162,0	BR	Brecha de cor vermelho amarelado e cinza, bem litificada.
162,0	166,0	VA	Rocha de cor cinza claro, com vesículas e amígdalas.
166,0	179,0	MA	Rocha de estrutura maciça e cor cinza claro, com descontinuidades predominantemente inclinadas e sub verticais. São observadas amígdalas centimétricas e alongadas de forma muito isolada ao longo do pacote, o preenchimento se dá por minerais de cores esverdeadas.

O perfil construtivo e litológico correspondente à descrição do poço RBV02 é apresentado a seguir:



POÇO RBV 02

Figura 11. Perfil construtivo e litológico do poço RBV 02. As capturas exibem as estruturas observadas durante a filmagem do poço, correspondentes as profundidades. Fonte: a autora (2024).

Em profundidades semelhantes, os poços RBV01 e RBV02 apresentam características litológicas similares, com pacotes de rochas maciças intercalados por níveis vesiculares e brechados. No entanto, algumas diferenças são notadas. O poço RBV02 possui maior expressividade nos níveis brechados abaixo dos 120m, além disso, este poço apresenta estruturas vesiculares e amigdaloidais mais desenvolvidas, como, por exemplo, a amígdala observada aos 100m, que se estende por aproximadamente 0,5m em meio ao nível brechado.

De modo geral, como dito anteriormente, as principais estruturas observadas foram separadas em zonas de brechas (BR), vesículas e amígdalas (VA) e rocha maciça (MA).

As brechas apresentam características que variam de um pacote para outro, mas que estão presentes nos dois poços. A diferença se dá principalmente na relação dos clastos com a matriz da brecha, que em alguns pontos aparenta ser bem litificada, enquanto em outros apresenta a formação de cavidades na superfície do poço, sendo descritas como escoriáceas (Figura 12).

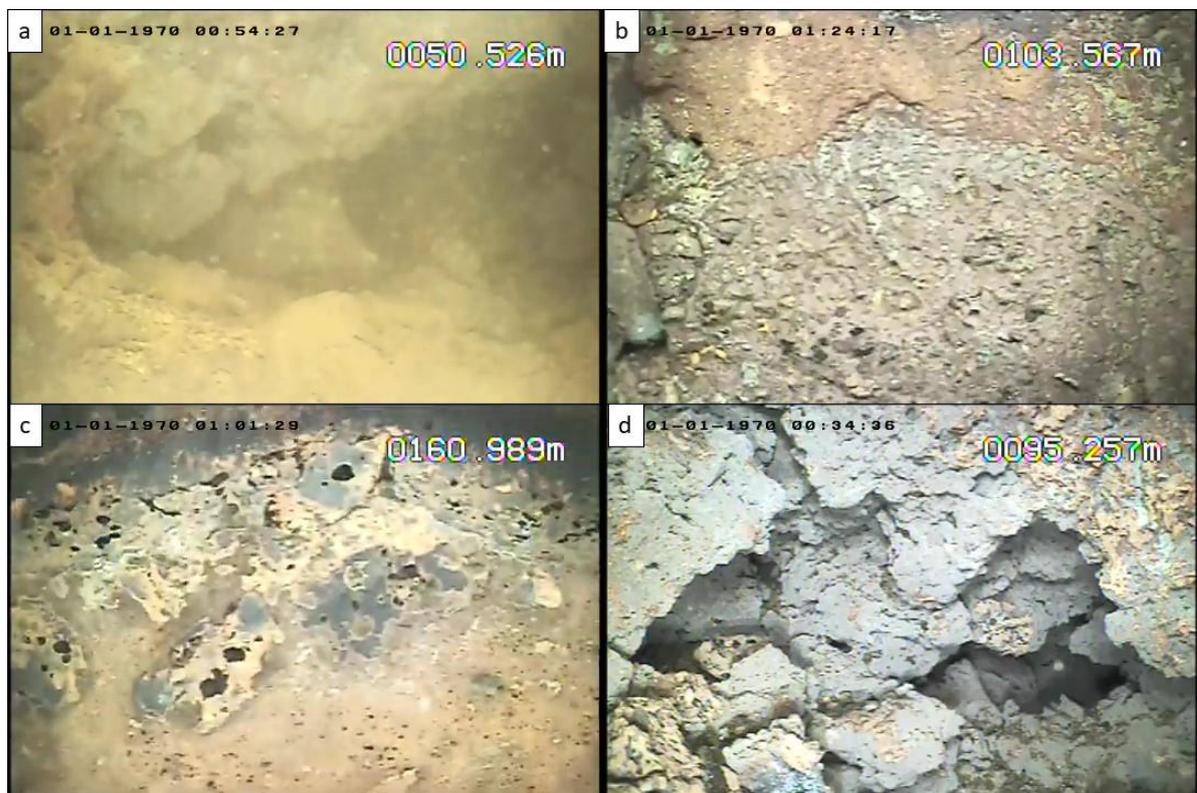


Figura 12. Exemplos de brechas visualizadas nas filmagens dos poços. (a) e (d) Brechas com formação de cavidades nos poços RBV01 e RBV02, respectivamente. (b) e (c) Brechas mais litificadas nos poços RBV01 e RBV02, respectivamente.

Em relação às zonas vesiculares e amigdaloidais, as estruturas ocorrem em diferentes tamanhos, minerais de preenchimento e com variação no predomínio de vesículas ou amígdalas (Figura 13). Apesar das especificações técnicas da câmera não trazerem a informação de amplitude da imagem, foi possível estimar a altura das imagens capturadas utilizando o contador de profundidade, assim, calcula-se que na visualização horizontal cada quadro represente entre cinco e seis centímetros do perfil

do poço, a partir disso, as vesículas e amígdalas observadas possuem tamanhos milimétricos a centimétricos.

