



**Universidade de Brasília
Instituto de Geociências**

CARACTERIZAÇÃO REGIONAL E PROPOSTAS PARA A GESTÃO DO AQUÍFERO BATALHA, ESTADO DE MINAS GERAIS

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

GUILHERME NEIVA RODRIGUES OLIVEIRA

Orientador: Prof. Dr. JOSÉ ELOI GUIMARÃES CAMPOS

Brasília, Março de 2019.



**Universidade de Brasília
Instituto de Geociências**

CARACTERIZAÇÃO REGIONAL E PROPOSTAS PARA A GESTÃO DO AQUÍFERO BATALHA, ESTADO DE MINAS GERAIS

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

GUILHERME NEIVA RODRIGUES OLIVEIRA

Banca Examinadora:

Prof. Dr. José Eloi Guimarães Campos (Orientador)

Profa. Dra. Adriana Chatack Carmelo (IG - UnB)

Prof. Dr. Luiz Antônio de Oliveira (UFU)

Brasília, Março de 2019.

"Nunca se esqueça de quem você é, porque é certo que o mundo não se lembrará. Faça disso sua força. Assim, não poderá ser nunca a sua fraqueza. Arme-se com esta lembrança, e ela nunca poderá ser usada para prejudicá-lo."

Tyrion Lannister

AGRADECIMENTOS

Agradeço em especial ao meu orientador, exemplo de profissional e amigo José Eloi, pelos momentos de aprendizado, confiança, parceria e paciência.

A minha família, por todo apoio e incentivo, que mesmo distantes nunca deixam de enviar boas vibrações e demonstrações de afeto. Em especial ao meu pai José Rodrigues, engenheiro agrônomo da região de Paracatu, responsável por me apresentar a área objeto desse estudo, ainda quando eu era criança, quando me levava em seus serviços de consultoria nas fazendas, onde o dia sempre terminava com um banho de cachoeira.

A Flor, por todo amor, carinho e compreensão.

Ao André, pela parceria ao longo desses dois anos e grande contribuição a execução deste projeto.

Aos meus amigos Boi e Ricardo pela força e prestatividade durante as campanhas de campo.

Por fim, agradeço a todos que contribuíram de alguma forma com esse trabalho.

RESUMO

O Aquífero Batalha corresponde a um reservatório subterrâneo intergranular, isotrópico e homogêneo, hospedado em material inconsolidado, localizado entre os municípios de Paracatu/MG e Guarda-Mor/MG, disposto em um *trend* N-S e com uma área total estimada de 745 km². O Aquífero Batalha se localiza em um divisor de águas, o qual é fonte de recursos hídricos para importantes bacias hidrográficas, com grande contribuição na manutenção das vazões do rio Paranaíba e em menor proporção ao rio São Francisco.

Os objetivos deste trabalho são sintetizados na obtenção dos parâmetros hidrodinâmicos do Aquífero Batalha, bem como sua caracterização e delimitação espacial, estimativas de reservas hídricas e avaliação dos riscos de sobreexploração e contaminação; além da proposição de medidas que permitam o uso sustentável dos recursos hídricos do Aquífero Batalha.

Dados de 220 poços tubulares indicam que o aquífero estudado apresenta vazão média de 45,5 m³/h, descarga essa encontrada em poços relativamente rasos com profundidade média de 42,5 m. Os mesmos dados indicam que a média da espessura saturada do aquífero é de 33,3 m. A zona não saturada do aquífero é constituída principalmente por latossolos argilosos de condutividade hidráulica (K_v) da ordem de 10^{-4} m/s em superfície, sotopostos a uma camada espessa de saprolito arenoso originado pelo intemperismo de quartzitos da Formação Serra da Batalha, pertencente ao Grupo Canastra. Os parâmetros hidrodinâmicos obtidos para a zona saturada correspondem a condutividade hidráulica (K) de $3,6 \times 10^{-5}$ m/s, transmissividade (T) de $9,5 \times 10^{-4}$ m²/s e vazão específica (S_y) com média de 0,2.

As estimativas de reservas hídricas do Aquífero Batalha, considerando o limite definido pela área de recarga regional (425 km²), apresentam valores de reserva permanente de 2.553.944.580 m³/ano, reserva renovável de 191.565.000 m³/ano e reserva explotável estimada de 446.959.458 m³/ano.

O levantamento da qualidade da água do aquífero permite afirmar que não há impeditivos para o seu uso do ponto de vista da qualidade, não sendo identificados indícios de contaminação por fertilizantes ou outros contaminantes. Em geral a água armazenada no aquífero apresenta caráter levemente ácido.

De modo a se contribuir com a implantação de iniciativas que visem ao uso sustentável e a manutenção dos recursos hídricos provenientes do Aquífero Batalha, são propostas ações para o gerenciamento da exploração do aquífero. Nesse sentido, sugere-se: construção adequada dos poços tubulares; padronização dos testes de bombeamento; instalação de rede de poços de monitoramento para levantamento mensal das variações de nível estático; monitoramento semestral dos parâmetros de qualidade da água; cálculo anual das reservas hídricas com base na pluviosidade do ano anterior; medidas de otimização dos métodos de irrigação.

Palavras-Chave: Aquífero Batalha; Intergranular; Homogêneo e isotrópico; Estado de Minas Gerais.

ABSTRACT

The Batalha Aquifer corresponds to an intergranular, isotropic and homogeneous aquifer, located in the region of Paracatu and Guarda-Mor cities, Minas Gerais State, Brazil. This aquifer is North-South trend orientated with estimated area of 745 km². The aquifer occurs as the boundary of the important watersheds in Central Brazil territory, with important flow to the Paranaíba River and in minor proportion to the São Francisco River.

The aim of this research include the definition of the hydrodynamics parameters of the Batalha Aquifer, as well as the characterization and spatial boundaries, water resources estimation and overexploitation and contamination risk assessment. In addition the research objective the proposal of action to the sustainable use of the aquifer water resources.

Data collected from 220 wells indicate that the Batalha Aquifer has an average flow of 45.5 m³/h. This value is found in relatively shallow wells with an average depth of 42.5 m and indicates that the average thickness of the saturated zone is about 33.3 m. The hydrodynamic parameters obtained for the saturated zone correspond to values for hydraulic conductivity (K) of 3.6×10^{-5} m/s, transmissivity (T) of 9.5×10^{-4} m²/s and mean specific yield (Sy) of 0.2. The vadose zone of the aquifer consists mainly of clayey oxisol with hydraulic conductivity (Kv) of the order of 10^{-4} m/s at surface. The oxisol are developed under a thick level of sandy saprolite derived from the weathering of quartzites from the Serra da Batalha Formation, Canastra Group.

Considering the regional recharge area of 425 km², the Batalha Aquifer has permanent reserves in order of 2,553,944,580 m³/year, renewable reserve of 191,565,000 m³/year and estimated exploitable reserve of 446,959 .458 m³/year.

Aquifer water quality analyses shows that in general the water stored in the aquifer has a slightly acid and very little mineralized character. This analysis also indicates that there are no impediments to the water use from the point of view of quality and no contamination indication from fertilizers or other contaminants.

Actions are proposed for the management of the exploitation of the aquifer, to contribute to the implementation of initiatives to the sustainable use and maintenance of water resources from the Batalha Aquifer. In this sense, the following measures are suggested: construction of wells considering technical regulations; standardization of pumping tests procedures; monitoring wells network installation for monthly measurements of level variations and water quality assessment; annual calculation of groundwater resources based on the rainfall of the previous year; and optimization of irrigation methods.

Keywords: Batalha aquifer; Intergranular; Isotropic and homogeneous; Minas Gerais State.

SUMÁRIO

Capítulo 1	1
INTRODUÇÃO	1
1.1 Apresentação.....	1
1.2 Justificativas	3
1.3 Localização	3
1.4 Objetivos	4
1.5 Materiais e Métodos	5
1.5.1 Métodos Aplicados.....	6
1.5.2 Campanhas de Campo.....	6
Ensaio de Infiltração	7
Método dos Anéis Concêntricos	7
Método Open end Hole.....	8
Levantamento Geofísico.....	9
Análise da Qualidade da Água.....	11
1.5.3 Tratamento e Integração de Dados.....	12
Determinação dos Parâmetros Hidrodinâmicos	12
Estimativas de Reservas Hídricas	13
Capítulo 2	16
CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA	16
2.1. Aspectos Climáticos.....	16
2.2. Hidrologia	18
2.3. Geologia Regional.....	20
2.3.1. Grupo Canastra.....	20
Formação Serra do Landim	21
Formação Paracatu.....	21
Membro Morro do Ouro	21
Membro Serra de Santana	22
Formação Serra da Urucânia	22
Formação Serra da Batalha	23
2.4. Geologia Local	23
2.5. Geomorfologia.....	27
2.6. Pedologia.....	29
Latosolos - Latossolo Vermelho, Latossolo Vermelho-Amarelo e Latossolo Amarelo	29
Gleissolo Háptico distrófico	30
Cambissolo Háptico e Plintossolo Pétrico Concrecionário	30
Capítulo 3	32

CARACTERIZAÇÃO DO AQUÍFERO BATALHA	32
3.1 Considerações Iniciais	32
3.2 Cadastro dos Pontos D'água	33
3.3 Aspectos Construtivos dos Poços	36
3.4 Caracterização da Zona Não Saturada	38
3.5 Caracterização da Zona Saturada	42
3.6 Estudo Geofísico – Eletrorresistividade (CA)	44
3.7 Caracterização das Áreas de Recarga	50
3.8 Estimativas de Reservas Hídricas	51
3.9 Modelo de Circulação	55
3.10 Qualidade das Águas	57
3.11 Potencial Regional	60
Capítulo 4	64
PROPOSTAS PARA GESTÃO	64
4.1 Construção Adequada dos Poços Tubulares de Produção	64
4.2 Minimização dos Riscos de Sobreexploração	68
4.3 Minimização do Risco de Contaminação	73
4.4 Otimização das Condições de Recarga	74
4.5 Diminuição de Custos com Bombeamento	76
4.6 Otimização dos Métodos de Irrigação	77
4.7 Propostas de Critérios para a Emissão de Outorga de Direito de Uso	78
Capítulo 5	81
CONCLUSÕES	81
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	84
APÊNDICES	88
APÊNDICE I - Gráficos de Análises de Testes de Bombeamento	88
APÊNDICE II – Perfis Geofísicos	100
APÊNDICE III – Mapa de Delimitação do Aquífero Batalha	116
APÊNDICE IV – Cadastro dos poços utilizados na caracterização e delimitação do Aquífero Batalha	118

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1. Mapa de localização e acessos à área de estudo.	4
Figura 1.2. Esquema do método dos anéis concêntricos para ensaios de infiltração. (Adaptado de Fiori, 2010).....	8
Figura 1.3. Esquema do método <i>open end hole</i> para ensaios de infiltração. (Adaptado de Fiore 2010)....	9
Figura 1.4. Configuração tetraédrica usual de campo (Telford <i>et al</i> 1990).	10
Figura 1.5. Equipamento geofísico para aquisição de dados elétricos (Eletrorresistivímetro modelo SYSCAL Pro 72).....	11
Figura 1.6. Sonda multiparâmetro YSI <i>Professional Plus</i> e sonda HQ 40d da <i>Hach Instruments</i> , utilizadas para coleta dos parâmetros (pH, temperatura, total de sólidos dissolvidos (TDS), condutividade elétrica (CE) e oxigênio dissolvido (OD).	12
Figura 2.1. Normal Climatológica Brasileira (NCB) para o Município de Patrocínio-MG, segundo dados obtidos junto ao INMET (Instituto Nacional de Meteorologia). Estação climatológica 83539.	16
Figura 2.2. Dados de precipitação e temperatura média mensal entre os anos de 2012 e 2016 da estação climatológica automática Guarda-Mor.	17
Figura 2.3. Dados de precipitação acumulada total entre os anos de 2012 e 2016 da estação climatológica automática Guarda-Mor.	18
Figura 2.4. Hidrografia da área de estudo. Localizada entre as Bacias hidrográficas dos rios Paraná e São Francisco.....	19
Figura 2.5. A esquerda a cachoeira do Teixeira, localizada no ribeirão dos Teixeiras, tributário do rio São Marcos. A direita queda d'água no ribeirão Batalha, também afluente do rio São Marcos.	19
Figura 2.6. Coluna estratigráfica do Grupo Canastra (Modificada de Rodrigues 2008 e Dardenne 2000).20	
Figura 2.7. Aspecto geral do quartzito da Formação Serra da Batalha, com aspecto maciço, bastante silicificado responsável pela sustentação do relevo elevado na região de estudo.	24
Figura 2.8. Detalhe do quartzito da Formação Serra da Batalha mostrando aspecto laminado/foliado em que a foliação de baixo ângulo é paralela ao acamamento sedimentar.	24
Figura 2.9. A) Afloramentos de filito alterado da Formação Serra da Batalha B) Detalhe de exposição mostrando foliação proeminente crenulada. Este tipo petrográfico ocorre estratigraficamente sobre os quartzitos.	25
Figura 2.10. Mapa Geológico da área de estudo. (Modificado das Folhas Geológicas 1:100.000 Serra da Tiririca e Guarda-Mor).....	26
Figura 2.11. Exemplo de paisagem associada à Unidade Geomorfológica Chapadas de Paracatu, com relevo local estritamente plano e coberto por latossolos espessos.	27
Figura 2.12. Modelo Digital de Elevação (MDE) ALOS Palsar da região de estudo.....	28
Figura 2.13. Distribuição da declividade na região de estudo.	28
Figura 2.14. Porção superior de perfil de Latossolo Vermelho-Amarelo com textura argilosa. Notar a estruturação granular no horizonte A.....	29
Figura 2.15. Área de ocorrência de Gleissolo Háptico que sofre ressecamento em função do amplo período seco observado no ano de 2017. Ao longo dos vales abertos das veredas estes solos apresentam-se ainda com saturação permanente.....	30
Figura 2.16. A - Perfil de Plintossolo Pétrico concrecionário. B - Perfil de Cambissolo Háptico com forte pedregosidade e horizonte C a partir de 55 cm, além de contatos quebrados entre os horizontes.	31
Figura 3.1. Área de abrangência do Aquífero Batalha, com contribuição para as bacias hidrográficas dos rios Paraná e São Francisco.	33
Figura 3.2. Gráficos de caixa para distribuição de dados do Nível Estático (NE), Nível Dinâmico (ND), Rebaixamento (sw), Capacidade Específica (Cp), Profundidade (Profun.), Vazão (Q) e Espessura Saturada (b). Os valores em negrito referem-se à média de cada parâmetro.....	34
Figura 3.3. Gráfico de dispersão elaborado com 220 pares de vazão e as respectivas espessuras saturadas do aquífero nos pontos de amostragem. Notar tendência linear crescente entre os dados de entrada. R-sq = coeficiente de determinação.	35
Figura 3.4. Torre de perfuração com a respectiva caixa de lama e broca utilizada para as perfurações..	36

Figura 3.5. Revestimento em PVC comumente utilizados, com as “ranhuras” de função filtro, responsáveis pela entrada de água no poço. Em C observa-se “brita” de calcário de granulometria ~ 2,0 cm, comumente utilizada como pré-filtro dos poços da região.	37
Figura 3.6. Composição do material de saída durante a perfuração. Em A e B observa-se o material removido durante os primeiros metros de perfuração. Já em C observa-se a areia clara correspondente ao saprolito do quartzito da Formação Serra da Batalha do Grupo Canastra.	37
Figura 3.7. Poço tubular instalado sem proteção sanitária e com o pré-filtro composto por brita calcária até a superfície. Observa-se também um tupo repositivo necessário para o preenchimento de pré-filtro a medida que o poço produz areia do aquífero.....	38
Figura 3.8. Ensaios de infiltração do tipo anéis concêntricos e <i>open end hole</i> , realizados nos principais usos do solo da área de recarga do Aquífero Batalha.....	39
Figura 3.9. Gráfico da correlação dos valores de condutividade hidráulica (Kv) com as classes e tipos de uso do solo, obtidos pelo método dos anéis concêntricos. Evidenciando a diminuição dos valores de Kv.	41
Figura 3.10. Gráfico de dispersão dos valores de Kv nas diferentes profundidades investigadas, nos pontos PGN-12, PGN-40, PGN-44, PGN-51, PGN-53, PGN-57, PGN-63, PGN-102, PGN-103 e PGN-108. O gráfico evidencia a diminuição dos valores de Kv com o aumento da profundidade.	41
Figura 3.11. Gráfico de interpretação da curva rebaixamento versus tempo do ensaio de	44
Figura 3.12. Equipamento Eletroresistivímetro SYSCAL Pro 72 e eletrodo montado pronto para iniciar o levantamento.	45
Figura 3.13. Localização dos perfis de eletroresistividades realizados na região de estudo, com a finalidade de obtenção de informações geológicas em subsuperfície e que auxiliaram na delimitação do aquífero.	46
Figura 3.14. Modelo geológico elaborado a partir dos dados de resistividade do ponto PGN-65 e de perfil litológico de poço recém-construído.	47
Figura 3.15. Compilado das seções de eletroresistividade obtidas em que o Aquífero Batalha ocorre. Seções PGN-64, PGN-66, PGN-69, PGN-70, PGN-71, PGN-72, PGN-74, PGN-76, PGN-77, PGN-80 e PGN-81.....	49
Figura 3.16. Compilado das seções de eletroresistividade obtidas em que o Aquífero Batalha não ocorre. Seções PGN-69, PGN-70, PGN-73, PGN-75 e PGN-79.....	50
Figura 3.17. Perfil esquemático da dinâmica das áreas de recarga regional e local do Aquífero Batalha.	51
Figura 3.18. Variação dos níveis freáticos em Latossolos Argilosos, na bacia do alto Jardim, Distrito Federal. A demarcação retangular refere-se ao período de maior precipitação média na bacia.	52
Figura 3.19. Variação dos níveis freáticos no grupo dos Gleissolos, na bacia do alto Jardim, Distrito Federal.....	53
Figura 3.20. Hidrograma de um rio hipotético durante um evento de precipitação, mostrando as contribuições do fluxo de base e do escoamento superficial, para a descarga total do rio. A linha pontilhada ilustra um método empírico para determinar o fluxo de base: a linha se estende paralela a partir da parte de recessão do fluxo de base da curva C voltando diretamente para o pico de descarga B e depois para o início da subida A (Fonte Fitts, 2002).	55
Figura 3.21. Modelo conceitual de fluxo para a região de estudo, indicando os principais processos envolvidos no sistema, e como ocorrem as transferências de águas do Aquífero Batalha para os cursos d’água e para o aquífero fraturado sotoposto.	56
Figura 3.22. Análise e coleta de amostra d’água (subterrânea e superficial).....	57
Figura 3.23. Gráfico da distribuição dos valores médios de temperatura e pH, ambos obtidos em campo.	58
Figura 3.24. Gráfico da distribuição dos valores médios de oxigênio dissolvido (OD), condutividade elétrica (CE), total de sólidos dissolvidos (TDS) e nitrato.....	59
Figura 3.25. Áreas de chapada em mesmo contexto geológico, geomorfológico e climático em que o Aquífero Batalha se encontra.....	63
Figura 4.1. Amostra de calha coletada durante a perfuração do poço. Foto adquirida em lupa de mesa (zoom de 8X). Composto por grãos de quartzo mal selecionados.....	65