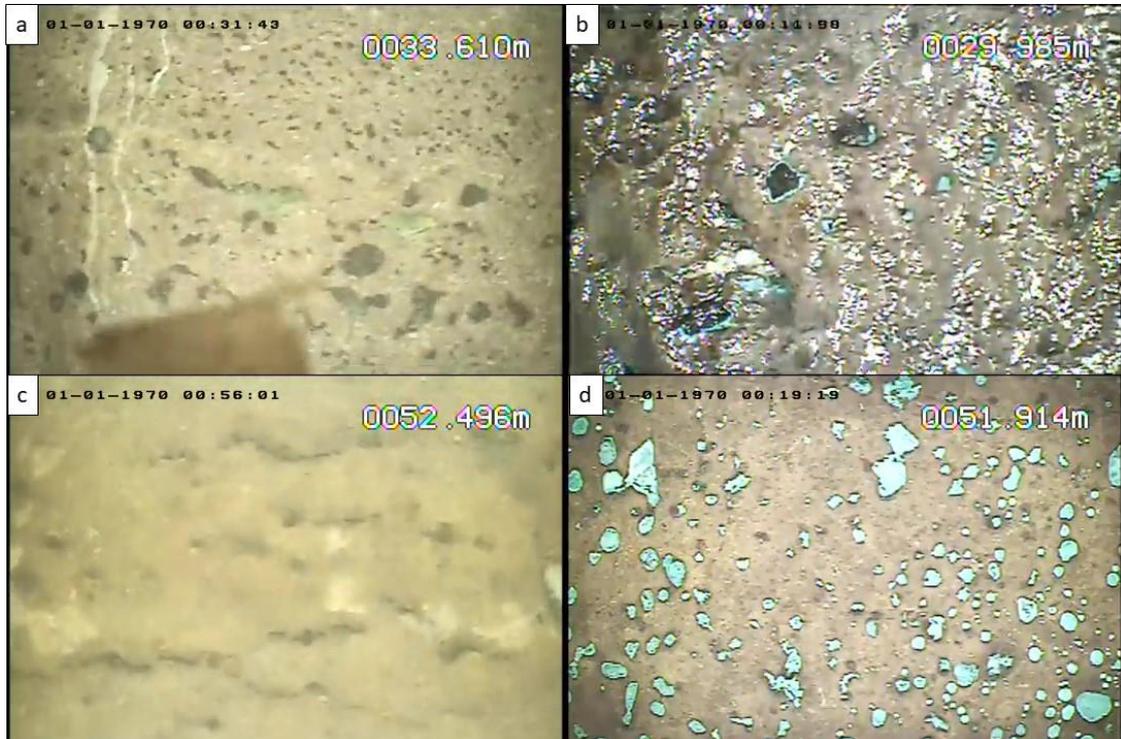


Figura 13. (a) e (b) Vesículas e amígdalas com preenchimento parcial ou completo por minerais secundários, nos poços RBV01 e RBV02, respectivamente. (c) Predomínio de vesículas no poço RBV01. (d) Predomínio de amígdalas no poço RBV02.

Os níveis de rocha maciça apresentam descontinuidades com mergulhos, sub-horizontais, inclinados e verticais, podendo ser estruturas tectônicas, como falhas e fraturas, ou atectônicas, como juntas de resfriamento ou contato entre derrames. Devido a perfuração cilíndrica vertical, é possível identificar as descontinuidades inclinadas pela formação de senoides no poço, que geram curvas com abertura para cima ou para baixo, no entanto, o tipo de filmagem utilizada não permite estimar a direção ou o mergulho das estruturas. Algumas descontinuidades possuem aberturas mais expressivas, mas que não ultrapassam tamanhos milimétricos, já outras possuem abertura muito incipiente, ou ainda, estão preenchidas por minerais secundários (figura 14).

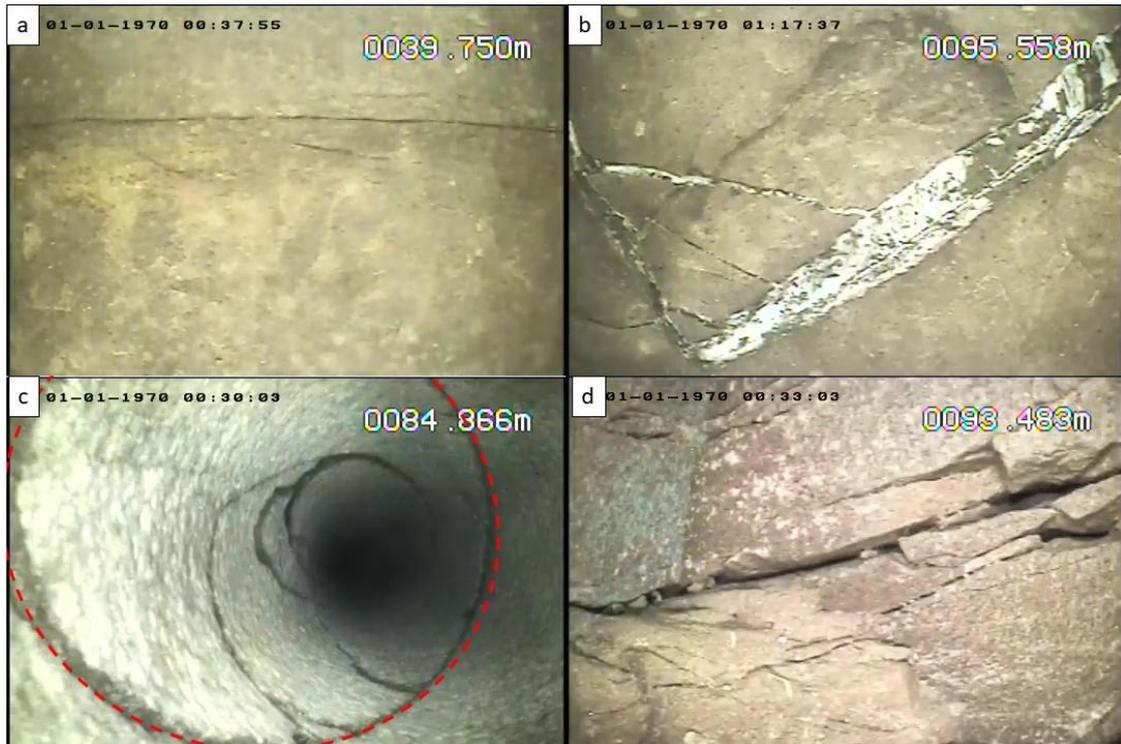


Figura 14. (a) Descontinuidade sub-horizantal no poço RBV01. (b) Descontinuidades preenchidas por minerais secundários no poço RBV01. (c) Estrutura inclinada tracejada em vermelho, observada na visualização vertical do poço RBV02. (d) Descontinuidade com abertura milimétrica no poço RBV02.

4.2. DIREÇÃO E VELOCIDADE DE FLUXO

Para a elaboração dos perfis de fluxo, os dados foram inicialmente tabulados, coletou-se as informações de profundidade (m) e velocidade de fluxo (m/min), então, através do cálculo de média aritmética obteve-se os valores médios de velocidade de fluxo. Os sinais positivos e negativos são utilizados para representar fluxos ascendentes e descendentes, respectivamente. Os valores diferenciais correspondem a variação de velocidade entre os pontos de interesse e, nesse caso, valores positivos indicam entrada de água e valores negativos indicam saída de água entre os pontos.

A coleta de dados utilizando o *HPFM* é iniciada do ponto mais profundo e segue em direção a superfície do poço, até que seja atingido o nível estático. Os pontos no perfil de fluxo são plotados da mesma forma. Elaborou-se tabelas de dados e perfis de fluxo para cada um dos poços.

No poço RBV01 foram coletados dados em treze pontos de interesse (Tabela 3). Contando a partir da maior profundidade, o fluxo inicialmente possui comportamento ascendente de 182,51m até 107,0m, alternando para descendente de 90,02m até 27,02m e, próximo ao nível estático o comportamento volta a ser

ascendente. A média de velocidade varia entre 0,274 m/min até 2,782 m/min nas zonas de fluxo ascendente e, nas zonas de fluxo descendente, a média de velocidade está compreendida entre 1,839m/min e 3,961m/min.

Tabela 3. Tabulação dos dados de velocidade de fluxo do poço RBV01, com as respectivas direções verticais e as estruturas associadas e os valores diferenciais.

Profundidade	Valor médio da velocidade de fluxo (m/min)	Valor diferencial	Direção de fluxo vertical	Estrutura associada
23,69	+2,782	+6,168	Ascendente	BR
27,02	-3,386	-0,305	Descendente	VA
33,28	-3,081	+0,880	Descendente	VA
49,96	-3,961	-1,246	Descendente	BR
66,02	-2,715	-0,876	Descendente	MA
75,95	-1,839	+0,375	Descendente	MA
90,02	-2,214	-2,488	Descendente	MA
107,06	+0,274	-0,100	Ascendente	BR
116,03	+0,374	-0,364	Ascendente	MA
126,64	+0,738	+0,079	Ascendente	VA
154,01	+0,659	+0,053	Ascendente	MA
157,00	+0,606	-0,050	Ascendente	MA
182,51	+0,656	0,000	Ascendente	MA

Em relação as estruturas associadas, conforme observado no perfil de fluxo (Figura 15), os pontos de maior velocidade estão associadas às brechas (BR), principalmente próximo aos contatos inferiores, tanto no sentido ascendente quanto no sentido descendente, já os pontos de menor velocidade são relacionados às descontinuidades que ocorrem nas zonas predominantemente maciças (MA), onde são observadas estruturas que podem ser interpretadas como falhas ou fraturas, por exemplo