Figura 4.2. Pré-filtro comumente utilizado nas construções de poços da região. Composto por fragmentos de dolomitos de granulometria grossa a muito grossa.	65
Figura 4.3. Situação comum a todos os poços existentes na região do Aquífero Batalha. A brita em torno do tubo de aço é diariamente colocada no espaço anelar do poço, por meio de um pequeno orifício na laje de concreto existente.	66
Figura 4.4. Perfil construtivo ideal para poços instalados no Sistema Aquífero Batalha. Notar importância da existência de um isolamento sanitário na porção superior da coluna de revestimento. Adaptado de AS - Geotecnia, Meio Ambiente e Poços Artesianos.....	67
Figura 4.5. Sugestão de compartimentação do Aquífero Batalha para realização dos cálculos de estimativas de reservas hídricas. Limite aproximado do divisor hidrogeológico no âmbito do Aquífero Batalha.....	70
Figura 4.6. Perfil construtivo de um poço de monitoramento adequado ao contexto geológico local. Poço simples com seção de filtro curta. Observação: utilizar PVC ao invés de aço carbono como material de revestimento.	71
Figura 4.7. Poço tubular aberto sem isolamento sanitário (pré-filtro em contato direto com a superfície). Vetor para a rápida percolação de águas da chuva ou irrigação e de materiais lixiviados. Diâmetro do revestimento de 6 polegadas.	74
Figura 4.8. Exemplo de “sistema barraginha” após evento de chuva. Imagem retirada da Circular Técnica nº 177 da EMBRAPA.	75
Figura 4.9. Curvas de rebaixamento <i>versus</i> tempo referentes a testes de bombeamento escalonado com estabilização de nível. A vazão outorgável deverá se próxima a Q_3 , em função do comportamento da curva de rebaixamento. Figura adaptada de Custodio & Llamas, 1983.....	80

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 3.1. Dados estatísticos dos poços utilizados na caracterização e delimitação do Aquífero Batalha. Fonte: SUPRAM-NOR.....	34
Tabela 3.3. Valores de K_v em superfície e em profundidade de acordo com a classe e uso do solo. Os campos sem dados ocorrem devido a impossibilidade de realização do ensaio ou problemas na execução do mesmo. (AC = anéis concêntricos; LVAd = latossolo vermelho amarelo distrófico; LAd = latossolo amarelo distrófico); GHd = Gleissolo Háplico Tb distrófico.	40
Tabela 3.4. Valores dos parâmetros hidrodinâmicos da zona saturada obtidos após processamento dos dados no software AquiferTest 9.0 da Waterloo Hydrogeologic Inc. Fonte: Processos de outorga dos poços cadastrados na SUPRAM (http://www.siam.mg.gov.br/siam/processo/index.jsp).	43
Tabela 3.5. Características das camadas obtidas durante o acompanhamento da perfuração do poço (perfil litológico) e seus respectivos intervalos de profundidade e resistividade.....	46
Tabela 3.6. Dados dos parâmetros analisados.	58
Tabela 4.1. Tabela das propostas de locação dos poços de monitoramento para as sete áreas.....	72

ÍNDICE DE EQUAÇÕES

Equação 1. Equação para obtenção da altura da coluna d'água.	8
Equação 2. Equação para obtenção da altura da coluna d'água.	8
Equação 3. Equação para obtenção dos valores de condutividade hidráulica (K) pelo método dos anéis concêntricos.	8
Equação 4. Equação da distância inicial.	9
Equação 5. Equação da condutividade hidráulica (Kv) pelo método <i>open end hole</i>	9
Equação 6. Equação da resistividade elétrica aparente do meio.	10
Equação 7. Equação do fator geométrico.	10
Equação 8. Equação para obtenção da reserva permanente.	14
Equação 9. Equação para obtenção da reserva explotável:	14
Equação 10. Equação de obtenção da reserva renovável:	15

Capítulo 1

INTRODUÇÃO

1.1 Apresentação

A água é um recurso natural indispensável à vida, possui importante valor econômico ambiental e social, fundamental à sobrevivência da humanidade e dos ecossistemas no nosso planeta. Segundo Pena (2014), de toda a água disponível em nosso planeta, a água doce corresponde a cerca de 3% do total, com 70% desse percentual localizado nas calotas polares, 0,3% disponíveis em rios e lagos e 29% em reservas hídricas subterrâneas, as quais são o foco deste trabalho.

As águas subterrâneas têm ganhado atenção especial nas últimas décadas devido à sua importância como reserva hídrica estratégica de uso cada vez mais intenso pela população, em que a demanda cresce a cada ano para suprir as necessidades de abastecimento humano, dessedentação de animais, e dos processos produtivos (principalmente em grandes perímetros de irrigação). O Brasil ocupa uma posição privilegiada nesse cenário, onde a disponibilidade hídrica é considerada elevada, sendo reconhecido como um país rico em recursos hídricos superficiais e subterrâneos.

O acesso aos recursos hídricos requer a atenção dos usuários e principalmente dos gestores públicos, diante do aumento da demanda e diminuição da oferta em termos de qualidade, acessibilidade e vazões, proporcionadas por águas superficiais. Os recursos hídricos subterrâneos são considerados em muitos casos como a alternativa preferencial, na maioria dos casos onde a disponibilidade do recurso superficial é escassa, além de ser relevante em termos econômicos, vindo a complementar ou até substituir a forma de captação superficial, como é o caso dos municípios de Ribeirão Preto/SP (Descovi Filho et al 2008). As vantagens na exploração de águas subterrâneas são muitas quando comparadas com os recursos superficiais. Em geral possuem boa qualidade, reduzida área de captação, não implicam em desapropriação de extensas áreas, são menos suscetíveis aos agentes contaminantes superficiais, apresentam manutenção segura e de baixo custo, além de impactos ambientais mais reduzidos (Feitosa, 2008). No entanto, as águas subterrâneas são responsáveis pela manutenção das vazões dos cursos d'água superficiais, principalmente durante o período de recessão das chuvas através do fluxo de base, compondo uma das etapas do ciclo hidrológico. Nesse contexto, a gestão inadequada do uso das águas subterrâneas pode provocar o rebaixamento do nível freático e a diminuição da vazão das águas superficiais, gerando conflitos entre usuários, além de problemas ambientais relacionados.

A motivação para a realização deste trabalho decorre do conhecimento prévio do grande número de solicitações de outorgas para uso de água subterrânea (nos últimos anos) para fins de irrigação de lavouras, na região do noroeste do estado de Minas Gerais, entre os municípios de

Guarda-Mor e Paracatu. Os poços instalados chamaram a atenção principalmente em função das significativas vazões exploradas (dezenas de metros cúbicos por hora) em profundidades relativamente rasas (menores que 50 metros). A região possui hoje mais de 220 poços outorgados pela Superintendência Regional de Meio Ambiente do Noroeste Mineiro (SUPRAM-NOR) e estima-se que outros aproximadamente 100 processos se encontram em análise, todos com características hidrogeológicas similares e com produção destinada para fins de irrigação.

Essa alta demanda tem despertado a ação dos órgãos ambientais competentes e de pesquisadores da região, visto a necessidade de maior número de dados técnicos para embasar ações de gestão desse recurso.

As outorgas de direito de uso dos recursos hídricos subterrâneos estão entre os instrumentos previstos pela Política Nacional de Recursos Hídricos (Lei Nº 9.433/97). Nesse contexto, são necessários o levantamento das características intrínsecas do aquífero em questão, quanto ao seu regime de fluxo, reservas, parâmetros hidrodinâmicos e interrelações com o ciclo hidrológico. A obtenção desses dados é imprescindível para o bom gerenciamento dos recursos hídricos, de modo a garantir o equilíbrio dos usos múltiplos e a sustentabilidade dos mananciais, conforme fundamentado na Política Nacional de Recursos Hídricos.

A grande disponibilidade hídrica subterrânea na área de estudo e facilidade em seu acesso e exploração, propiciou aos fazendeiros da região, a expansão das culturas irrigadas em suas propriedades, em especial, por meio de pivôs centrais, em vista que os recursos hídricos superficiais se encontram restritos em pequenos cursos d'água (veredas).

O uso da água subterrânea na região para fins de irrigação se iniciou no início dos anos 2000, ocorrendo um grande aumento de solicitações de perfurações e de outorgas entre os anos de 2010 e 2015. A utilização de pivôs centrais propiciou a obtenção de duas a três safras anuais conforme a cultura, tornando as propriedades de grandes lavouras com elevado valor agregado, com a produção de grãos como soja, feijão, trigo e milho.

No entanto, o grande número de poços resulta em pontos de conexão direta entre a superfície e o aquífero, aumentando à vulnerabilidade a contaminação se não construídos de forma apropriada. Este trabalho também aborda os métodos de construção dos poços, além da qualidade atual da água subterrânea, com o intuito de fornecer dados hidrogeológicos do aquífero aqui denominado como Aquífero Batalha, bem como realizar a sua caracterização e delimitação.

Além dos relatórios ambientais disponíveis nos processos de outorgas protocolados na SUPRAM-NOR, não foram encontradas referências bibliográficas sobre esse aquífero. Também não há registros bibliográficos sobre aquíferos similares, porém acredita-se que outras chapadas sustentadas por geologia semelhante na região, podem apresentar características hidrogeológicas com elevado potencial hídrico, assim como o Aquífero Batalha, promovendo o desenvolvimento

agropecuário e econômico de outras regiões.

O desenvolvimento desta dissertação consiste inicialmente na apresentação da área de estudo, com as justificativas e objetivos almejados, além das descrições metodológicas utilizadas, compondo o Capítulo I. Posteriormente, no Capítulo II é apresentada a caracterização do meio físico da área de estudo, incluindo a geologia, geomorfologia, pedologia, clima e hidrografia da região. O Capítulo III corresponde à caracterização hidrogeológica do Aquífero Batalha, incluindo sua zona vadosa, parâmetros hidrodinâmicos, balanços hidrogeológicos e estimativas de reservas hídricas subterrâneas. Por fim, o Capítulo IV contém considerações e sugestões sobre a gestão dos recursos hídricos para a área de estudo, de modo a promover a exploração de seus recursos de forma mais eficiente e sustentável.

1.2 Justificativas

Por se tratar de um trabalho pioneiro na região, a caracterização desse aquífero norteará os estudos relacionados a água subterrânea na área de estudo, principalmente devido a crescente demanda de água na região e a necessidade de maior conhecimento sobre as características hidrogeológicas do Aquífero Batalha, que permitam subsidiar projetos de gestão e o uso sustentável de seus recursos hídricos, com foco em reduzir os riscos de contaminação e de sua sobreexploração, os quais são fatores que justificam o estudo que visa conhecer esse aquífero.

Outro fator é a ausência de uma definição formal para o aquífero e a possibilidade de ocorrência de aquíferos em outras regiões com características hidrogeológicas similares e de potencial hídrico elevado.

1.3 Localização

O Aquífero Batalha localiza-se no noroeste do estado de Minas Gerais, no limite entre os municípios de Paracatu e Guarda-Mor, em um controle geológico/estrutural de orientação norte-sul, posicionado estratigraficamente no topo da chamada Serra da Tiririca (que inclui área de chapada elevada denominada de Chapada de Paracatu). A poligonal em estudo situa-se próximo a divisa do estado de Minas Gerais com o estado de Goiás (Figura 1.1).

O acesso à área de estudo pode ser realizado saindo de Brasília/DF, acessando a BR-040 inicialmente até a cidade de Paracatu-MG e posteriormente seguindo em sentido a Guarda-Mor/MG através da rodovia MG-188, acessando-se a área por vias secundárias a oeste. Outra possibilidade de acesso ocorre pela BR-050, tomando-se posteriormente a rodovia estadual GO-020, no sentido leste até a área de estudo.

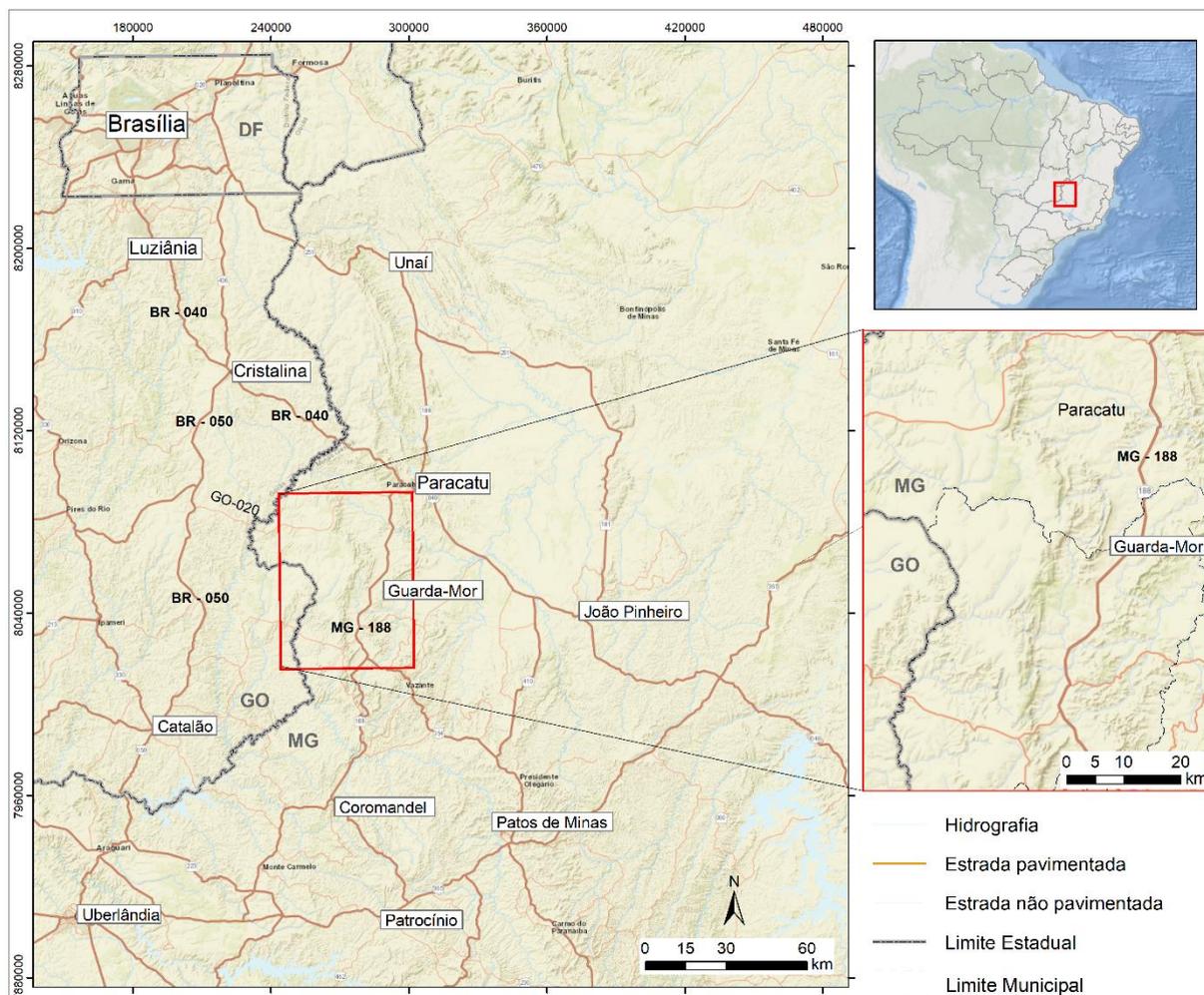


Figura 1.1. Mapa de localização e acessos à área de estudo.

1.4 Objetivos

O principal objetivo deste trabalho é apresentar a caracterização regional do Aquífero Batalha, com a finalidade de subsidiar medidas de gestão necessárias para o melhor aproveitamento dos recursos hídricos da região.

Dentre os objetivos e metas específicas destacam-se:

- Determinar os parâmetros hidrodinâmicos do aquífero;
- Delimitar a área do aquífero;
- Fazer a caracterização geológica e pedológica da área do aquífero;
- Analisar os parâmetros da qualidade da água subterrânea;
- Construir um banco de dados com dados geológicos e hidrogeológicos do Aquífero Batalha;
- Analisar o risco de sobreexploração do aquífero.
- Propor procedimentos e diretrizes necessárias para a gestão integrada dos recursos hídricos na região do Aquífero Batalha;

1.5 Materiais e Métodos

Todos os dados cartográficos utilizados e gerados por este trabalho se encontram no sistema de referência UTM SIRGAS 2000 Zona 23 Sul, sendo processados no *software* de SIG ArcMap 10.5, para tanto foi utilizado a licença de estudante fornecida pela ESRI. Foram utilizados como base de orientação aos trabalhos de campo e produtos cartográficos aqui desenvolvidos, os dados de hidrografia, localidades e estradas disponíveis em formato *shapefile*, das Folhas Geológicas SE.23-V-C-II Serra da Tiririca (2015) e SE.23-V-C-V Guarda-Mor (2013), ambas em escala 1:100.000. Esses dados vetoriais podem ser acessados pela plataforma GeoSGB da Companhia de Pesquisa e Recursos Minerais (CPRM) a partir do seguinte *link*: <http://geosgb.cprm.gov.br>.

Foram utilizadas imagens do sensor OLI embarcado no satélite Landsat 8 (cena 220/72) entre os anos de 2017 e 2018, como base de navegação em campo e análise de uso e ocupação do solo. As imagens desse satélite possuem 15 metros de resolução espacial após processamento de fusão entre as bandas multiespectrais e a banda pancromática realizado no *software* de processamento de imagens ENVI 5.3, disponível para acesso no Laboratório de Geoprocessamento do Instituto de Geociências da UnB, com a devida licença para uso. As imagens do satélite Landsat 8 podem ser acessadas a partir da plataforma *Earth Explorer* do Serviço Geológico Americano - USGS (<https://earthexplorer.usgs.gov>).

Para a análise do relevo foi utilizado o modelo digital de elevação (MDE) do ALOS Palsar, o qual possui 12,5 metros de resolução espacial, o que permitiu a análise das variações de elevação e declividade para a área de estudo. O acesso aos dados do satélite ALOS pode ser realizado através do seguinte *link*: <https://vertex.daac.asf.alaska.edu>.

Parte dos dados hidrogeológicos foi obtida em análise de estudos contidos nos processos de outorga realizados pelos usuários junto ao órgão ambiental responsável, correspondente a Superintendência Regional de Meio Ambiente - Noroeste de Minas Gerais (SUPRAM-NOR). Os processos contêm informações como as coordenadas dos poços, vazão, profundidade, testes de bombeamento e níveis estático e dinâmico. Grande parte desses processos se encontram disponíveis na plataforma do Sistema Integrado de Informação Ambiental-Siam, (<http://www.siam.mg.gov.br>), outros processos foram obtidos diretamente na SUPRAM-NOR localizada no município de Unai/MG, através de solicitação de vista aos respectivos processos.