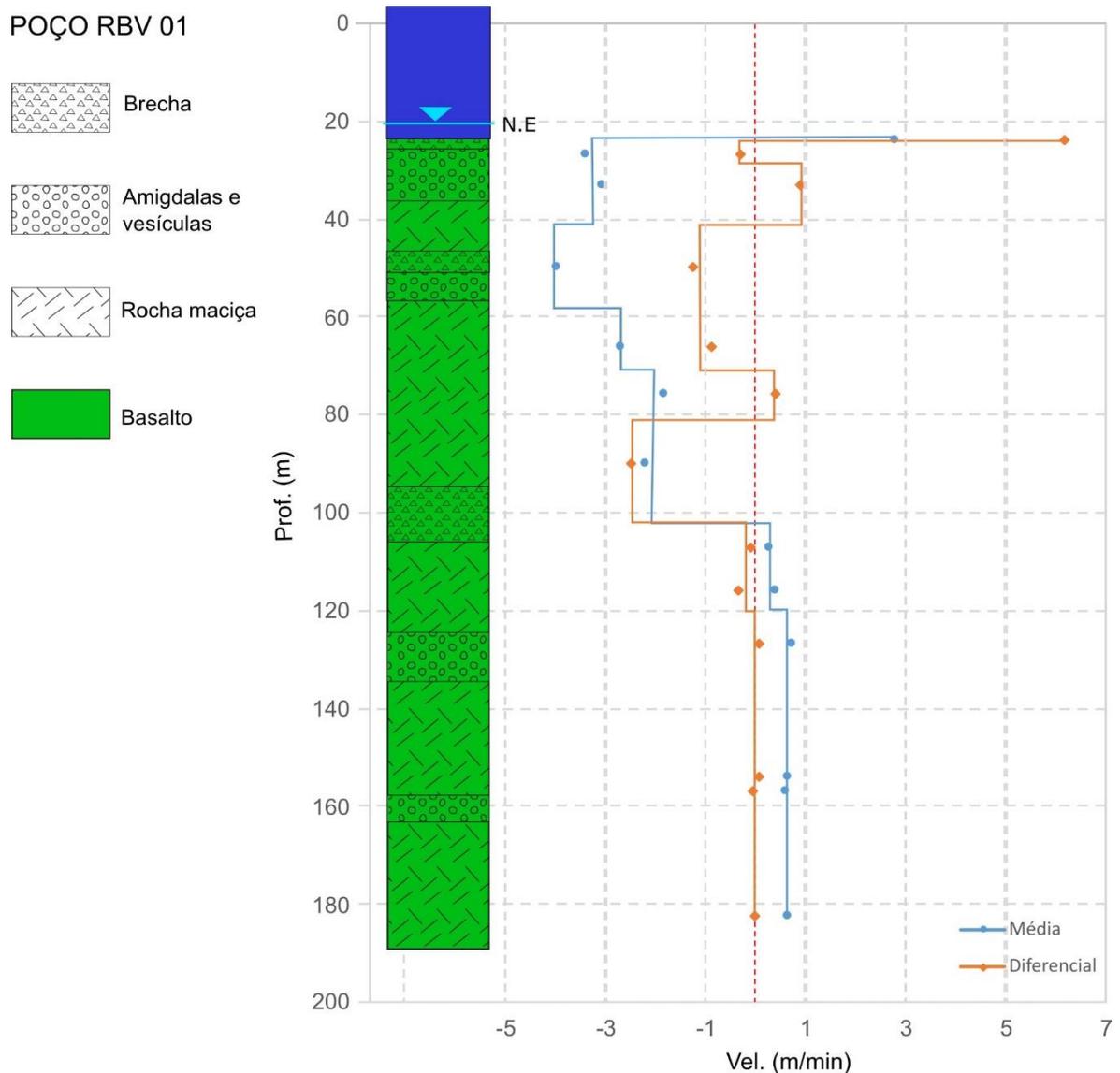


Figura 15. Perfil de fluxo do poço RBV01 acompanhado do perfil construtivo litológico correspondente. Em azul, pontos indicando valores de média de velocidade de fluxo e, em laranja, os valores diferenciais. As linhas que conectam os pontos são interpretativas. Fonte: a autora (2024)

No poço RBV02 foram coletados dados em vinte pontos de interesse (Tabela 4). O comportamento do fluxo no poço é predominantemente ascendente, alternando para descendente no intervalo entre 90,99m e 65,98m e novamente após os 47,98m, sendo esse o último ponto sondado. A média de velocidade varia entre 0,240 m/min e 1,209 m/min nas zonas de fluxo ascendente e, nas zonas de fluxo descendente, a média de velocidade está compreendida entre 0,820m/min e 1,475m/min.

Tabela 4. Tabulação dos dados de velocidade de fluxo do poço RBV02, com as respectivas direções verticais e as estruturas associadas

Profundidade	Valor médio da velocidade de fluxo (m/min)	Valor diferencial	Direção de fluxo vertical	Estrutura associada
47,98	-1,475	-1,735	Descendente	MA
52,2	0,26	-0,186	Ascendente	VA
65,98	0,446	1,266	Ascendente	MA
80,32	-0,82	0,065	Descendente	MA
86,43	-0,885	-1,267	Descendente	MA
90,99	0,382	-0,126	Ascendente	MA
94,99	0,508	0,364	Ascendente	BR
100,51	0,144	-0,043	Ascendente	BR
102,99	0,187	-0,053	Ascendente	BR
108,02	0,24	-0,969	Ascendente	BR
111	1,209	1,007	Ascendente	BR
112,04	0,202	-0,152	Ascendente	BR
113,98	0,354	0,104	Ascendente	MA
119,94	0,25	-0,024	Ascendente	MA
129,02	0,274	0,007	Ascendente	BR
134	0,267	0,007	Ascendente	VA
149,01	0,26	-0,114	Ascendente	MA
163,01	0,374	-0,072	Ascendente	VA
169,99	0,446	-0,343	Ascendente	MA
175,99	0,789	0	Ascendente	MA

O perfil de fluxo do poço RBV02 (Figura 16) indica que os pontos de maior velocidade estão associadas às brechas (BR), tanto no sentido ascendente quanto no sentido descendente, nas profundidades de 113m e 50m, aproximadamente.

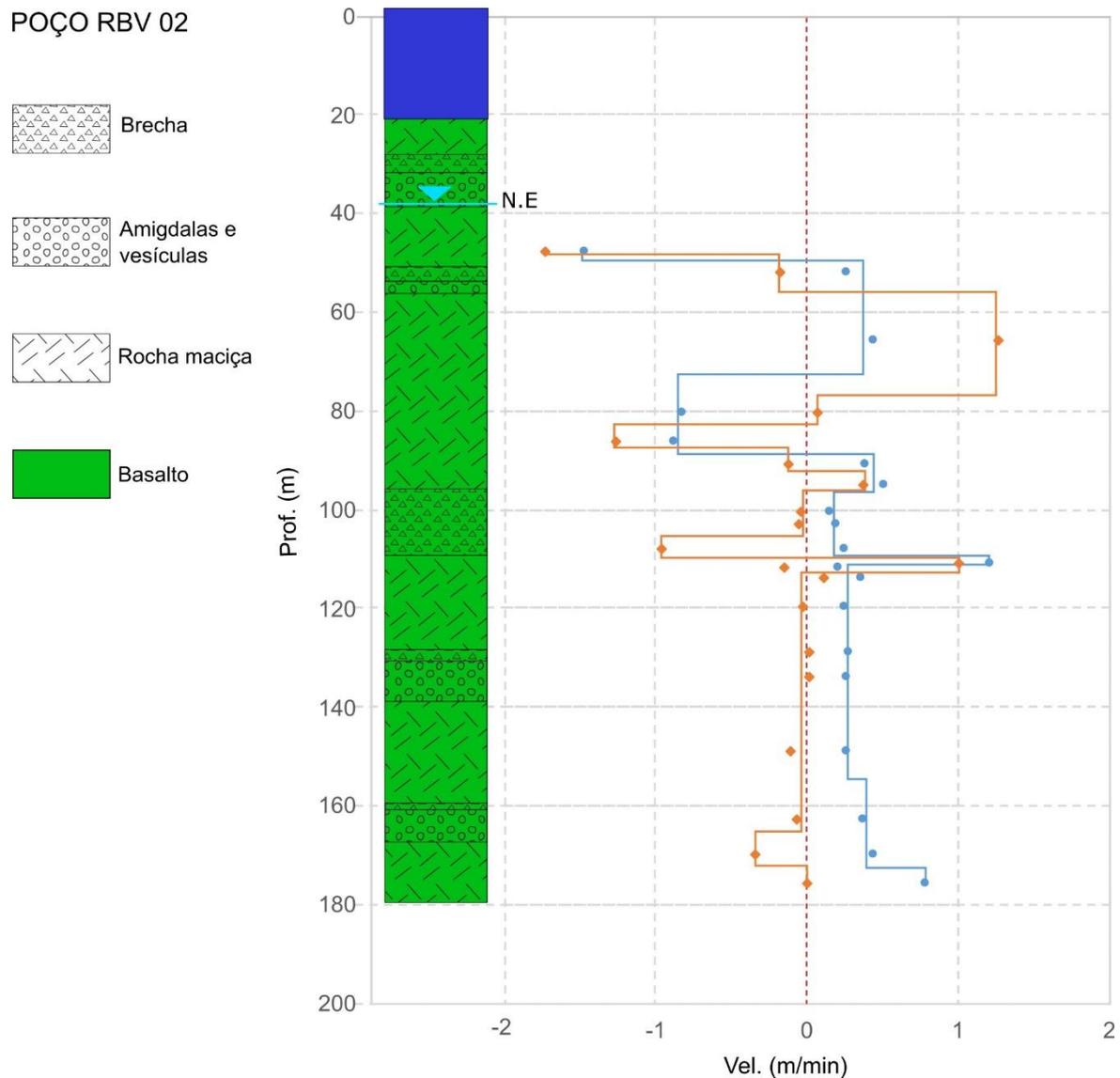


Figura 16. Perfil de fluxo do poço RVB02 acompanhado do perfil construtivo litológico correspondente. Em azul, pontos indicando valores de média de velocidade de fluxo e, em laranja, os valores diferenciais. As linhas que conectam os pontos são interpretativas. Fonte: a autora (2024)

5. DISCUSSÕES

Como características similares aos dois poços (Figura 17), nota-se que as velocidades de direção ascendentes são mais baixas que as velocidades de direção descendente. A relação entre as brechas (BR) e fluxos mais rápidos também existe em ambos os poços, no entanto, o poço RBV01 apresenta picos de velocidade maiores em relação ao poço RBV02. Além disso, é comum aos dois perfis fluxos iniciais ascendentes, com velocidades constantes e abaixo de 1m/min, esse comportamento se mantém do nível mais profundo até o nível de brecha (BR) localizado aos 100m.

Essas características refletem a importância das brechas (BR) para a hidrodinâmica da região, pois os picos de velocidade sugerem que são litoestruturas que contribuem para o aumento da permeabilidade do SASG.

Em relação as entradas e saídas de água, é possível perceber que as descontinuidades marcadas por contatos entre diferentes estruturas são pontos preferenciais para a circulação do fluxo subterrâneo e que controlam as direções de fluxo vertical dentro dos poços. Percebe-se que os locais de inversão de fluxo se comportam da seguinte maneira: locais em que os fluxos ascendentes e descendentes convergem são marcados por uma saída de água e; locais em que as direções de fluxo são opostas são marcados por entradas de água. Relacionando os locais de inversão de fluxo com os perfis litológicos, nota-se que existe uma relação com descontinuidades marcadas pelo contato entre zonas de estruturas diferentes, mas sendo sempre uma das estruturas a brecha.

As descontinuidades com aberturas milimétricas observadas em níveis maciços também são importantes pois, apesar de não apresentarem velocidade de fluxo tão altas quando o observado nas brechas, muitas entradas de água estão localizadas em zonas maciças. Ambos os poços apresentam um conjunto de descontinuidades importantes entre 75m e 80m de profundidade, marcadas por fraturas ou falhas com mergulhos inclinados e sub-horizontais. Esse intervalo de profundidade demarca entradas de água para os dois poços. Essas características ressaltam a importância dessas descontinuidades para a recarga do aquífero.