Os métodos propostos para execução desta dissertação se encontram subdivididos em três fases sequenciais principais, a primeira denominada de revisão bibliográfica, a segunda de campanhas de campo e a última etapa em tratamento e integração de dados.

1.5.1 Métodos Aplicados

Por se tratar de um aquífero cuja exploração pode ser considerada recente, não existem estudos prévios com uma definição formal em relação a sua caracterização regional. Nesse contexto, a revisão bibliográfica teve como foco os aspectos físicos da região, tais como: geologia regional e local, geomorfologia, geologia estrutural, pedologia, clima e uso do solo. No entanto, também foram realizados levantamentos e revisões dos relatórios ambientais, testes de bombeamento e de perfis construtivos dos poços tubulares, apresentados pelos usuários a SUPRAM-NOR, a partir de processos de perfuração e solicitações de outorga de uso da água subterrânea. Os processos obtidos na SUPRAM-NOR permitiram a construção de um cadastro contendo 220 poços tubulares.

1.5.2 Campanhas de Campo

Foram realizadas quatro campanhas de campo na área de estudo, entre setembro de 2017 e novembro de 2018, onde foram obtidos 101 pontos de avaliações. Durante essas campanhas de campo, foram realizados levantamentos de dados geológicos, geomorfológicos, hidrogeológicos e descrição de perfis de solo, levantamentos geofísicos, além de análise dos poços tubulares existentes e da dinâmica de uso da água subterrânea na área, que corresponde a poços localizados em série nas chamadas “baterias de poços” que bombeiam água para um reservatório central (localmente denominados de “piscinão”), de onde posteriormente os pivôs centrais são abastecidos de água para a irrigação das culturas.

Foram realizados ensaios de infiltração *in situ*, com aplicação dos métodos dos anéis concêntricos e *open end hole* (Fiori *et al* 2010), necessários para avaliação da zona não saturada do Aquífero Batalha.

Também foram realizados acompanhamentos de perfurações de poços tubulares, em conjunto com a equipe de perfuração da empresa Martins & Silva, o que permitiu melhor compreensão das estruturas dos poços, características do aquífero e do método de construção utilizado, bem como amostragens do aquífero, durante as perfurações.

Foram realizados levantamentos de perfis geofísicos de eletrorresistividade, em locais com ausência de poços tubulares, com finalidade de se obter dados geofísicos do aquífero e respectivo material geológico local, além de informações que auxiliaram para a etapa de delimitação do aquífero.

Nos levantamentos de dados em campo foi realizada análises da qualidade das águas da área de estudo, onde foram levantados dados físico-químicos e sobre os teores de nitrato da água de poços tubulares, reservatórios (piscinões) e veredas.

Ensaio de Infiltração

Os ensaios de infiltração em conjunto com os estudos dos solos, foram executados sobre a área do Aquífero Batalha, de modo a determinar o conhecimento superficial e em subsuperfície da zona não saturada. Segundo ABGE (1996) os ensaios de infiltração consistem em ensaios de rebaixamento, realizados com carga variável (flutuação do nível d'água) e com injeção de água, na zona não saturada do aquífero.

Neste trabalho foram realizados ensaios de infiltração *in situ* pelos métodos do infiltrômetro de anéis concêntricos e teste tipo *open end hole*, com o intuito de se conhecer os valores da condutividade hidráulica vertical (K_v) da zona não saturada. Essa propriedade visa estimar o potencial de fluxo de água, além da infiltração e migração vertical de plumas de umidade durante os processos de recarga do aquífero.

A condutividade hidráulica considera as características do meio como porosidade, tamanho, distribuição, forma e arranjo das partículas, e as características do fluido que está escoando (viscosidade e massa específica).

Método dos Anéis Concêntricos

De acordo com Fiori (2010) o método dos anéis concêntricos é um instrumento utilizado para determinação da condutividade hidráulica vertical (K_v), composto por dois cilindros dispostos de forma concêntrica, que são cravados a alguns centímetros do solo para impedir a dispersão lateral da água inserida

Bernardo (1986) afirma que o método é apropriado para a determinação do K_v da superfície do terreno, o qual apresenta variações diretamente proporcionais entre o tipo de ocupação do solo e a taxa de infiltração.

O infiltrômetro de anéis concêntricos utilizado possui 25 cm de altura e diâmetro de 35 cm para o anel interno e 45 cm no anel externo, e foi cravado em profundidades entre 5 e 10 cm nos solos (Figura 1.2). Os anéis são preenchidos com água, sendo que a função do compartimento externo é de evitar a dispersão da água proveniente do anel interno, de forma a garantir a verticalidade da infiltração da água no solo, devendo o anel externo estar sempre acima do nível do anel interno (Bernardo 1986).

Depois de preencher o anel interno, mede-se a diferença entre o topo do anel e a altura da lâmina d'água do anel interno, obtendo-se o M_i ou medida inicial. Para determinação do parâmetro H é medida a altura total do cilindro.

Em posse dos parâmetros I , M_i e H , calcula-se a altura inicial da coluna d'água (H_i) pela seguinte Equação 1.

Equação 1. Equação para obtenção da altura da coluna d'água.

$$H_i = H - I - M_i$$

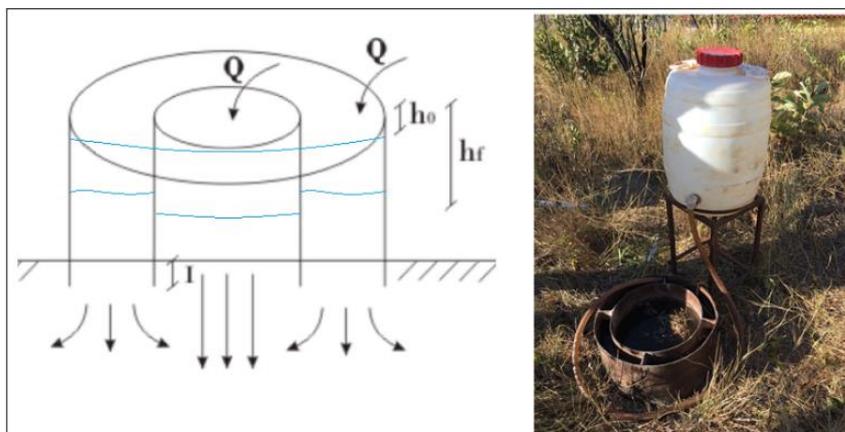


Figura 1.2. Esquema do método dos anéis concêntricos para ensaios de infiltração. (Adaptado de Fiori, 2010).

O tempo de duração dos ensaios Δt varia em decorrência de variações da condutividade hidráulica do meio. Na finalização do ensaio, obtém-se novamente a distância entre o topo do cilindro e o nível da água, resultando na medida final (M_f) e, conseqüentemente, na coluna d'água final de acordo com a Equação 2

Equação 2. Equação para obtenção da altura da coluna d'água.

$$H_f = H - I - M_f$$

A condutividade hidráulica vertical (K_v) em superfície, para método com carga variável, é obtida com auxílio da Equação 3:

Equação 3. Equação para obtenção dos valores de condutividade hidráulica (K) pelo método dos anéis concêntricos.

$$K_v = U \times \frac{I}{\Delta t} \times \ln\left(\frac{h_0}{h}\right)$$

Onde, I = profundidade de cravação, h_0 = coluna d'água inicial, h = coluna d'água final, Δt = tempo de decorrido para o rebaixamento entre h_0 e h e, U = fator de conversão de unidades (passar mm/min para m/s), expresso como $1/60000$.

Método Open end Hole

Os ensaios do tipo *open end hole* são utilizados para avaliações de K_v em profundidade, neste trabalho foram realizados ensaios nas profundidades de 50, 100, 150 e 200 cm. Foram introduzidos quatro tubos de PVC de 50 cm de diâmetro e comprimento compatível com a profundidade a ser analisada. Os tubos são cravados no solo de modo a evitar a dispersão lateral da água a ser introduzida.

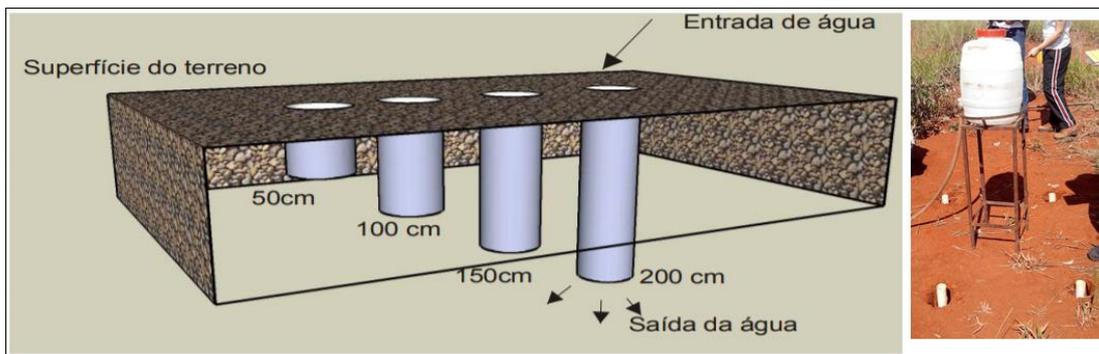


Figura 1.3. Esquema do método *open end hole* para ensaios de infiltração. (Adaptado de Fiore 2010).

Com os tubos cravados nas respectivas profundidades, mede-se o parâmetro H (correspondente a distância entre o topo do tubo e o fundo do furo). Posteriormente, os tubos são preenchidos com água e mede-se a distância inicial entre o topo do tubo e o nível da água (M_i), obtendo a altura da coluna d'água inicial (Equação 4).

Equação 4. Equação da distância inicial.

$$H_o = M_i$$

Após um intervalo de tempo decorrido (Δt), mede-se a nova posição da lâmina d'água (M_f), obtendo-se a altura da coluna d'água final ($h = H - M_f$) (Fiori 2010). Para a determinação da K_v utiliza-se a Equação 5 a seguir.

Equação 5. Equação da condutividade hidráulica (K_v) pelo método *open end hole*.

$$K_v = 2,303 \times \frac{R}{4\Delta t} \times \left[\log \left(\frac{h_0}{h} \right) \right]$$

Onde, R = raio do tubo (em metro), h_0 = coluna d'água inicial, h = coluna d'água final, Δt = tempo decorrido para o rebaixamento entre h_0 e h (em segundos).

Levantamento Geofísico

Neste trabalho foram realizados 15 perfis geofísicos a partir do método de eletrorresistividade, com o objetivo de se obter informações geológicas e da espessura do aquífero. Os primeiros perfis geofísicos foram locados inicialmente próximos a poços com perfis litológicos e construtivos conhecidos, de modo a servirem como referência aos valores de resistividade obtidos. Os demais perfis se encontram em locais distantes a poços tubulares e com poucas informações geológicas, sendo de grande utilidade para a delimitação do Aquífero Batalha.

O princípio do método geofísico da eletrorresistividade está baseado na determinação dos valores de resistividade elétrica dos materiais, uma das variáveis responsáveis por expressar as propriedades eletromagnéticas dos solos e rochas (De Oliveira Braga 2016). Ainda de acordo com o autor, os diferentes tipos de materiais existentes no ambiente geológico apresentam a resistividade elétrica como uma de suas propriedades fundamentais, como parâmetro físico

aplicável para a identificação de litotipos sem a amostragem ou reconhecimento direto.

Os levantamentos de resistividade elétrica consistem de um sistema de quatro eletrodos, sendo dois deles usados para enviar uma corrente elétrica (I) ao solo (eletrodos A e B), e os outros dois eletrodos (M e N) utilizados para medir a diferença de potencial (ΔV) entre eles (Figura 1.4).

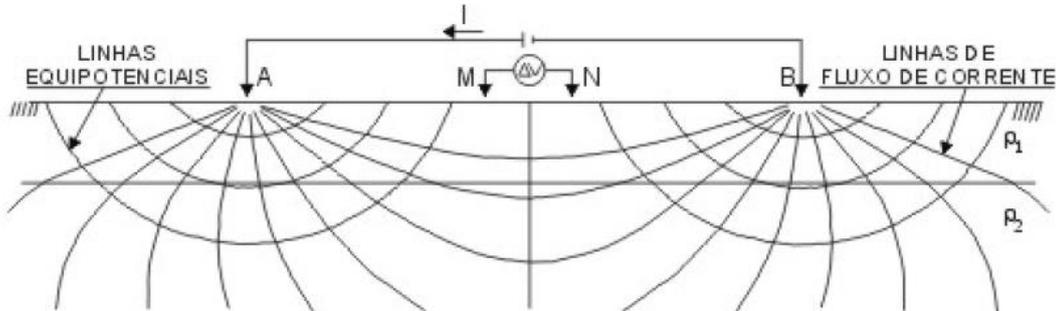


Figura 1.4. Configuração tetraédrica usual de campo (Telford *et al* 1990).

Após obtenção da diferença de potencial e da corrente que flui no meio, a resistividade elétrica aparente (ρ_a) do meio (Equação 6) dependerá somente do fator geométrico (K), o qual é função do posicionamento dos eletrodos no terreno (Equação 7).

Equação 6. Equação da resistividade elétrica aparente do meio.

$$\rho_a = \frac{\Delta V}{I} K$$

Equação 7. Equação do fator geométrico.

$$K = \frac{2\pi}{\left(\frac{1}{r_{C1P1}} - \frac{1}{r_{C2P1}} - \frac{1}{r_{C1P2}} - \frac{1}{r_{C2P2}} \right)}$$

Onde, ρ_a é a resistividade elétrica aparente do meio; r_{C1P1} , r_{C2P1} , r_{C1P2} e r_{C2P2} são as distâncias entre os eletrodos de corrente e de potencial.

A técnica utilizada neste trabalho consistiu no chamado caminhamento elétrico (CA), que segundo Telford *et al.* (1990) possibilita o mapeamento lateral das variações de resistividade elétrica. O posicionamento dos eletrodos (potencial e corrente) foi realizado pelo arranjo dipolo-dipolo. Nesse arranjo, as fontes de corrente (transmissores) são distanciadas dos receptores em uma distância fixa para cada nível de investigação. Para aumentar a profundidade e o nível investigado, aumenta-se a distância (X) entre o transmissor e os receptores.

O produto do levantamento de eletrorresistividade é um conjunto de dados de resistividade elétrica obtido em n profundidades que formam uma pseudosseção, que reflete as variações do subsolo em resposta à passagem de correntes elétricas (Elis 1998). Cada material geológico

apresenta um intervalo de resistividade que depende da composição mineralógica da rocha, da quantidade de fluídos presentes nos poros da rocha e da salinidade do fluído.

Os levantamentos de eletrorresistividade foram realizados ao longo de linhas com ausência de informação geológicas em escala adequada ao trabalho e com ausência de poços tubulares.

Foi utilizado o equipamento Eletrorresistivímetro SYSCAL Pro 72 (fabricado pela *Iris Instruments*) que consiste em um módulo de aquisição interligado em cabos multieletrodos (Figura 1.5). A corrente foi injetada no solo através de eletrodos metálicos para e medir o potencial elétrico gerado pelo fluxo de corrente no subsolo.

O arranjo montado possui 360 metros de extensão, com eletrodos espaçados de 10 em 10 metros, que permitiram investigação de até 70 metros de profundidade.



Figura 1.5. Equipamento geofísico para aquisição de dados elétricos (Eletrorresistivímetro modelo SYSCAL Pro 72).

Análise da Qualidade da Água

Os riscos de contaminação das águas do Aquífero Batalha se restringem as aplicações sucessivas de fertilizantes que auxiliam no desenvolvimento das culturas, as quais são o tipo de uso predominante sobre a área do aquífero. Já a vulnerabilidade está relacionada as suas propriedades físicas. Por se tratar de um aquífero livre e intergranular, com grande número de poços tubulares instalados, caso os poços não tenham sido construídos de forma adequada, eles podem se comportar como vetores diretos de infiltração de contaminantes.

Os principais elementos químicos utilizados na fertilização dos solos são os popularmente chamados NPK, composto por nitrogênio, fósforo e potássio. Os compostos de potássio e fósforo são retidos pelo solo e não são esperados na composição da água.

No entanto, inúmeros autores relatam a influência de compostos nitrogenados na qualidade das águas subterrâneas (Hirata *et al.*1993; Luiz *et al.* 2004). Jadoski *et al.* (2010) advertem para o risco da lixiviação de nitrato devido à prática intensiva da fertilização nitrogenada associada com irrigação abundante.

Para a avaliação de possíveis contaminações por fertilizantes da série nitrogenada foram analisadas 20 amostras, coletadas apropriadamente em poços tubulares, veredas e piscinões existentes. As amostras foram obtidas com o auxílio de um *bailer* e armazenadas em frascos de 100 ml fornecidos pela empresa Campo Análises, com sede no município de Pararatu/MG, onde foram realizadas as análises de laboratório (em período inferior a 48h da amostragem). Para conservação das propriedades da água, as amostras foram mantidas refrigeradas desde a coleta até a análise.

As propriedades físico-químicas temperatura (T), total de sólidos dissolvidos (TDS), condutividade elétrica (CE), oxigênio dissolvido (OD) e pH foram obtidas através de análise *in situ* com o auxílio da sonda multiparâmetro YSI *Professional Plus* e sonda HQ 40d da *Hach Instruments* (Figura 1.6).



Figura 1.6. Sonda multiparâmetro YSI *Professional Plus* e sonda HQ 40d da *Hach Instruments*, utilizadas para coleta dos parâmetros (pH, temperatura, total de sólidos dissolvidos (TDS), condutividade elétrica (CE) e oxigênio dissolvido (OD)).

1.5.3 Tratamento e Integração de Dados

Esta etapa é destinada a abordagem sistemática, interpretação e integração dos dados obtidos nas campanhas de campo e nos processos de outorga protocolados pelos usuários junto ao órgão ambiental (SUPRAM-NOR), relacionando os dados primários com os dados secundários.

O conjunto de informações adquiridas foram processadas e interpretadas de modo a obter os parâmetros hidrodinâmicos necessários para a caracterização e delimitação da área efetiva do Aquífero Batalha, bem como as estimativas de reservas hídricas do mesmo.

Determinação dos Parâmetros Hidrodinâmicos

Para a zona não saturada foram realizados os cálculos de acordo com a metodologia dos ensaios de infiltração do tipo *open end hole* e anéis concêntricos, os quais forneceram os valores

de condutividade hidráulica vertical do solo (K_v) de acordo com as equações 1 e 2.

Os parâmetros hidrodinâmicos da zona saturada foram obtidos pela análise dos dados de 230 poços outorgados pela SUPRAM/NOR, onde se obteve as informações de vazão média (Q) e profundidade média dos níveis estático (NE) e dinâmico (ND), além de perfis construtivos e testes de bombeamento. Os demais parâmetros foram adquiridos mediante processamento de 20 testes de bombeamento de poços representativos e especializados ao longo do Aquífero Batalha. Os dados dos testes de bombeamento foram tradados no software *Aquifer Test Pro*, da *Waterloo Hydrogeologic Inc*, utilizando o método de Neuman (1975), onde se obtiveram os parâmetros hidrodinâmicos e dimensionais do aquífero como a transmissividade (T), coeficiente de armazenamento (S) e a condutividade hidráulica da zona saturada (K). Para a utilização desse software foi utilizada uma licença temporária fornecida pela *Waterloo Hydrogeologic Inc*.

O *Aquifer Test* permite a determinação dos parâmetros hidrodinâmicos do aquífero por meio de dados de rebaixamento do nível da água, medidos por poços de observação. Como os testes de bombeamento utilizados para determinar os parâmetros hidrodinâmicos consistem em testes com leitura do próprio poço bombeado, foram criados poços de observação virtuais através do *software*. Os poços de observação virtuais foram criados a uma distância de 1 metro do poço bombeado.

Estimativas de Reservas Hídricas

Com um elevado número de poços tubulares bombeando grandes vazões durante grande parte do ano, é de suma importância conhecer as reservas hídricas do Aquífero Batalha. Os valores das reservas hídricas obtidos poderão guiar os gestores responsáveis na forma de gerir as atividades na região, de modo a proporcionar o uso sustentável dos recursos hídricos provenientes do Aquífero Batalha.

Segundo Costa (2000) existem diferentes tipos de reservas hídricas subterrâneas, as reservas renováveis ou reguladoras, reservas permanentes ou seculares e as reservas explotáveis. Para o cálculo das reservas será aplicada a proposta de Costa (1998) que considera que as disponibilidades hídricas de um aquífero equivalem às reservas renováveis mais um percentual das reservas permanentes.

As reservas permanentes e renováveis serão obtidas por cálculos a partir de valores de parâmetros obtidos na caracterização do aquífero em associação com analogia a sistemas similares.

Para o bom entendimento da quantificação apresentada é importante que se conheça os conceitos das diferentes modalidades de reservas de água subterrânea aplicadas para aquíferos livres que efetivamente podem ser explotadas sem prejuízo para o sistema aquífero.

As reservas renováveis (reservas reguladoras) representam os volumes de água com tempo de circulação restrito (geralmente equivalente a um ciclo hidrológico = 12 meses) que alimentam o sistema aquífero a partir das áreas de recarga. Para aquíferos livres este volume é geralmente

importante, sendo estimado com base na parcela de infiltração que a cada ano alcança efetivamente a zona saturada regional, e, portanto, é obtido com base no balanço hídrico climatológico local ou pelo método da flutuação do nível freático (ou o inglês WTF - *Water Table Fluctuation*). As reservas permanentes (reservas de saturação ou reservas seculares) correspondem ao volume de água que ocupa os espaços livres abaixo no nível mínimo da zona não saturada do aquífero. Para os aquíferos intergranulares livres é equivalente a todo o volume de água que preenche a porosidade efetiva abaixo do nível de saturação mínimo, até a base do aquífero. Para o estabelecimento da reserva, permanente ou secular, foi utilizada a equação proposta por Costa 1998 (Equação 8) para aquíferos intergranulares livres:

Equação 8. Equação para obtenção da reserva permanente.

$$Rp = A * b * \eta e$$

Onde:

Rp = reserva permanente (m³)

A = área de contribuição para os cones de depressão

b = espessura saturada do aquífero

ηe = porosidade efetiva

Segundo Costa (1998) as reservas exploráveis correspondem ao volume que pode ser retirado anualmente de determinada área do sistema aquífero, sem acarretar risco de sobreexploração do sistema, estando dentro de um conceito de vazão de segurança (*safety yield*), e visa garantir a gestão racional do aquífero. Existem diferentes interpretações com relação às estimativas das disponibilidades, sendo que alguns gestores consideram que a reserva explorável pode ser menor, igual ou maior que a reserva renovável. Neste trabalho as reservas exploráveis são consideradas como a soma das reservas reguladoras mais uma porcentagem das reservas permanentes. A porcentagem da reserva permanente é função de uma série de parâmetros, como o tipo e características do aquífero, fácies geológicas que definem o aquífero, condições de circulação e variáveis de decisão do ponto de vista de custos e benefícios (aspectos sociais e econômicos), além de outros fatores. As reservas exploráveis ou disponibilidades são determinadas através da Equação 9. Equação para obtenção da reserva explorável:

Equação 9. Equação para obtenção da reserva explorável:

$$Re = Rr + \%Rp$$

Onde:

Re = reserva explorável

Rr = reserva renovável

$\%Rp$ = percentual da reserva permanente por na

Já as reservas renováveis são obtidas a partir de dados de variações de níveis em contexto climatológico, pedológico e geomorfológico similar. Esta estimativa pode ser obtida pela Equação 10:

Equação 10. Equação de obtenção da reserva renovável:

$$Rr = A * \eta e * \Delta h$$

Onde:

Rr = reservas renováveis (m³/ano)

A = área de contribuição para o cone de depressão (área do aquífero)

ηe = porosidade efetiva

Δh = variação anual do nível freático (m)

Para a qualificação das variações de profundidades dos níveis freáticos foram utilizados dados do trabalho de Lousada & Campos (2006) que trabalharam na bacia do rio Jardim (afluente do rio Preto, que é tributário do rio Paracatu). Esta bacia apresenta feições fisiográficas muito similares à área em estudo, incluídos geologia (rochas pelíticas e psamíticas), pedologia (latossolos e gleissolos), geomorfologia (mesmo tipo de modelado de relevo) e clima (domínio do cerrado do Brasil Central).

Capítulo 2

CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA

2.1. Aspectos Climáticos

Segundo Santos & Ribeiro (2004), a região de estudo encaixa-se no grupo C (climas mesotérmicos) da classificação macroclimática de Köppen, com variedade Aw, o que implica em invernos secos e temperatura do ar do mês mais quente superior a 22°C. Caracteristicamente, esta classe climática é marcada por duas estações bem definidas, sendo uma chuvosa (outubro a abril) e outra seca (maio - setembro).

A Figura 2.1 a seguir ilustra alguns dos principais parâmetros da Normal Climatológica Brasileira (NCB), referentes à estação meteorológica 83539 (Patrocínio). Vale destacar que, geograficamente, esta estação se encontra a 75 km de Coromandel, já nos limites municipais de Patrocínio - MG (altitude de 972 m), mas, do ponto de vista climatológico, encontra-se inserida no mesmo contexto aqui em discussão (Santos & Ribeiro, 2004).

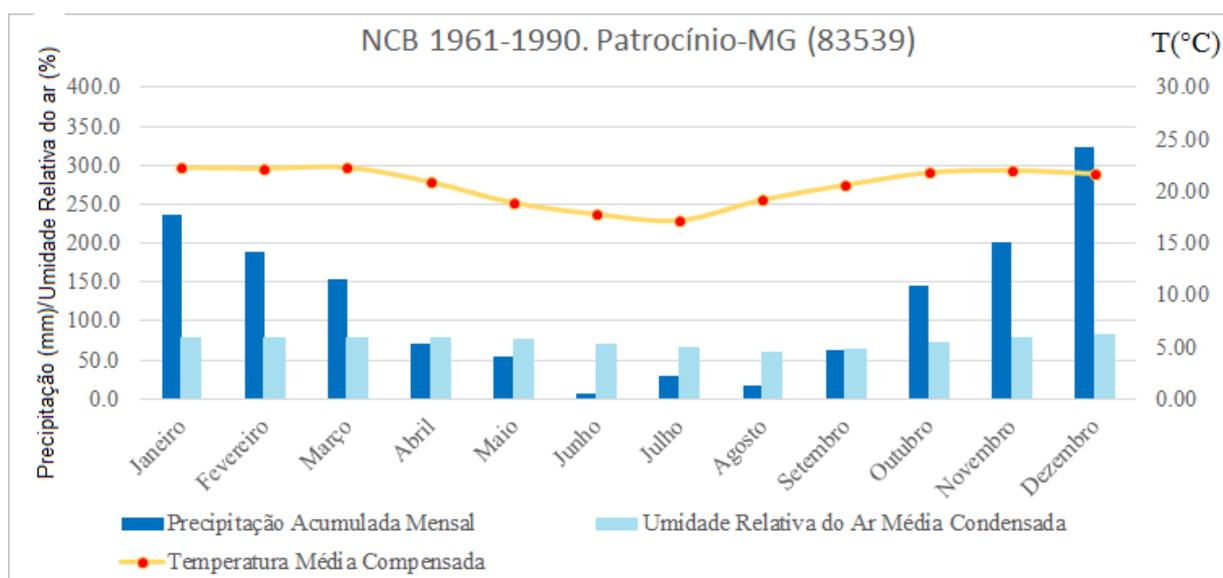


Figura 2.1. Normal Climatológica Brasileira (NCB) para o Município de Patrocínio-MG, segundo dados obtidos junto ao INMET (Instituto Nacional de Meteorologia). Estação climatológica 83539. Fonte: INMET.

Como é apresentado, a precipitação anual média acumulada para o período avaliado foi de 1.488 mm, onde o mês de dezembro apresentou o maior índice pluviométrico médio (322,8 mm) e o mês de junho o menor (6,8 mm). A amplitude térmica anual foi de 5,1 °C, com janeiro, fevereiro e março os meses mais quentes (22,3 °C) e o mês de julho o mais frio (17,2 °C). Em média, a temperatura anual foi de 20,6 °C. Quanto à umidade relativa do ar, nota-se que foi constante ao longo do ano, atingindo valores médios de 73,4%.

Segundo Campos & Gonçalves (2015), a sazonalidade climática gera impacto significativo

na disponibilidade hídrica de uma região. Além disso, a avaliação quantitativa de excedentes e déficits de água no solo é fundamental para a elaboração de um balanço hídrico para dada região. Santos & Ribeiro (2004).

Na área de estudo se encontra uma estação automática do INMET (Estação Guarda-Mor), no entanto até o momento da elaboração desta dissertação, ela apresenta dados consistentes apenas entre o período de 2012 a 2016, os quais são apresentados na Figura 2.2 as quais apresentam padrões similares de distribuição de temperatura e precipitação da NCB da estação Patrocínio.

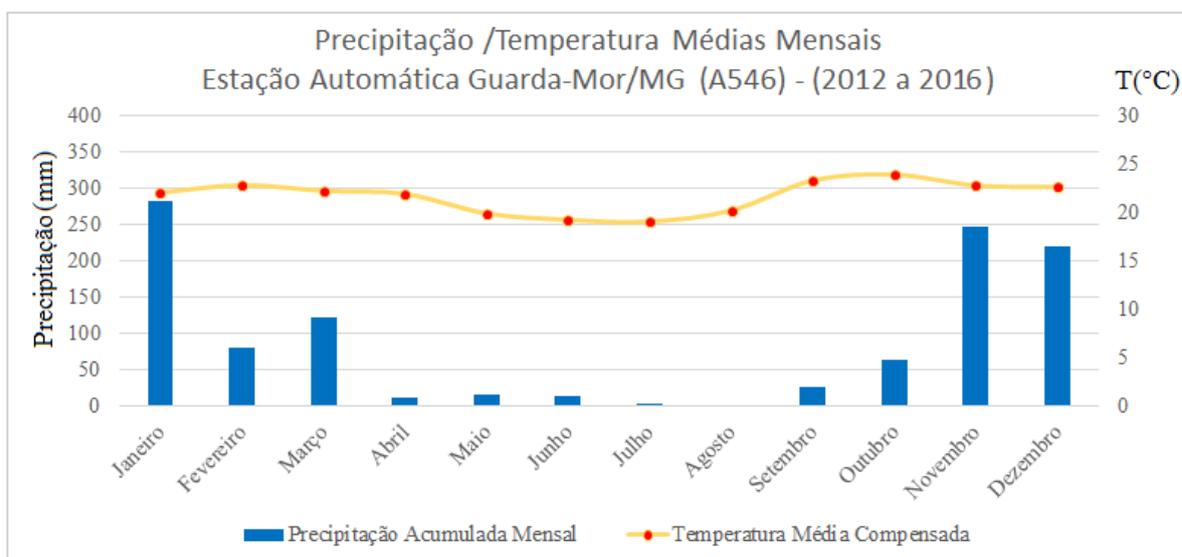


Figura 2.2. Dados de precipitação e temperatura média mensal entre os anos de 2012 e 2016 da estação climatológica automática Guarda-Mor.

Fonte: INMET.

O padrão de distribuição temporal das chuvas influencia significativamente na manutenção e elevação dos níveis freáticos ao longo do ano. De modo geral, os níveis freáticos atingem valores máximos no final do período chuvoso e valores mínimos no início do período de regularização das chuvas, salvo em anos atípicos (Campos & Gonçalves 2015).

O volume de precipitação acumulada anual é outra variável a ser considerada devido a sua grande variação, como exposto na Figura 2.3, onde no ano de 2013 a precipitação acumulada total foi acima de 1800 mm e já em 2015 foi abaixo de 600 mm, sendo esses dois anos anos considerados anômalos. Esse fator gera grande influência no volume de recarga do aquífero e por isso recomenda-se a realização anual das estimativas de reservas hídricas subterrâneas com base nos dados de precipitação do ano anterior.

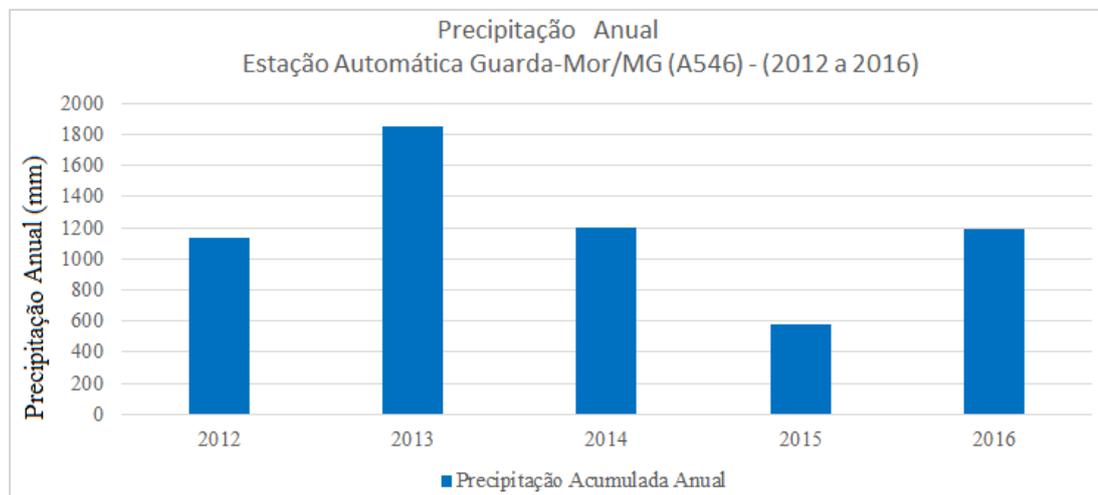


Figura 2.3. Dados de precipitação acumulada total entre os anos de 2012 e 2016 da estação climatológica automática Guarda-Mor.

Fonte: INMET

2.2. Hidrologia

O Aquífero Batalha se encontra posicionado em um importante divisor de águas que contribui com as vazões dos rios Paraná, a oeste e, São Francisco a leste (Figura 2.4).

A bacia hidrográfica do rio Paraná estende-se pelos estados de Minas Gerais, Goiás, São Paulo, Paraná, Mato Grosso do Sul, Santa Catarina, além de ocupar áreas em outros países, como Paraguai, Uruguai, Argentina e Bolívia, abrangendo uma área de mais de 1.600.00 km² (Azevedo 1968). Um de seus principais afluentes é o rio Paranaíba, o qual possui como tributário o rio São Marcos que por sua vez recebe vazões dos Ribeirões Batalha e Teixeira, e demais cursos d'água que nascem na área de abrangência do Aquífero Batalha.

A bacia hidrográfica do rio São Francisco drena os estados de Minas Gerais, Bahia, Goiás, Bahia, Pernambuco, Sergipe e Alagoas. O rio Paracatu é um de seus principais afluentes, o qual possui tributários que se originam em parte da área de abrangência do Aquífero Batalha.

A considerável vazão específica dos cursos d'água superficiais, sua perenidade e regularidade, comprovam o elevado potencial hídrico da região de estudo. Fato também evidenciado pelas diversas quedas d'água presentes, que aquecem o turismo local, principalmente no extremo norte da área, no famoso Circuito de Cachoeiras do Prata (

Figura 2.5).

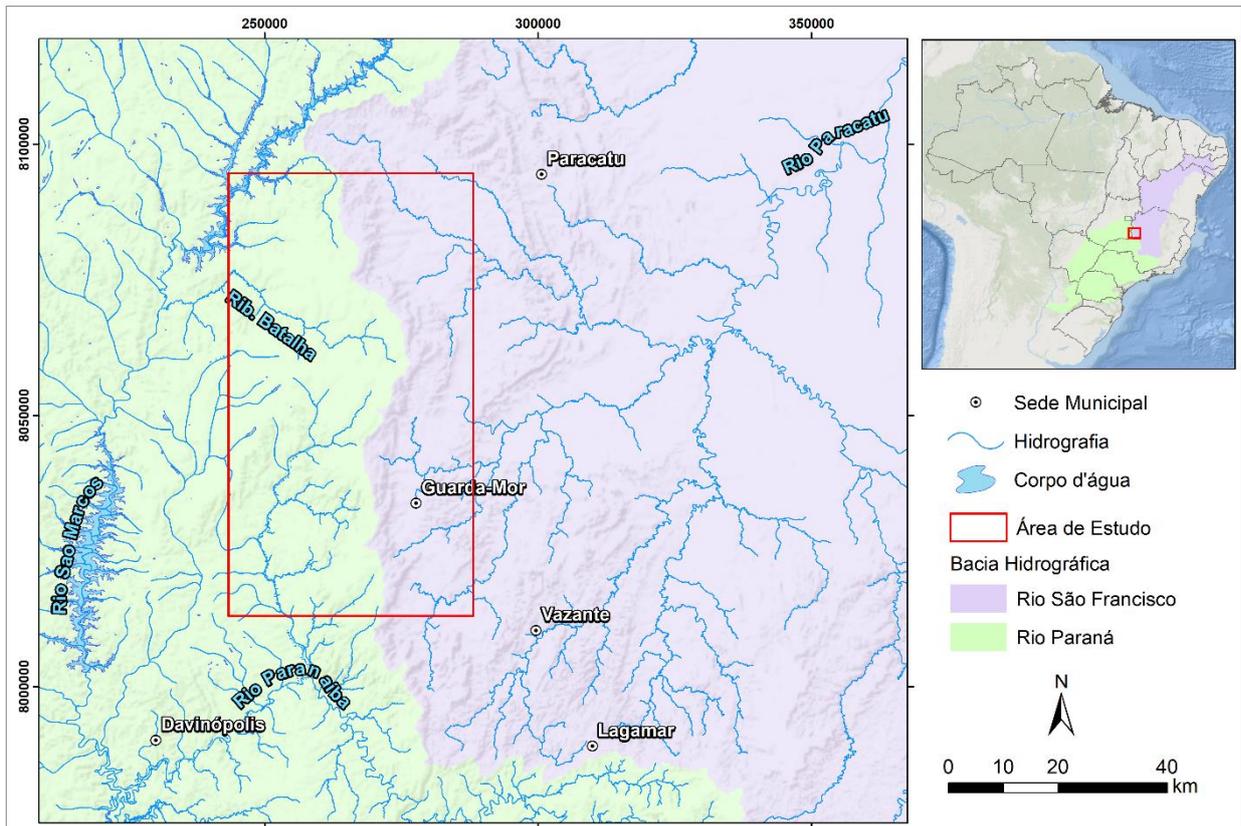


Figura 2.4. Hidrografia da área de estudo. Localizada entre as Bacias hidrográficas dos rios Paraná e São Francisco.