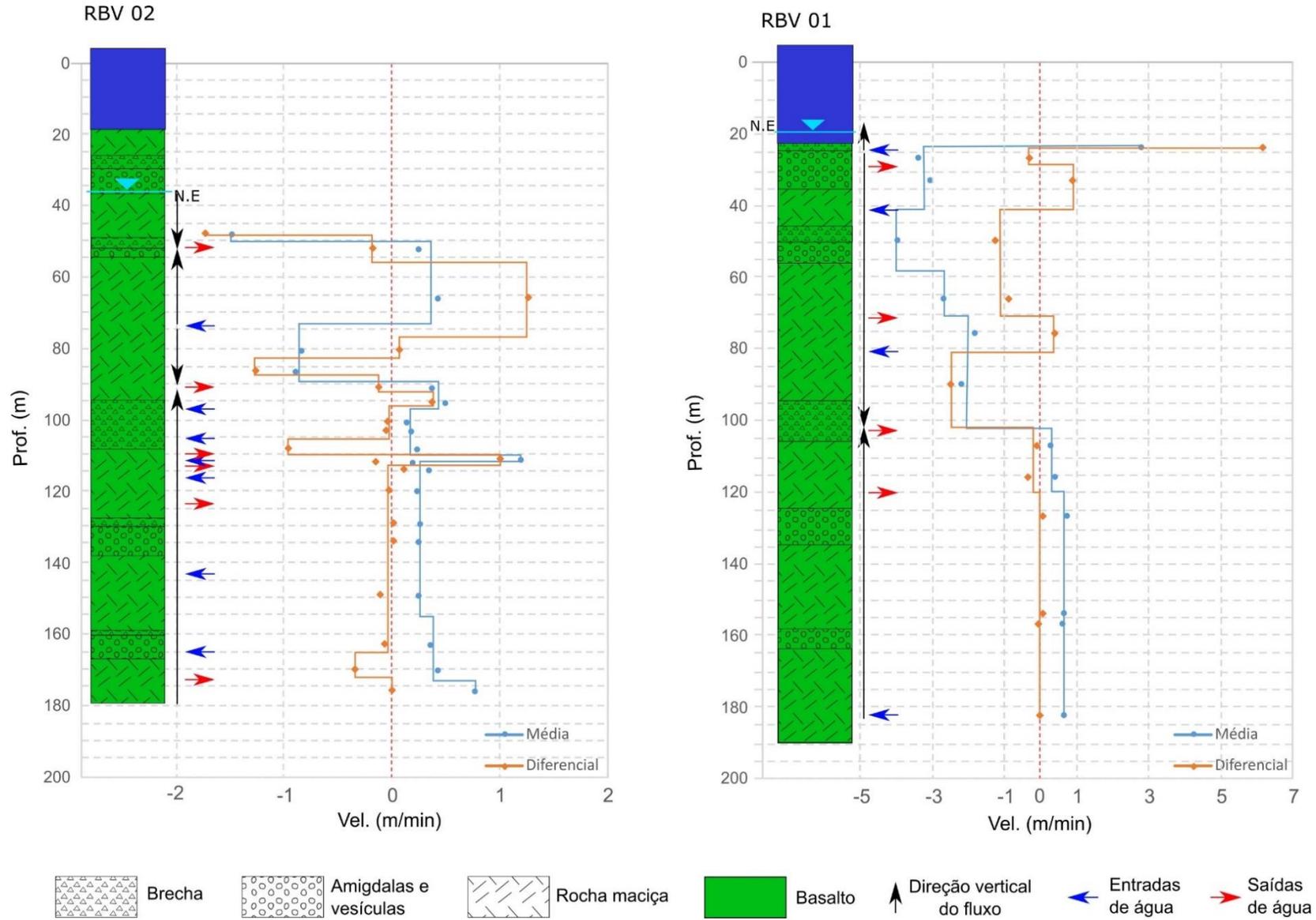


Figura 17. Correlação entre os perfis litológicos e os perfis de fluxo nos poços RBV02 e RBV01.

6. CONCLUSÕES

A associação das técnicas de filmagem de poços e do uso do heat pulse flowmeter (HPFM) se mostrou eficiente para a caracterização hidrodinâmica do Sistema Aquífero Serra Geral (SASG) na região da Bacia Hidrográfica Paraná 3 (BP3). A análise integrada de dados permitiu uma compreensão detalhada das características litoestruturais e do comportamento do fluxo subterrâneo, contribuindo para o avanço no entendimento da dinâmica hidráulica em aquíferos fraturados.

Os resultados evidenciaram que as zonas de brechas desempenham papel fundamental na permeabilidade do SASG, sendo associadas aos maiores picos de velocidade de fluxo, indicando sua relevância como principais condutos de água subterrânea. Em contrapartida, as zonas de rochas maciças apresentam menores velocidades de fluxo, mas as descontinuidades nos níveis maciços desempenham um papel crucial para entradas de água nos poços, o que pode ser entendido como elementos importantes para a recarga do aquífero.

A correlação entre as estruturas observadas e os padrões de fluxo revelou que os contatos entre diferentes tipos litológicos são importantes para a circulação dos fluxos subterrâneos, pois controlam as direções do fluxo vertical.

REFERÊNCIAS

- ATHAYDE, G. B. Análise estrutural e hidroquímica do aquífero Serra Geral na bacia hidrográfica do Paraná III. 141 f. Dissertação (Mestrado em Geologia) – Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2008.
- ATHAYDE, G. B. Compartimentação hidroestrutural do sistema aquífero Serra Geral (SASG) no Estado do Paraná, Brasil. 155 f. Tese (Doutorado em Geologia) – Setor de Ciências da Terra, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2013.
- ATHAYDE, G. B.; ATHAYDE, C. D. V. M. Hidrogeologia do sistema aquífero serra geral no Estado do Paraná. **Águas Subterrâneas**, v. 29, n. 3, p. 315, 2016. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.14295/ras.v29i3.28406>.
- ATHAYDE, ET AL. Águas invisíveis: o papel fundamental das águas subterrâneas na segurança hídrica da BP3, 2021.
- BETTÚ, D. F.; FERREIRA, F. J. F.; SALAMUNI, E.; FERNANDES, L. A. Compartimentação estrutural e conectividade dos sistemas aquíferos Caiuá e Serra Geral no Noroeste do Paraná - Brasil. **Revista Brasileira de Geofísica**, v. 24, n. 3, p. 393–409, 2006. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1590/s0102-261x2006000300008>.
- BUSSE, J.; PAILLET, F. L.; HOSSACK, A.; et al. Field performance of the heat pulse flowmeter: Experiences and recommendations. **Journal of applied geophysics**, v. 126, p. 158–171, 2016. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jappgeo.2016.01.021>.
- CAVIGLIONE, J.; OLIVEIRA, D. P. de; FERIANI, L.; CURCIO, G.; BONNET, A. Rios da Bacia Hidrográfica Paraná III. 44 p. Colombo: Embrapa Florestas, 2021.
- CPRM. COMPANIA DE PESQUISA DE RECURSOS MINERAIS. BESSER, M. L.; BRUMATTI, M; SPISILA, A. L.. **Mapa geológico e de recursos minerais do estado do Paraná**. Curitiba: CPRM, 2021.
- FILPI, T. Estimativas de permeabilidade em aquífero cárstico a partir de métodos de alta resolução. 2021. 96 f. Dissertação (Mestrado em Geologia) – Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2021.
- FREEZE, R. A.; CHERRY, J. A. **Groundwater**. Upper Saddle River, NJ, USA: Pearson, 1979.
- HESS, A. E. Identifying hydraulically conductive fractures with a slow-velocity borehole flowmeter, 1986.
- PROJETO HIDROSFERA. ATHAYDE, C.V.M.; ATHAYDE, G. B.; AMARAL, B.; TAVARES, D. A; GARCIA, L.; BENASSI, S.. Contribuição ao entendimento da interação entre as águas subterrâneas e superficiais na BP3. III Workshop NIT, p. 160, 2021.