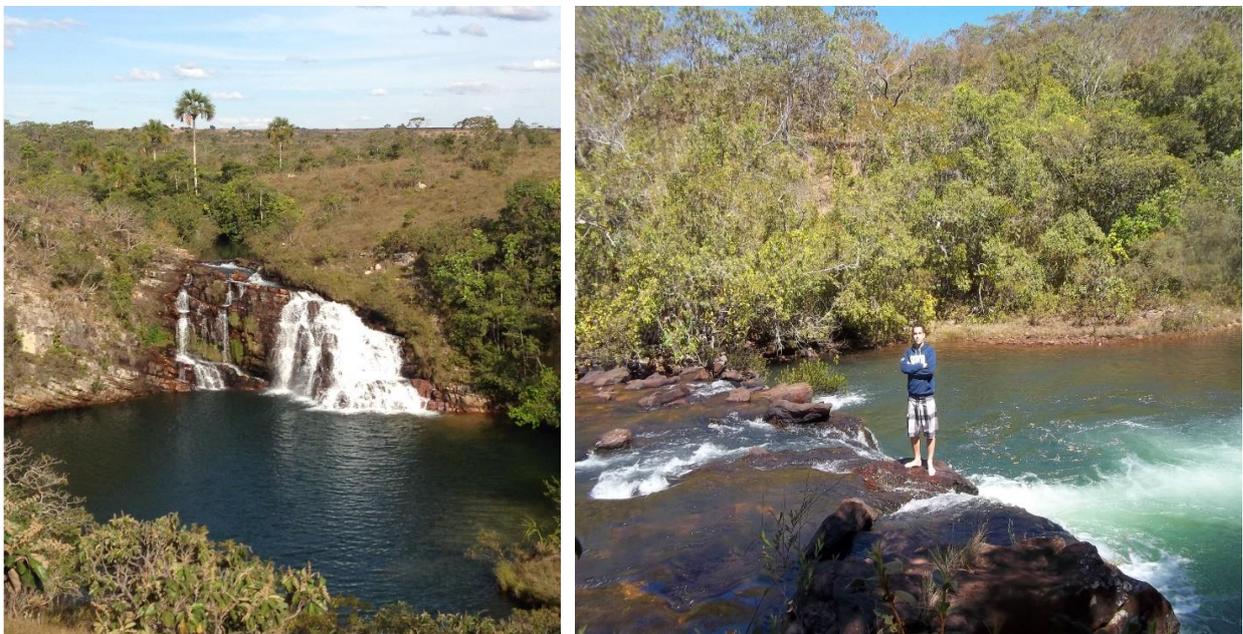


Figura 2.5. A esquerda a cachoeira do Teixeira, localizada no ribeirão dos Teixeiras, tributário do rio São Marcos. A direita queda d'água no ribeirão Batalha, também afluente do rio São Marcos.

2.3. Geologia Regional

2.3.1. Grupo Canastra

As primeiras referências ao Grupo Canastra são atribuídas a Barbosa (1955) e Barbosa *et al.* (1970). Consiste essencialmente de filitos, calcifilitos, mármore e quartzitos metamorfizados em fácies xisto verde (Figura 2.6). A litoestratigrafia do Grupo Canastra não é bem conhecida, tendo sido estabelecida por Campos Neto (1984) e posteriormente descrita em maiores detalhes por Pereira (1992) e Pereira *et al.* (1992). Dardenne (2000) dividiu o Grupo Canastra no noroeste de Minas Gerais, da base para o topo, nas seguintes unidades: Formação Serra do Landim, Formação Paracatu, Formação Serra da Urucânia e Formação Serra da Batalha. Descrições detalhadas referentes a essas unidades foram feitas por Freitas-Silva & Dardenne (1994).

O Grupo Canastra corresponde a uma importante unidade litoestratigráfica que aflora, continuamente, por mais de 650 quilômetros desde o sudoeste de Minas Gerais, no extremo sul da Faixa Brasília, até a região sudeste do estado de Goiás e sul do Distrito Federal, na porção centro norte desta faixa.

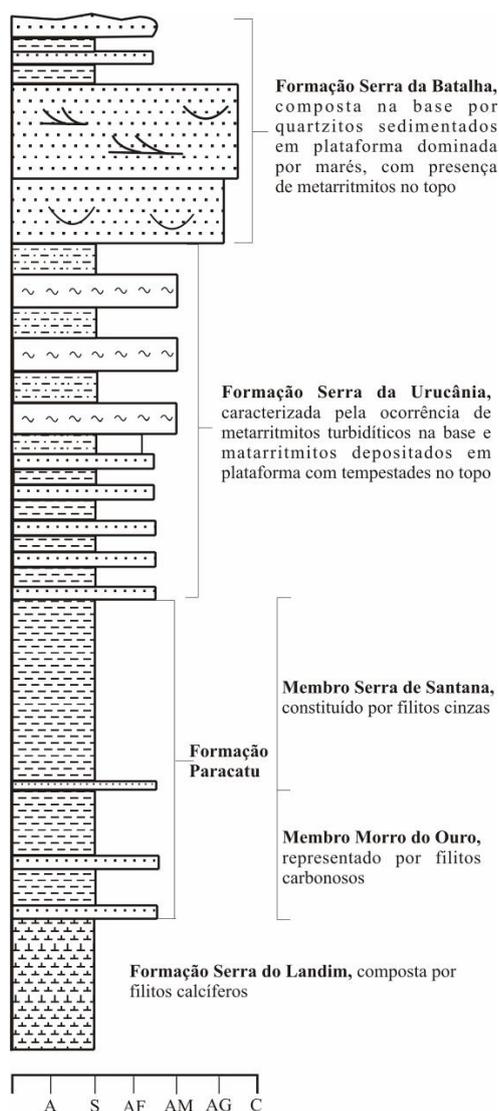


Figura 2.6. Coluna estratigráfica do Grupo Canastra (Modificada de Rodrigues 2008 e Dardenne 2000).

Formação Serra do Landim

A Formação Serra do Landim apresenta uma espessura em torno de 250 a 300 metros, sendo constituída por calcita-dolomita-clorita-sericita filito, em geral apresentando-se ritmicamente bandado, onde níveis milimétricos a centimétricos, ocasionalmente decimétricos, de coloração verde escura alternam-se com níveis de tonalidade verde clara (Madalosso & Valle 1978, Madalosso 1979 e 1980, Rigobello *et al.*, 1988).

No topo da unidade são frequentes intercalações lenticulares métricas de quartzitos finos e brancos, geralmente puros e, ocasionalmente, níveis contínuos de espessuras centimétricas. O topo desta formação é quase sempre marcado por um nível de espessura métrica (1 a 5 m) de quartzo-sericita-clorita filito de coloração cinza claro a escuro, rico em material carbonoso. O quartzo, neste nível, ocorre na forma de grânulos bem arredondados, conferindo à rocha uma textura áspera, enquanto o carbonato ocorre apenas como um mineral acessório. Zini *et al.* (1988) denominaram este horizonte de Nível de Transição (T) entre a Formação Serra do Landim e a Formação Paracatu, fato também registrado por Freitas-Silva (1991) e Freitas-Silva & Dardenne (1992).

Formação Paracatu

A denominação Formação Paracatu foi proposta por Almeida (1967), ao sugerir denominar os filitos, com intercalações de quartzitos e ocasionalmente mármore, que ocorrem nas imediações de Paracatu e estendendo-se até a região do Distrito Federal. Embora informal, esta denominação consagrou-se na literatura. Os trabalhos desenvolvidos na região do oeste mineiro permitiram caracterizar a Formação Paracatu em dois membros: o membro basal, composto predominantemente por filitos carbonosos foi denominado de Membro Morro do Ouro, que passa gradacionalmente para o membro superior, composto por sericita-clorita-quartzo filitos e denominado de Membro Serra de Santana (Zini *et al.* 1988; Freitas-Silva & Dardenne 1992, Freitas-Silva 1996).

Membro Morro do Ouro

O Membro Morro do Ouro, com espessura estimada entre 250 e 350 metros, é composto por quartzo-sericita-clorita-filito carbonoso. Na realidade, o litotipo característico da unidade é um metarritmito, onde bandas de espessura submilimétricas a milimétricas, ocasionalmente centimétricas, de cor branca e compostas por quartzito alternam-se com bandas de coloração cinza escuro a negra, compostas essencialmente por sericita e material carbonoso. O teor em material carbonoso situa-se, em geral, entre 0,35 e 0,50%, podendo, localmente, atingir mais de 1% (Freitas-Silva, 1996).

Por todo o Membro Morro do Ouro são relativamente comuns lentes e níveis centimétricos a métricos de ortoquartzitos brancos, em geral maciços e de granulometria variável, predominando

aqueles de grãos médios. Destaca-se, por sua persistência regional, um nível de quartzito que ocorre próximo da base da unidade, apresentando uma espessura variável entre 2 a 10 metros, situando-se mais ou menos a 5 metros acima do contato com a Formação Serra do Landim. Este nível constitui um horizonte guia regional.

Membro Serra de Santana

Esta unidade é composta por uma monótona sucessão de quartzo-sericita-clorita-filitos. Sua base é marcada por um ortoquartzito de coloração branca e de granulometria areia fina, cuja espessura geralmente não ultrapassa 5 metros. São comuns ao longo da unidade intercalações de filitos carbonosos, notadamente próximos do seu contato basal com o Membro Morro do Ouro. Intercalações de quartzitos finos e metassiltitos são relativamente frequentes na porção basal do Membro Serra da Anta, enquanto que a porção intermediária é amplamente dominada por filitos. Próximo ao topo, os filitos tornam-se gradativamente mais quartzosos, sendo, nesta porção, comumente encontradas intercalações centimétricas a métricas de quartzitos.

O filito característico desta unidade apresenta uma coloração homogênea, verde escura a cinza prateado em rocha fresca. A mineralogia é composta por sericita, quartzo e clorita. O feldspato, ao longo de toda a seção desta unidade, não ultrapassa 5% e apresentam-se alterados para sericita e carbonato. Como acessórios comuns ocorrem turmalina, zircão, rutilo e opacos (magnetita/hematita, ilmenita e pirita). Na sua porção inferior e intermediária, a proporção de quartzo não ultrapassa 20%, enquanto que no topo a proporção deste mineral pode atingir mais de 50%. Na porção superior, as intercalações de quartzitos micáceos (5 a 20% de filossilicatos) e ortoquartzitos (filossilicatos \leq 5%) tornam-se frequentes, marcando o contato gradacional para a unidade sobreposta.

A espessura dessa unidade é difícil de ser avaliada em função do espessamento provocado por repetições tectônicas intraestratais, sendo estimada entre 900 e 1500 metros.

Formação Serra da Urucânia

A Formação Serra da Urucânia é constituída por intercalações decimétricas a decamétricas de quartzo-sericita-clorita filitos e quartzitos variados. Esse membro caracteriza-se por uma variação faciológica vertical e lateral bastante pronunciada, mostrando em diferentes seções a predominância ora de filitos ora de quartzitos, ou compondo um verdadeiro metarritmito. De uma maneira geral, os quartzitos tornam-se mais importantes e puros em direção ao topo.

Os filitos que compõem esta unidade apresentam a mesma composição mineralógica e aspectos texturais daqueles observados no Membro Serra da Anta sotoposto. Por sua vez, os quartzitos mostram uma variação mais acentuada, com predominância na base de quartzitos laminados e micáceos de coloração branca e granulometria fina a média. No topo, ortoquartzitos,

geralmente de granulometria média a grossa (em estratos decimétricos a métricos maciços) tornam-se mais abundantes.

A espessura inferida para esta unidade é da ordem de 700 a 1500 metros. Na região de Paracatu, a unidade apresenta uma espessura máxima em torno de 1500 metros (Freitas-Silva & Dardenne 1993). Na região de Guarda Mor, Pereira (1992) estimou uma espessura entre 800 e 1300 metros. Campos Neto (1984) determinou na região de Vazante/Lagamar, para esse membro, o qual denominou informalmente Unidade Quartzítica Inferior, uma espessura da ordem de 1000 metros.

O contato com a unidade superior, Formação Serra da Batalha, é gradacional, sendo marcado pelo aumento progressivo de quartzitos.

Formação Serra da Batalha

Os litotipos que constituem esta unidade são composicional e texturalmente idênticos àqueles presentes na formação sotoposta. Entretanto, ocorre um predomínio de quartzitos nessa unidade. A base foi marcada no primeiro grande nível de ortoquartzitos que aflora na cachoeira do Ribeirão Batalha, na serra que dá nome para esta unidade.

A unidade é composta por intercalações de quartzitos estratificados, em estratos internamente laminados de espessura centimétrica a métrica, alternados com quartzitos finamente estratificados e laminados, intercalados com filitos. As estruturas primárias observadas no Formação Serra da Batalha são semelhantes às descritas na Formação Serra da Urucânia, entretanto, predominam estratificações cruzadas bidirecionais.

Na área tipo, este membro apresenta atitude sub-horizontal, o que permite estabelecer uma espessura aproximada de em torno de 250 a 500 metros.

2.4. Geologia Local

Na região de abrangência do Aquífero Batalha são raras as exposições rochosas, as quais se restringem a locais de elevada declividade em cortes de estradas, cursos d'água e cachoeiras. Os perfis de poços tubulares presentes nos processos de outorgas possuem dados pouco consistentes, o que não foi determinante para o conhecimento do contexto geológico local e semiregional.

Em todos os perfis levantados são observados níveis quartzíticos sobrepostos por filitos sericíticos ou cloríticos, comumente alterados, com coloração rosada a avermelhada. Desta forma, esta sucessão é considerada como aquela representativa da área de abrangência do Aquífero Batalha e correspondente à Formação Serra da Batalha.

Na base são observados quartzitos médios a finos, puros (Figura 2.7) ou micáceos e expostos com diferentes graus de litificação (desde muito litificados a até friáveis), comumente

estratificados em camadas decimétricas internamente laminados (Figura 2.8). A quantidade de mica branca é variável, sendo que este mineral sempre marca a foliação paralela ao acamamento sedimentar. Estratificações truncadas são observadas. Contudo, não é possível maior detalhamento em função do metamorfismo. Sobre a sucessão de quartzitos ocorrem filitos ricos em sericita ou clorita, os quais em função do intemperismo não afloram em grandes exposições, mas em apenas afloramentos pequenos e muito alterados (Figura 2.9).



Figura 2.7. Aspecto geral do quartzito da Formação Serra da Batalha, com aspecto maciço, bastante silicificado responsável pela sustentação do relevo elevado na região de estudo.



Figura 2.8. Detalhe do quartzito da Formação Serra da Batalha mostrando aspecto laminado/foliado em que a foliação de baixo ângulo é paralela ao acamamento sedimentar.

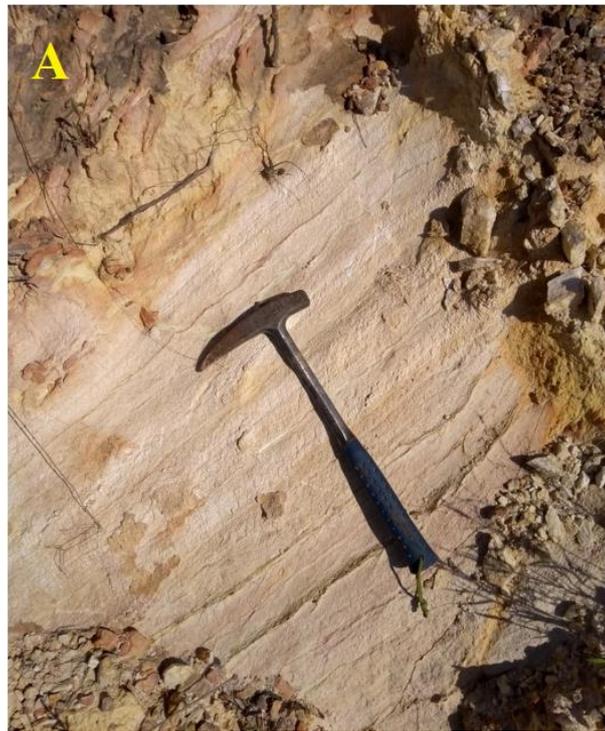


Figura 2.9. A) Afloramentos de filito alterado da Formação Serra da Batalha B) Detalhe de exposição mostrando foliação proeminente crenulada. Este tipo petrográfico ocorre estratigraficamente sobre os quartzitos.

O contexto geológico observado em diferentes seções é fundamental para o entendimento da hidrogeologia, pois é sobre este contexto de alteração de rochas que o Aquífero Batalha se encontra representado.

A Figura 2.10 mostra o mapa geológico compilado do Serviço Geológico do Brasil (CPRM), incluindo as unidades expostas ao longo da rede de drenagem e as coberturas detrítico-lateríticas que, na prática, compõem os aquíferos em estudo no presente projeto.