LE BORGNE, T. et al. Comparison of alternative methodologies for identifying and characterizing preferential flow paths in heterogeneous aquifers. **Journal of hydrology**, v. 345, n. 3–4, p. 134–148, 2007.

LICHT, O. A. B.; ARIOLI, E. E. Mapa geológico do Grupo Serra Geral no Estado do Paraná. Curitiba: ITCG, 2018.

LICHT, O. B.; ARIOLI, E. A. A photographic atlas of the architecture, flow geometry and morphology, and facies of Serra Geral group (Paraná igneous province) in the state of Paraná, Brazil. **Boletim paranaense de geociências**, v. 76, 2020. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.5380/geo.v76i0.78536>.

LINDSAY, J. J.; ANDERSEN, J. C. Ø.; HUGHES, H. S. R.; et al. Platinum-group element geochemistry of the Paraná flood basalts – Modelling metallogenesis in rifting continental plume environments. *Geochimica et cosmochimica acta*, v. 311, p. 74–101, 2021. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.gca.2021.07.035>.

MILANI, E. J.; MELO, J. H. G.; SOUZA, P. A.; FERNANDES, L. A.; FRANÇA, A. B. Bacia do Paraná. **Boletim de Geociências - Petrobras**, Rio de Janeiro, v. 15, n. 2, p. 265–287, 2007

PEATE, D. W.; HAWKESWORTH, C. J.; MANTOVANI, M. S. M. Chemical stratigraphy of the Paraná lavas (South America): classification of magma types and their spatial distribution. **Bulletin of volcanology**, v. 55, n. 1–2, p. 119–139, 1992. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1007/bf00301125>.

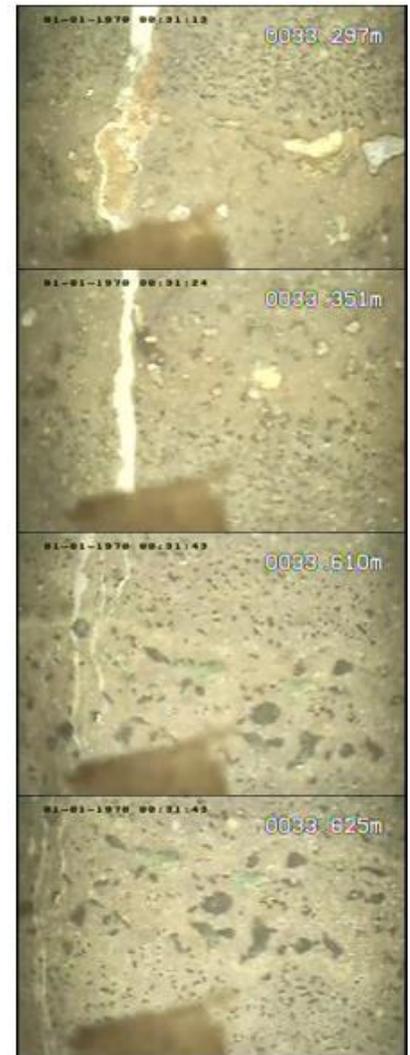
PRENSKY, S. E. Advances in borehole imaging technology and applications. **Geological Society**, London, Special Publications, v. 159, n. 1, p. 1-43, 1999.

ROSA FILHO, E. F. da; HINDI, E. C.; MANTOVANI, L. E.; BITTENCOURT, A. V. L. Aquíferos do Estado do Paraná. 1 ed., v. 1, 200 p. Curitiba: GráfiUniversitária da UFPR, 2011.

VALORE, L. A.; LICHT, O. A. B.; VASCONCELLOS, E. M. G.; TITON, B. G. Hydrovolcanic eruptions of the Paraná Igneous Province: Insights from mafic volcanoclastic deposits in Sertanópolis, Paraná, Brazil. **Journal of volcanology and geothermal research**, v. 435, n. 107759, p. 107759, 2023. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2023.107759>.

ZALÁN, P. V.; WOLFF, S.; CONCEIÇÃO, J. C.; ASTOLFI, M. A. M.; VIEIRA, I. S.; APPI, C. T.; ZANOTTO, O. A. Tectônica e sedimentação da Bacia do Paraná. In: SIMPÓSIO SUL-BRASILEIRO DE GEOLOGIA, 3., p. 441-477. Curitiba. Atas... Curitiba: [s.n.], 1987.

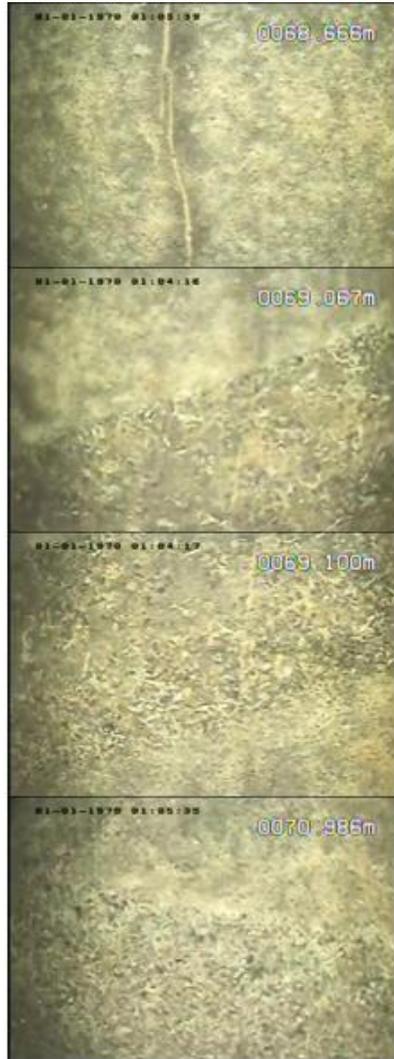
APÊNDICE A – CAPTURAS DE TELA (FILMAGENS) - POÇO RBV01





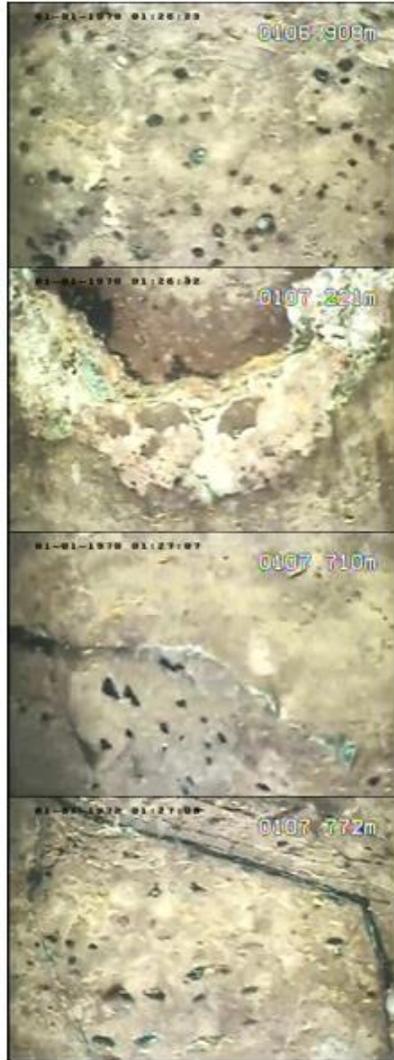


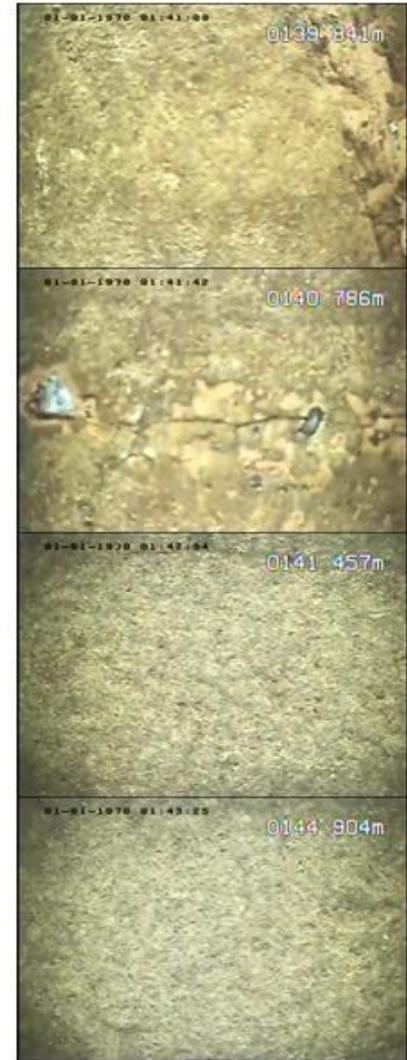


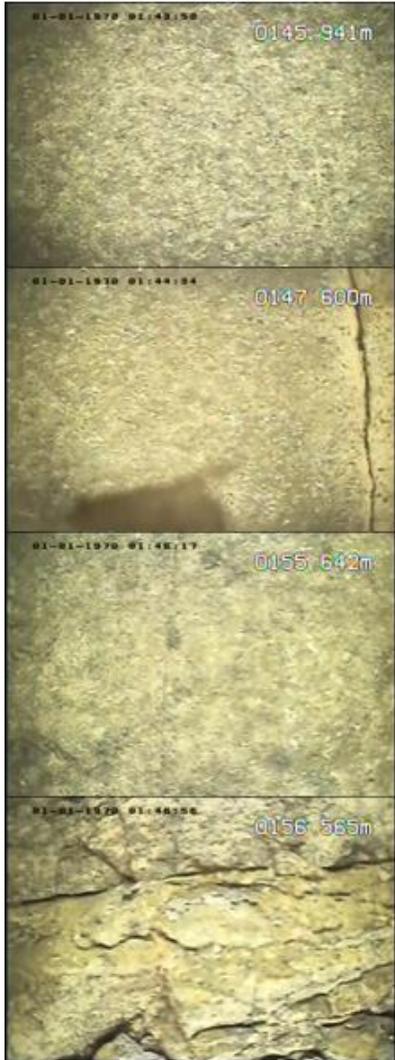












APÊNDICE B – CAPTURAS DE TELA (FILMAGENS) - POÇO RBV02