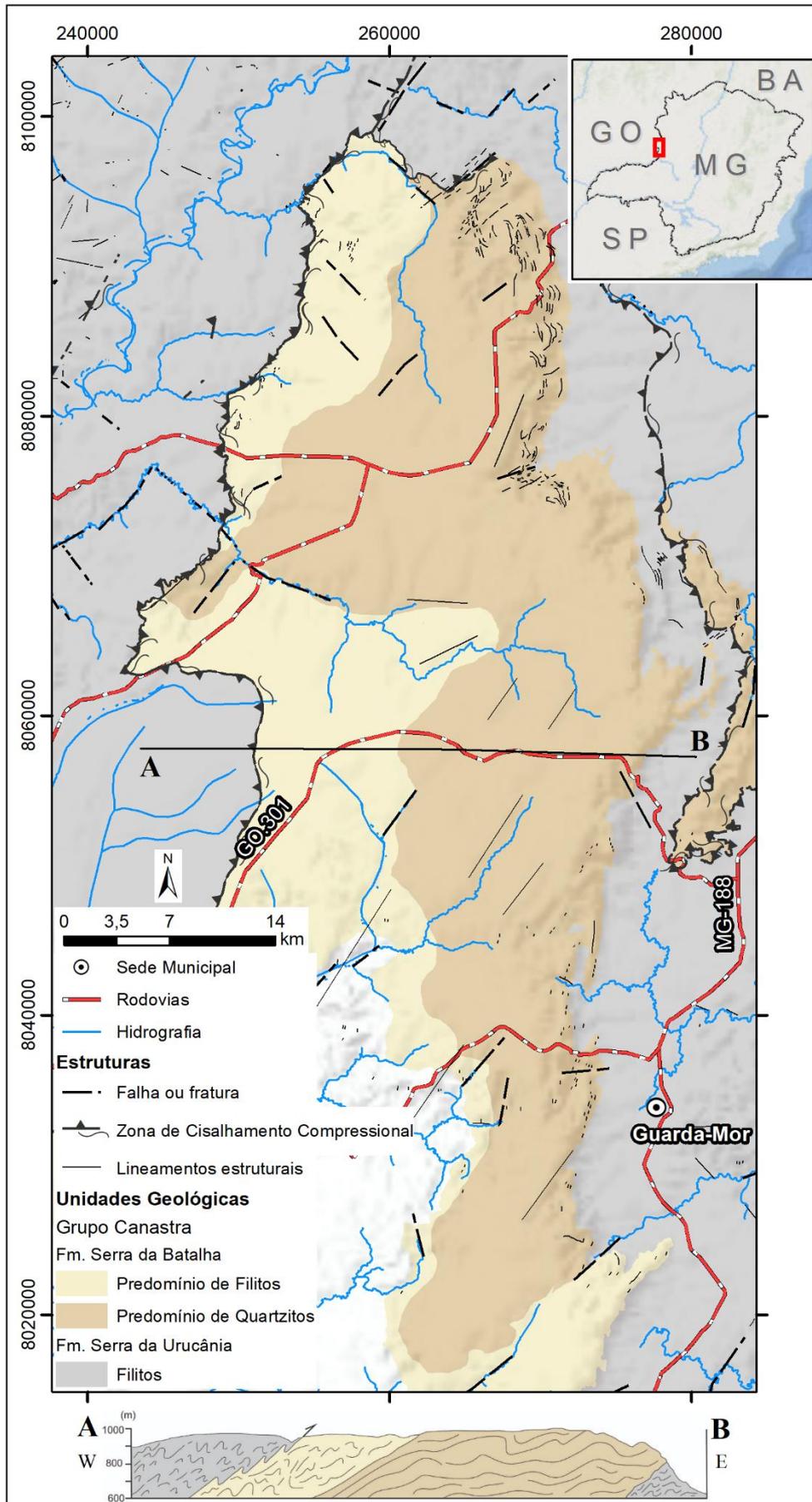


Figura 2.10. Mapa Geológico da área de estudo. (Modificado das Folhas Geológicas 1:100.000 Serra da Tiririca e Guarda-Mor).

2.5. Geomorfologia

Estudos geomorfológicos são de suma importância para o entendimento dos processos físicos atuantes em uma determinada região, tais como pedogênese e erosão, os quais, por sua vez, refletem na infiltração das águas que alimentam as reservas de água subterrâneas. Nesse sentido, e com o intuito de entender melhor os processos de recarga dos aquíferos presentes na área desse estudo, foi realizada uma análise geomorfológica da região. Onde a geologia e o clima são os principais condicionantes das variações da topografia do terreno, declividade e padrões de drenagens.

De acordo com a 2ª edição do Manual Técnico de Geomorfologia elaborado em 2009 pelo IBGE, o Aquífero Batalha se encontra posicionando sobre a unidade geomorfológica Chapadas de Paracatu, sendo uma das unidades representativas da região geomorfológica Chapadões Divisores São Francisco-Paranaíba (Figura 2.10). Essa unidade se encontra sustentada pelas rochas quartzíticas da Formação Serra da Batalha, onde o padrão de relevo varia de plano a suave ondulado com declividades menores que 8° entre as cotas 930 e 1022 metros (Figura 2.12). Nessa unidade, predominam latossolos nas regiões planas e manchas de gleissolos ao longo das diversas veredas presentes, onde os processos pedogenéticos prevalecem sobre a erosão, o que favorece a infiltração e conseqüentemente recarga dos aquíferos. As condições de recarga, contendo solos espessos, bastante estruturados e em declividades menores que 8% (Figura 2.12) em que o escoamento superficial é preferencialmente do tipo laminar e apenas raramente se observa escoamento concentrado ao longo de vias de acesso e outras áreas com solos compactados.



Figura 2.11. Exemplo de paisagem associada à Unidade Geomorfológica Chapadas de Paracatu, com relevo local estritamente plano e coberto por latossolos espessos.

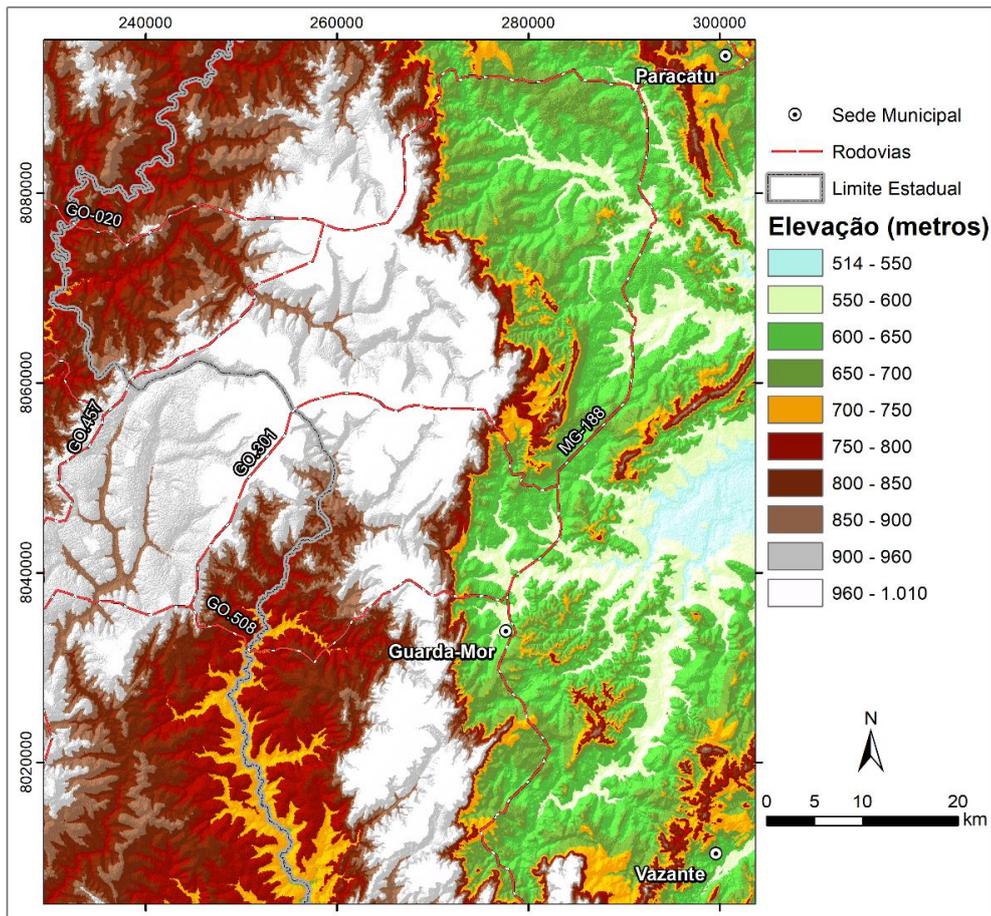


Figura 2.12. Modelo Digital de Elevação (MDE) ALOS Palsar da região de estudo.

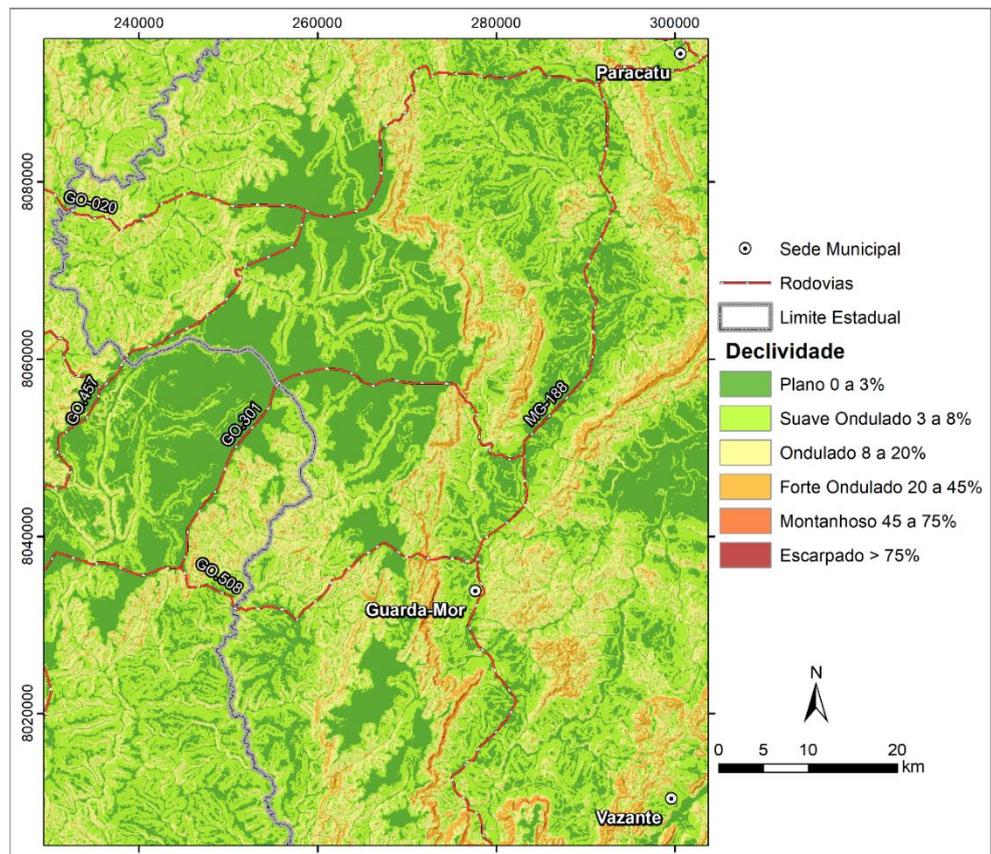


Figura 2.13. Distribuição da declividade na região de estudo.

Fonte: Mapa de Declividade em percentual de relevo 1:250.000 Folha SE 23 (CPRM).

2.6. Pedologia

Ao longo dos trabalhos de campo verificou-se a forte relação geomorfológica com os solos presentes na região, onde nas regiões da chapada, em relevo plano a suave ondulado, predominam Latossolo Vermelho-Amarelo, Latossolo Amarelo e algumas manchas de Latossolo Vermelho. Ao longo das cabeceiras de veredas ocorre o predomínio de Gleissolo Háptico. Já nas bordas da chapada, onde o relevo é declivoso, são encontradas associações entre Cambissolos Hápticos e Plintossolos Pétrico concrecionário.

Neste trabalho seguiu as terminologias, critérios e conceitos definidos no Sistema Brasileiro de Classificação de Solos (SiBCS), conforme Santos et al. (2013).

Latossolos - Latossolo Vermelho, Latossolo Vermelho-Amarelo e Latossolo Amarelo

São definidos como solos não hidromórficos, com horizonte A moderado e horizonte B latossólico (Bw), de textura argilosa ou média e ricos em óxidos. Estes solos são muito porosos, bastante permeáveis, acentuadamente a fortemente drenados, alíticos e fortemente ácidos.

Na área foram mapeados e classificados Latossolo Vermelho de textura argilosa, Latossolo Vermelho-Amarelo (Figura 2.14) e Latossolo Amarelo, este de textura argilosa a muito argilosa. Embora não tenham sido realizadas análises químicas, estes solos são considerados de caráter alítico em função da ampla presença de espécimes de volquízeas.

Quanto à estruturação, destaque deve ser feito a perfis de solos com pouco ou nenhum uso, sendo comum a ocorrência de estrutura granular no horizonte mais superficial. Em outros perfis, é recorrente a ausência de estrutura em função de processos de compactação. De forma geral, os horizontes subsequentes (AB e Bw) apresentam estrutura grumosa.

Estes solos ocorrem em relevos planos, sobre as rochas do Grupo Canastra, e estão associados às áreas interiores das chapadas, sendo representados pela pedogênese de materiais pelíticos oriundos da desagregação de filitos do topo da Formação Serra da Batalha.

A vegetação natural associada é geralmente de cerrado e cerradão e o relevo geralmente é plano a suave ondulado e apresenta grande continuidade lateral.



Figura 2.14. Porção superior de perfil de Latossolo Vermelho-Amarelo com textura argilosa. Notar a estruturação granular no horizonte A.

Gleissolo Háptico distrófico

São solos com deficiência de drenagem, de perfil profundo, geralmente ricos em matéria orgânica, comumente epi-eutrófico, presentes apenas em áreas junto às cabeceiras das veredas e em alguns casos ao longo do vale aberto das drenagens, com ocorrência de nascentes d'água.

Quando permanentemente saturados, estes solos apresentam apenas vegetação de gramíneas e arbustos especificamente adaptados. Quando a propriedade de hidromorfismo é atenuada, podem-se observar faixas estreitas ao longo das drenagens recobertas por vegetação arbustiva típicas de matas ciliares.

Em função da propriedade hidromórfica (sazonal ou permanentemente saturados), do elevado risco de inundação e da elevada plasticidade destes solos, suas faixas de ocorrência não devem ser ocupadas para qualquer finalidade. A melhor alternativa de uso destes terrenos é sua destinação como áreas de proteção ambiental, mesmo porque grande parte de sua faixa de distribuição já é parte integrante de áreas de preservação permanente.

Na área, estes solos foram mapeados em manchas próximas às cabeceiras de veredas e tais coberturas ocorrem preservadas ao longo dos vales e nos períodos secos podem estar ressecadas nas cabeceiras das drenagens (Figura 2.15).



Figura 2.15. Área de ocorrência de Gleissolo Háptico que sofre ressecamento em função do amplo período seco observado no ano de 2017. Ao longo dos vales abertos das veredas estes solos apresentam-se ainda com saturação permanente.

Cambissolo Háptico e Plintossolo Pétrico Concrecionário

A classe Cambissolo é constituída por solos minerais, não hidromórficos, com sequência de horizontes $A \rightarrow B_i \rightarrow C \rightarrow R$, em que os horizontes B são incipientes ou pouco desenvolvidos em termos pedogenéticos (presença de minerais primários facilmente intemperizáveis), além de pouco espessos.

O perfil tipo descrito na área apresenta horizontes A (20 cm) e Bi (35 cm) cascalhentos, em que os fragmentos são representados por fragmentos de quartzitos ou quartzo leitoso, característico de veios. O horizonte C, por sua vez, é representado por uma intercalação centimétrica entre quartzito e filito, com dominância do segundo (Figura 2.16). Entretanto, níveis expressivos de quartzito (com mais de 15 cm) ocorrem ao longo do perfil.

Estes solos são associados a relevos ondulados a fortemente ondulados, geralmente nas regiões de transição entre as áreas de chapada e as planícies. Ocorre em restritas áreas fora do perímetro de irrigação. A vegetação comumente observada sobre este tipo de cobertura é do tipo cerrado, campo-cerrado e campo limpo.

Associados aos cambissolos ocorrem lateralmente ou em cotas ligeiramente superiores perfis espessos de Plintossolos Pétricos concrecionários (em torno de 1,5 m). O horizonte plíntico ocupa inteiramente as exposições, sendo marcado por um nível cascalhento (fragmentos de quartzo de veio) quando da transição para o horizonte C (filito) (Figura 2.16).



Figura 2.16. **A** - Perfil de Plintossolo Pétrico concrecionário. **B** - Perfil de Cambissolo Háplico com forte pedregosidade e horizonte C a partir de 55 cm, além de contatos quebrados entre os horizontes.

Capítulo 3

CARACTERIZAÇÃO DO AQUÍFERO BATALHA

3.1 Considerações Iniciais

Segundo Freeze & Cherry (1979) um aquífero é definido como uma unidade geológica permeável que pode transmitir e armazenar quantidades significativas de água em gradientes hidráulicos comuns. Campos (2004) complementa que além da função armazenadora, os aquíferos apresentam a função filtro que torna as águas subterrâneas menos suscetíveis contaminação quando comparada aos recursos hídricos superficiais e a função reguladora, responsável pela manutenção da rede de cursos d'água superficiais.

O uso do termo sistema aquífero é comum na literatura hidrogeológica, tanto no meio científico quanto no meio técnico. Gaspar (2006) definiu os sistemas aquíferos como o conjunto de subtipos de aquíferos que ocorrem sobre uma mesma unidade geológica, de abrangência regional, com características hidrogeológicas distintas. Como exemplos do uso deste termo, pode ser citado um dos principais aquíferos localizados em território brasileiro, o Sistema Aquífero Guarani (Rebouças & Amore 2002), além de vários outros, como o Sistema Aquífero Urucuaia (Gaspar 2006), Sistema Aquífero Parecis (Silva 2013), Sistema Aquífero Bauru (Oliveira 2002), dentre outros.

No entanto, os dados levantados por este trabalho indicam que o aquífero estudado, apesar de sua ampla extensão e elevado potencial hídrico, trata de uma unidade homogênea em suas características hidráulicas e físicas, não sendo aplicado nesse contexto, o uso do termo sistema aquífero, e, portanto, sendo tratado como um reservatório individual já denominado de Aquífero Batalha.

Sua caracterização e delimitação foram possíveis a partir da análise integrada da geologia, pedologia e geomorfologia da região, com auxílio de levantamentos geofísico de eletrorresistividade e organização de um cadastro de poços tubulares existentes, obtido a partir do levantamento de dados de processos de licenciamento e emissão de outorga de direito de uso junto a SUPRAM/NOR. Nesse contexto, a área de abrangência do Aquífero Batalha se encontra delimitada na Figura 3.1, com 745 km² em área total, correspondente também a sua área de recarga. Esta área corresponde aos locais onde se justifica a exploração do aquífero e onde são encontradas as maiores espessuras saturadas e conseqüentemente as maiores vazões. Para o cálculo das reservas hídricas subterrâneas foi considerada essa área, embora se saiba que a área efetiva pode ser ampliada a partir de novos dados agregados ao cadastro de pontos d'água. Aparentemente, os poços existentes se encontram nas áreas em que a exploração do aquífero é mais vantajosa aos usuários.

Nos próximos tópicos são apresentados os dados que permitem a caracterização do Aquífero Batalha, onde essa caracterização se encontra organizada nos parâmetros obtidos da zona não saturada (solos correspondentes a área de recarga) e da zona saturada do Aquífero Batalha, além dos demais aspectos para a adequada caracterização do reservatório, e propostas de gestão.

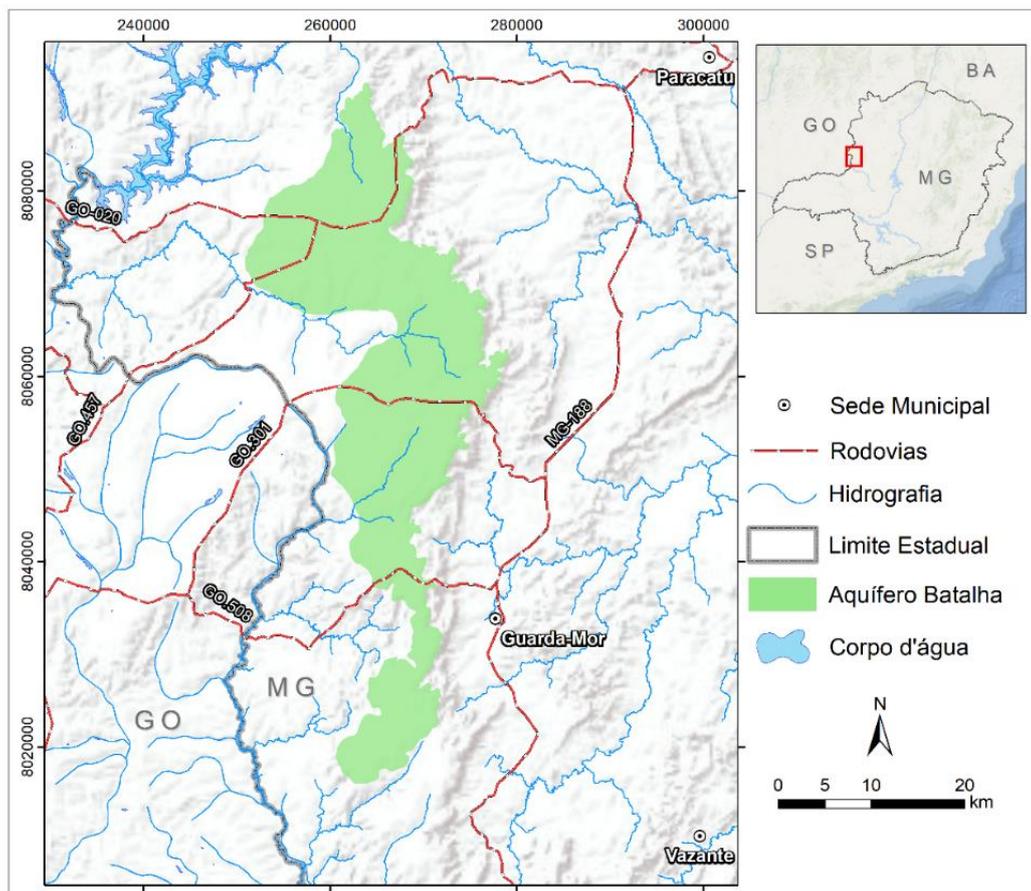


Figura 3.1. Área de abrangência do Aquífero Batalha, com contribuição para as bacias hidrográficas dos rios Paraná e São Francisco.

3.2 Cadastro dos Pontos D'água

No presente estudo foram utilizados dados de 220 poços tubulares para a caracterização dimensional e hidrodinâmica do Aquífero Batalha. Esses dados foram obtidos a partir da avaliação de processos de outorga disponíveis na plataforma do Sistema Integrado de Informação Ambiental - SIAM do estado de Minas Gerais, (<http://www.siam.mg.gov.br>). Alguns dados foram obtidos diretamente na SUPRAM-NOR localizada na sede do município de Unai/MG, por de solicitação de vista aos respectivos processos. No Apêndice IV se encontram os principais dados disponíveis nesses processos, incluindo nível estático (NE), nível dinâmico (ND), rebaixamento (sw), capacidade específica (Cp), profundidade dos poços (P), vazão outorgada (Q) e espessura saturada (b). A Tabela 3.1 apresenta a estatística dos dados, os quais são ilustrados graficamente na Figura 3.2.

Tabela 3.1. Dados estatísticos dos poços utilizados na caracterização e delimitação do Aquífero Batalha.

Fonte: SUPRAM-NOR.

Parâmetro	NE (m)	ND (m)	sw (m)	Cp (m ³ /h/m)	P (m)	Q (m ³ /h)	b (m)
Média	9,12	23,55	14,43	3,91	42,45	45,48	33,33
Máximo	18,00	47,00	41,85	39,23	62,00	90,00	55,87
Mínimo	1,00	6,00	1,60	0,56	25,50	3,50	13,60
Variância (s²)	11,34	25,50	34,01	11,30	101,32	299,84	121,21
Desvio Padrão (s)	3,37	5,06	5,84	3,37	10,08	17,34	11,03
Q1	6,50	20,69	9,59	2,13	34,00	32,40	24,70
Mediana	9,45	24,40	15,31	3,14	40,00	44,00	29,95
Q3	11,45	27,00	18,75	4,63	50,00	55,60	42,30
Q3-Q1	4,95	6,31	9,16	2,51	16,00	23,20	17,60
Moda	1,00	28,00	17,50	1,85	40,00	45,00	35,00

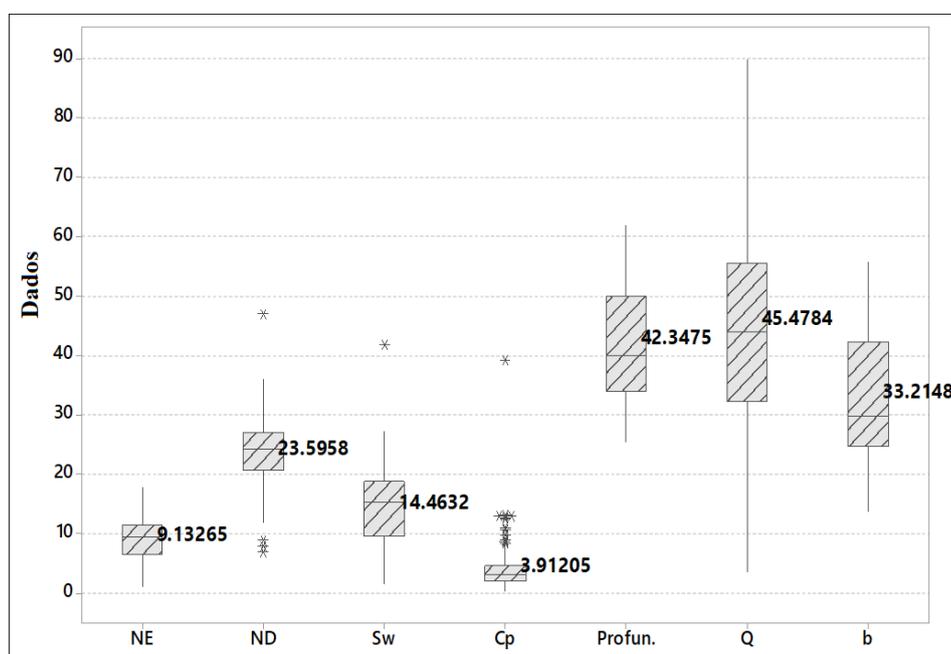


Figura 3.2. Gráficos de caixa para distribuição de dados do Nível Estático (NE), Nível Dinâmico (ND), Rebaixamento (sw), Capacidade Específica (Cp), Profundidade (Profun.), Vazão (Q) e Espessura Saturada (b). Os valores em negrito referem-se à média de cada parâmetro. Os valores em asterisco referem-se a outliers.

A organização dos dados dos poços cadastrados do Aquífero Batalha permitiu a análise do ponto de vista estatístico, onde a vazão média dos 219 poços tubulares analisados é de 45,48 m³/h, com moda de 45,0 m³/h, atingindo vazão máxima de 90 m³/h em um dos poços. As vazões consideradas baixas (< 10 m³/h) estão relacionadas ao tipo de bomba utilizada, sendo nesses casos bombas de baixa potência (1v) utilizadas apenas para abastecimento das sedes das propriedades. A soma das vazões obtidas corresponde a 9963,28 m³/h, ou seja, aproximadamente 10 milhões de litros de água por hora são potencialmente explorados dos poços tubulares cadastrados, os quais são autorizados a bombear durante 20 horas por dia ao longo de todo o ano. Esses poços apresentam profundidade média de 42,38 m, os quais podem ser considerados como poços

tubulares rasos, com profundidades variando entre 25,5 m até a máxima profundidade observada de 62 m.

Em alguns locais, o nível estático se aproxima da superfície, principalmente após o período de chuvas, sendo observada a abertura de trincheiras para a drenagem do solo, prática necessária nesses locais para o desenvolvimento da agricultura. Ao longo da área do Aquífero Batalha o nível estático (NE) se encontra em 9,1 m de profundidade em média, com moda de 1,0 m.

Os valores de rebaixamento (sw), ou seja, a diferença entre o nível estático (NE) e nível dinâmico (ND) apresentam grande variação, entre 1,6 m e 41,85 m, com uma média de rebaixamento de 14,43 m e moda de 17,50 m. A capacidade específica (Cs) média do aquífero corresponde a 3,91 m, com moda de 1,85 m. A espessura saturada (b), que corresponde a diferença entre o NE e a profundidade ocorre apresenta média de 33,33 m de espessura, atingindo, pontualmente, mais de 50 metros.

A diagramação gráfica entre os parâmetros vazão (Q) e espessura saturada (b) revela uma comportamento linear positiva, com ajuste da ordem de 39%, o que indica certa tendência de ocorrência das maiores vazões onde ocorre maior a espessura saturada, assim como esperado para este tipo de aquífero. No entanto, poços mal construídos ou com baixa eficiência hidráulica podem afetar essa correlação, como evidenciado nos dados dispersos.

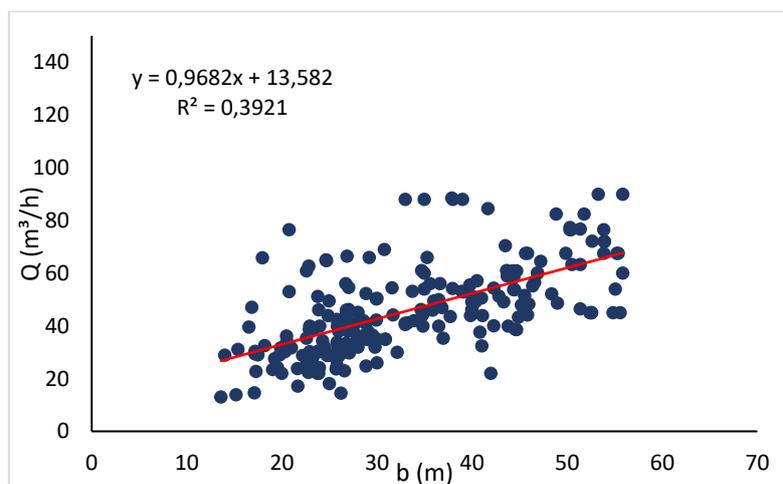


Figura 3.3. Gráfico de dispersão elaborado com 220 pares de vazão e as respectivas espessuras saturadas do aquífero nos pontos de amostragem. Notar tendência linear crescente entre os dados de entrada. R-sq = coeficiente de determinação.

3.3 Aspectos Construtivos dos Poços

Os perfis construtivos dos poços, apesar de disponíveis, não apresentam detalhamento, especialmente quanto à variação nas espessuras dos solos e saprolitos para cada poço. Desta forma, foram obtidas informações pessoais dos perfuradores da empresa Martins & Silva Ltda. e com o acompanhamento da construção de alguns poços na área.

Neste contexto observou-se que os poços tubulares construídos no Aquífero Batalha são perfurados pelo método “rotativo com circulação de lama” em que a perfuração do conduto se faz pela rotação de uma broca e a remoção do material triturado se faz pela percolação e circulação de lama bombeada de uma caixa de lama adaptada próxima à perfuração (Figura 3.4). É importante informar que a circulação é passiva, sem a intervenção de compressor ou outro sistema de produção de pressão.



Figura 3.4. Torre de perfuração com a respectiva caixa de lama e broca utilizada para as perfurações.

A coluna de revestimento é instalada imediatamente após a perfuração, constituída por PVC com diâmetro de 6 polegadas, onde a entrada d’água ocorre por ranhuras perfuradas no próprio tubo de revestimento. O espaço anelar é preenchido por pré-filtro representado por “brita” grossa, de calcário, com fragmentos variáveis de 0,5 a 5,0 cm de diâmetro (Figura 3.5).

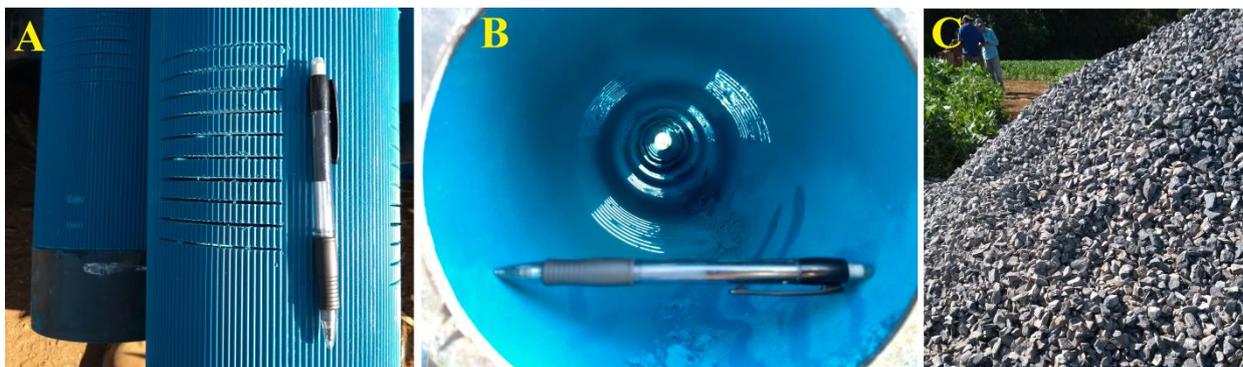


Figura 3.5. Revestimento em PVC comumente utilizados, com as “ranhuras” de função filtro, responsáveis pela entrada de água no poço. Em C observa-se “brita” de calcário de granulometria ~ 2,0 cm, comumente utilizada como pré-filtro dos poços da região.

O material removido durante a perfuração inicialmente é representado por lamas (horizontes de solos) até profundidades próximas de 16 metros, passando comumente por um horizonte petroplúntico, e em seguida é composto por areia de diferentes granulometrias, as quais ficam retidas nas hastes e na bomba utilizada durante a perfuração. Essa areia é proveniente do saprolito dos quartzitos da Formação Serra da Batalha, com cores esbranquiçadas e limpas (sem argila), como se pode observar na Figura 3.6. A perfuração é realizada até a broca encontrar a rocha sã (quartzito não alterado), sendo que o método de perfuração adotado não é capaz de penetrar em materiais litificados. Logo, pode-se concluir que a profundidade dos poços coincide com a espessura do aquífero naquele local.



Figura 3.6. Composição do material de saída durante a perfuração. Em A e B observa-se o material removido durante os primeiros metros de perfuração. Já em C observa-se a areia clara correspondente ao saprolito do quartzito da Formação Serra da Batalha do Grupo Canastra.

As etapas finais da construção dos poços se dão pela concretagem da porção mais rasa do espaço anelar para dar resistência à coluna do poço e devida proteção contra a percolação de contaminantes provenientes da superfície. No entanto foram verificadas dezenas de poços sem essa importante proteção, onde o pré-filtro se encontra instalado até a superfície do terreno, como no poço tubular ilustrado na Figura 3.7.



Figura 3.7. Poço tubular instalado sem proteção sanitária e com o pré-filtro composto por brita calcária até a superfície. Observa-se também um tupo repositivo necessário para o preenchimento de pré-filtro a medida que o poço produz areia do aquífero.

A operação cotidiana dos poços mostra a necessidade de reposição de pré-filtro diariamente, o que demonstra que os poços têm produzido muita areia e material particulado durante o bombeamento, podendo acarretar no desmoronamento do poço e na diminuição da vida útil da bomba. Tal fato indica que a granulometria do pré-filtro comumente utilizada foi escolhida de forma equivocada. Como a formação apresenta material inconsolidado, com granulometria de areia fina, média e grossa, seria mais correto utilizar um pré-filtro com melhor selecionamento e com diâmetro variável de 4 a 6 mm. Este tipo de pré-filtro poderia minimizar ou até mesmo eliminar a produção de areia e ainda poderia ampliar a produção de água e a vida útil dos poços.

3.4 Caracterização da Zona Não Saturada

A zona não saturada também chamada de zona vadosa ou zona de aeração situa-se entre a superfície freática e a superfície do terreno, nela os poros estão parcialmente preenchidos por água e ar (Feitosa et al 2008).

A infiltração da água nos solos é condicionada por aspectos relacionados ao tipo de uso e cobertura do solo, geomorfologia e das características específicas do tipo de solo, como: textura, estrutura, mineralogia, cerosidade, umidade, porosidade, bioturbações, etc.

A condutividade hidráulica vertical (K_v) dos solos é uma propriedade comumente utilizada na determinação do potencial de fluxo e tempo de infiltração de um líquido no solo, sendo um dos principais parâmetros dimensionais do solo e para a determinação das condições de recarga de aquíferos. Para a obtenção dos valores de K_v foram realizados 22 ensaios de infiltração *in situ* em superfície pelo método dos “anéis concêntricos” e 14 em profundidades variadas através do método *open end hole* (Fiori 2010). Os ensaios de infiltração foram distribuídos ao longo da área de recarga do Aquífero Batalha e de acordo com as variações de uso e classes de solo. Os locais analisados incluíram solos em áreas de agricultura, solo exposto e de cerrado nativo (Figura 3.8).

A zona não saturada do Aquífero Batalha é composta principalmente por latossolos vermelho-amarelo de textura argilosa, o qual atinge profundidades de até 25 m, os quais são responsáveis pelo controle da infiltração e conseqüente recarga do aquífero. Esses solos se encontram em relevo plano a suave ondulado, com declividades variando entre 0% e 8%, e o principal tipo de ocupação desses solos é a agricultura, onde são submetidos constantemente ao preparo para novas culturas, necessitando da utilização de máquinas pesadas para a aeração e gradagem do solo superficial. No entanto, a remoção da vegetação nativa e a compactação dos horizontes de solo mais profundos devido ao fluxo dos maquinários agrícolas, podem provocar a diminuição da condutividade hidráulica natural e da taxa de infiltração no solo, as quais são fatores primordiais para a garantia da recarga do aquífero.



Figura 3.8. Ensaios de infiltração do tipo anéis concêntricos e *open end hole*, realizados nos principais usos do solo da área de recarga do Aquífero Batalha.

Os valores de condutividade hidráulica verticais (K_v) obtidos nesses solos se encontram na Tabela 3.2, onde foram encontrados valores de K_v na ordem de grandeza variando de 10^{-3} a 10^{-9} m/s (Tabela 3.2). De acordo com a proposição de Freeze & Chery (1996) e Fetter (1994) valores de K_v superiores a 10^{-5} são classificados como alta condutividade hidráulica.

Nos ensaios de infiltração em superfície foram obtidos valores de K_v na ordem de 10^{-4} a 10^{-5} m/s para os locais com pouca ou nenhuma intervenção antrópica, ou seja, com a vegetação nativa preservada. Já os valores de K_v para os locais de agricultura, tanto irrigada quanto de sequeiro, apresentam valores na ordem de 10^{-5} a 10^{-6} m/s, evidenciando a diminuição do potencial de infiltração em locais com constante fluxo de máquinas e ausência de vegetação nativa.

Nos solos expostos os valores de Kv apresentaram variação entre as ordens de 10^{-3} a 10^{-6} m/s, o valor de 10^{-3} m/s observado no ponto PGN 15 se deve a realização do ensaio de infiltração em local próximo a uma cabeceira de vereda, com solo muito estruturado (estrutura granular) onde a vegetação nativa havia sido recém removida. Observa-se que quanto mais antiga a atividade agrícola no local, menos estruturado se encontrará o solo e menores os valores de Kv, devido a quebra das estruturas durante o preparo do solo, onde os valores de Kv chegam a ordem de 10^{-6} m/s. A relação entre uso e ocupação do solo com os valores de condutividade hidráulica vertical é observada na Figura 3.9.

Tabela 3.2. Valores de Kv em superfície e em profundidade de acordo com a classe e uso do solo. Os campos sem dados ocorrem devido a impossibilidade de realização do ensaio ou problemas na execução do mesmo. (AC = anéis concêntricos; LVAd = latossolo vermelho amarelo distrófico; LAd = latossolo amarelo distrófico); GHd = Gleissolo Háplico Tb distrófico.

Ponto	Uso do Solo	Classe de Solo	Condutividade Hidráulica Vertical (Kv) (m/s)				
			AC	Open end hole			
			0 m	0.5 m	1.0 m	1.5 m	2.0 m
PGN-12	Terra Exposta	LVAd	4,1E-06	1,3E-07	-	1,6E-07	2,4E-06
PGN-13	Agricultura Irrigada (feijão)	LVAd	5,4E-04	-	-	-	-
PGN-14	Agricultura de Sequeiro (milho)	LVAd	4,3E-05	-	-	-	-
PGN-15	Solo Exposto (muito estruturado)	LVAd	2,6E-03	-	-	-	-
PGN-16	Agricultura de Sequeiro (milho)	LVAd	7,9E-05	-	-	-	-
PGN-40	Cerrado Nativo	LVAd	6,7E-04	1,4E-07	9,7E-08	6,9E-08	2,4E-08
PGN-44	Agricultura Irrigada (soja)	LVAd	1,4E-05	6,0E-08	4,1E-07	1,3E-08	1,0E-08
PGN-49	Cerrado Nativo	LAd	6,0E-05	1,5E-08	9,7E-09	-	-
PGN-50	Agricultura Irrigada (soja)	LVAd	7,4E-06	-	-	1,6E-08	1,6E-08
PGN-51	Agricultura Irrigada (soja)	LVAd	1,0E-05	3,7E-08	4,8E-08	6,7E-09	8,6E-09
PGN-53	Solo Exposto (gradeado)	LAd	1,9E-03	2,8E-07	3,0E-08	4,4E-09	7,0E-09
PGN-55	Agricultura Irrigada (soja)	LAd	1,2E-05	6,8E-08	3,5E-07	4,7E-09	-
PGN-57	Agricultura Irrigada (soja)	LAd	7,4E-06	1,2E-07	5,5E-09	1,0E-08	5,2E-09
PGN-61	Agricultura de Sequeiro (feijão)	LAd	5,0E-06	-	8,3E-08	3,3E-09	8,9E-10
PGN-63	Solo Exposto (gradeado)	LAd	1,6E-04	1,1E-07	1,1E-08	1,1E-08	5,3E-09
PGN-102	Cerrado Nativo	GHd	2,2E-04	4,4E-07	2,8E-08	2,4E-07	1,4E-07
PGN-103	Agricultura Irrigada (soja)	LAd	5,3E-05	4,1E-08	3,0E-08	2,8E-08	5,0E-09
PGN-104	Cerrado Nativo	LAd	3,5E-05	-	-	-	-
PGN-105	Agricultura de Sequeiro	LAd	6,0E-05	-	-	-	-
PGN-106	Agricultura de Sequeiro (milho)	LAd	2,0E-05	-	-	-	-
PGN-107	Agricultura Irrigada	LAd	6,1E-07	-	-	-	-
PGN-108	Agricultura de Sequeiro	LAd	2,0E-05	4,4E-08	7,9E-08	2,6E-08	1,3E-08
Média			3,0E-04	1,2E-07	9,9E-08	4,5E-08	2,4E-07
Moda			1,0E-05	1,0E-07	1,0E-08	1,0E-08	1,0E-09
Mediana			3,9E-05	8,7E-08	3,9E-08	1,3E-08	9,5E-09
Máxima			2,6E-03	4,4E-07	4,1E-07	2,4E-07	2,4E-06
Mínima			6,1E-07	1,5E-08	5,5E-09	3,3E-09	8,9E-10

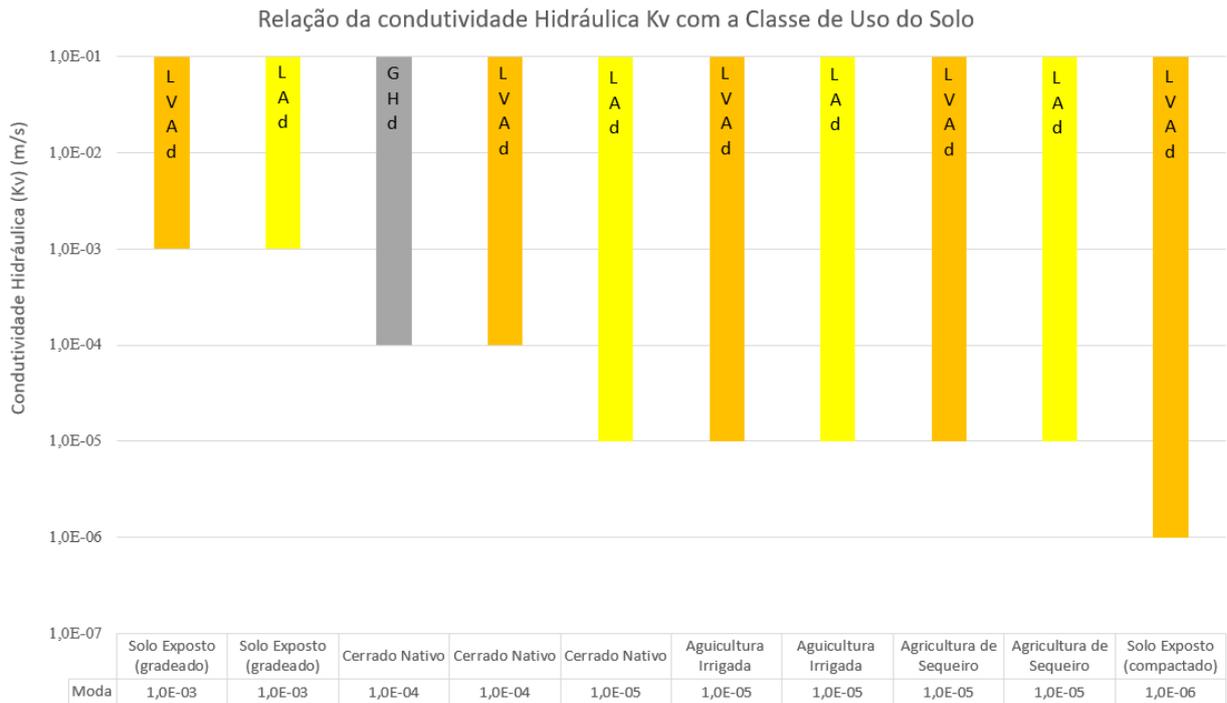


Figura 3.9. Gráfico da correlação dos valores de condutividade hidráulica (Kv) com as classes e tipos de uso do solo, obtidos pelo método dos anéis concêntricos. Evidenciando a diminuição dos valores de Kv.

Na análise da moda dos valores de Kv em profundidade (método *open end hole*), se observa um comportamento homogêneo entre as classes de solo Latossolo Vermelho Amarelo distrófico e Latossolo Amarelo distrófico, devido a similaridade entre essas classes. No entanto, também se observa uma tendência na diminuição dos valores de Kv com o aumento da profundidade de investigação (Figura 3.10).

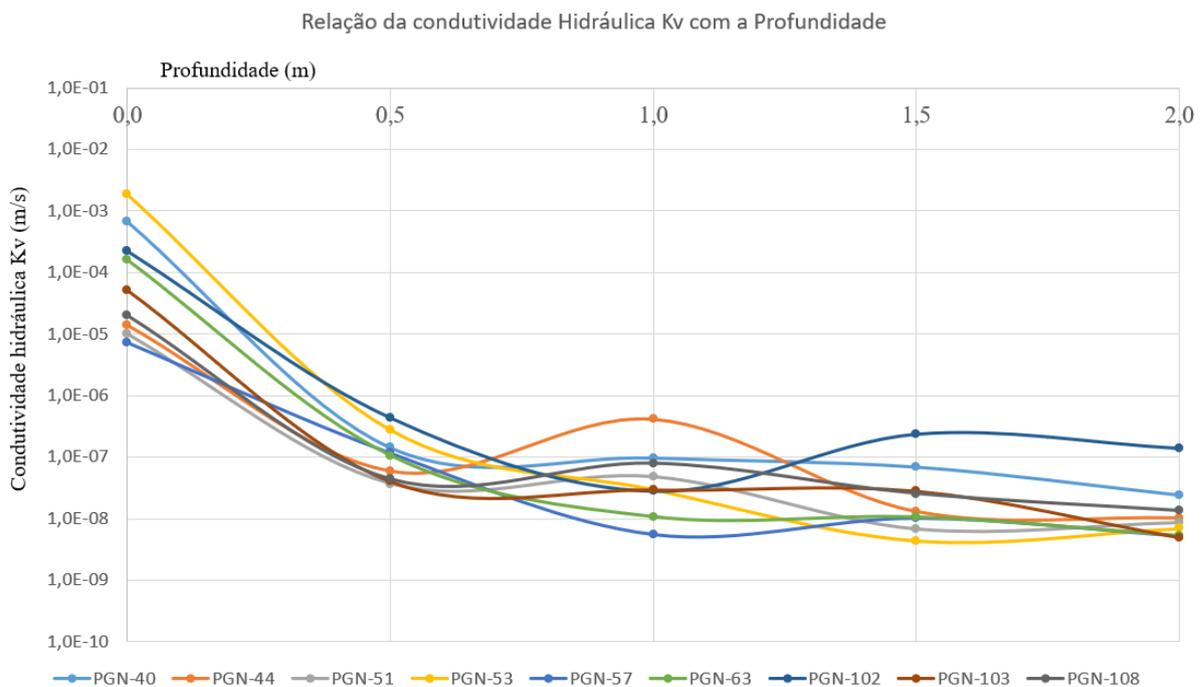


Figura 3.10. Gráfico de dispersão dos valores de Kv nas diferentes profundidades investigadas, nos pontos PGN-12, PGN-40, PGN-44, PGN-51, PGN-53, PGN-57, PGN-63, PGN-102, PGN-103 e PGN-108. O gráfico evidencia a diminuição dos valores de Kv com o aumento da profundidade.

3.5 Caracterização da Zona Saturada

Os parâmetros hidrodinâmicos dos aquíferos fornecem subsídios fundamentais para o entendimento das características de armazenamento e fluxo hídrico subterrâneo. Para a obtenção desses parâmetros foram analisados 70 testes de bombeamento realizados nos poços cadastrados pela SUPRAM/NOR o que permitiu o cálculo de alguns parâmetros hidrodinâmicos como a transmissividade (T), condutividade hidráulica (K) e vazão específica (Sy). O coeficiente de armazenamento (S) não foi passível de ser calculado, pois os dados não se ajustam às curvas padrões de Neuman (1975), muito provavelmente devido às variações de vazões observadas em praticamente todos os testes de bombeamento.

No entanto, dos 70 testes de bombeamento analisados, 48 apresentavam inconsistências que inviabilizaram a obtenção adequada dos parâmetros hidrodinâmicos. Dentre as principais inconsistências destacam-se: recuperação do NE durante o teste; ausência de rebaixamento ou intervalo de tempo muito grande entre as medições e variações de vazões ao longo do tempo (sendo que a vazão constante é uma das principais premissas para aplicação dos métodos gráficos de determinação de parâmetros hidrodinâmicos a partir de dados de testes de bombeamento).

A realização dos testes consiste em acompanhar por meio de medidas sequenciais a vazão e o rebaixamento do nível da água no interior do poço bombeado, num determinado intervalo de tempo e posterior análise matemática considerando um poço de observação a uma distância definida a partir do poço de bombeamento. No presente caso, como não havia poço de observação a uma distância conhecida foi arbitrada uma distância de 1 metro entre os poços de bombeamento e de observação, sendo que na prática o bombeamento e a observação do rebaixamento foram realizados no mesmo poço.

A execução dos testes deve ser precedida pela medida do nível estático (NE) no poço e após iniciar o bombeamento faz-se a leitura da variação do nível dinâmico (ND) em relação à vazão (Q), que são medidas com auxílio de hidrômetro e com duração de 24 horas. De posse dos valores de NE, ND e Q calcula-se o rebaixamento (valor da carga hidráulica por elevação do nível estático menos a cota da carga hidráulica por elevação do nível dinâmico) e o rebaixamento específico. Os dados hidrodinâmicos: condutividade hidráulica, transmissividade, e vazão específica foram obtidos com auxílio do *software AquiferTest 9.0* da *Waterloo Hydrogeologic Inc.* Por se tratar de um aquífero livre, o método adotado para obtenção dos parâmetros foi o método de Neuman.

De acordo com Oliveira & Campos (2004) devido a água bombeada possuir contribuição de toda a espessura saturada (b) do aquífero, os resultados dos parâmetros hidrodinâmicos obtidos através dos testes de bombeamento dos poços representam valores médios, podendo ainda sofrer interferências das condições construtivas do poço, como: diâmetro da perfuração, posição dos filtros, comprimento da seção de filtros, diâmetro do revestimento, granulometria do pré-filtro e

eficiência hidráulica.

Neste contexto, a Tabela 3.3 apresenta os valores dos parâmetros hidrodinâmicos obtidos após processamento no *AquiferTest 9.0* de 22 testes de bombeamento dos poços cadastrados na SUPRAM/NOR.

Tabela 3.3. Valores dos parâmetros hidrodinâmicos da zona saturada obtidos após processamento dos dados no software *AquiferTest 9.0* da Waterloo Hydrogeologic Inc. Fonte: Processos de outorga dos poços cadastrados na SUPRAM (<http://www.siam.mg.gov.br/siam/processo/index.jsp>).

Q - vazão, **b** - espessura saturada, **K** - condutividade hidráulica, **T** – transmissividade e **Sy** - vazão específica.

Teste	Nº Processo SUPRAM	Q (m³/h)	b (m)	K (m/s)	T (m²/s)	Sy
1	25796/2017	8,64	30,50	9,48E-05	2,89E-03	0,05
2	25797/2017	40,08	34,40	4,87E-05	1,67E-03	0,05
3	25798/2017	42,12	34,50	3,43E-05	1,18E-03	0,10
4	25799/2017	50,88	33,50	4,05E-05	1,36E-03	0,05
5	502/2018	29,80	17,30	7,51E-05	1,30E-03	0,47
6	507/2018	34,40	24,30	3,64E-05	8,84E-04	0,15
7	512/2018	29,80	27,10	5,08E-05	1,38E-03	0,25
8	1331/2018	36,00	28,10	3,42E-05	9,62E-04	0,16
9	6439/2015	38,00	26,00	1,22E-05	3,16E-04	0,32
10	6887/2016 P1	23,70	28,73	9,09E-06	2,61E-04	0,23
11	6887/2016 P2	20,55	25,65	5,04E-06	1,29E-04	0,22
12	6887/2016 P3	25,20	22,60	1,08E-05	2,45E-04	0,15
13	6887/2016 P4	22,00	23,90	6,98E-06	1,67E-04	0,27
14	6897/2016	32,00	25,90	6,87E-06	1,78E-04	0,23
15	7702/2016	45,15	28,00	1,30E-05	3,65E-04	0,14
16	7703/2016	46,08	23,90	1,41E-05	3,37E-04	0,34
17	7728/2016	17,20	21,70	5,95E-06	1,29E-04	0,37
18	8369/2017	42,00	33,90	1,56E-05	5,27E-04	0,16
19	17743/2015	69,00	30,80	1,69E-05	5,21E-04	0,39
20	25796/2017	42,20	29,96	1,39E-05	4,18E-04	0,26
21	17736/2013 P6	39,00	16,55	1,00E-04	1,60E-03	0,01
22	17736/2013 P8	66,00	26,98	1,50E-04	4,10E-03	0,01
Média		36,35	27,01	3,61E-05	9,51E-04	0,20
Máxima		69,00	34,50	1,50E-04	1,80E-03	0,47
Mínima		8,64	16,55	1,29E-06	5,04E-04	0,01

A Figura 3.11 apresenta o gráfico de interpretação da curva de rebaixamento pelo tempo do teste 14 utilizando o método de Neuman. Os dados hidrodinâmicos dos 22 testes de bombeamento resultam nas seguintes características para o Aquífero Batalha:

- Condutividade hidráulica muito alta a moderada sendo que a maior parte dos dados alcançam valores da ordem de 10^{-5} m/s. Tais valores são coerentes com o material arenoso, limpo e inconsolidado que compõe a zona saturada do aquífero;

- Transmissividade variando entre 10^{-3} e 10^{-4} m²/s o que é coerente com as espessuras da ordem de poucas dezenas de metros de espessura da zona saturada do aquífero;
- A vazão específica é inferior a 27% para a maior parte dos poços estudados, sendo que os casos de valores anômalos são considerados como decorrentes de efeitos hidráulicos e falta de condições de contorno adequadas durante a realização dos testes de bombeamento. Os valores da ordem de 0,2 são os considerados coerentes com o tipo de aquífero;
- A vazão média, tanto de 36,35 m³/h (para os 22 poços bombeados), quanto de 45 m³/h (para os 220 poços do cadastro de pontos d'água) é considerada anômala tendo em vista que se trata de poços pouco profundos, com zona saturada média de 33 metros;
- Por fim, a capacidade específica média de 3,9 m³/h/m é igualmente anômala sendo maior que a maior parte dos aquíferos sedimentares hospedados em rochas arenosas litificadas.

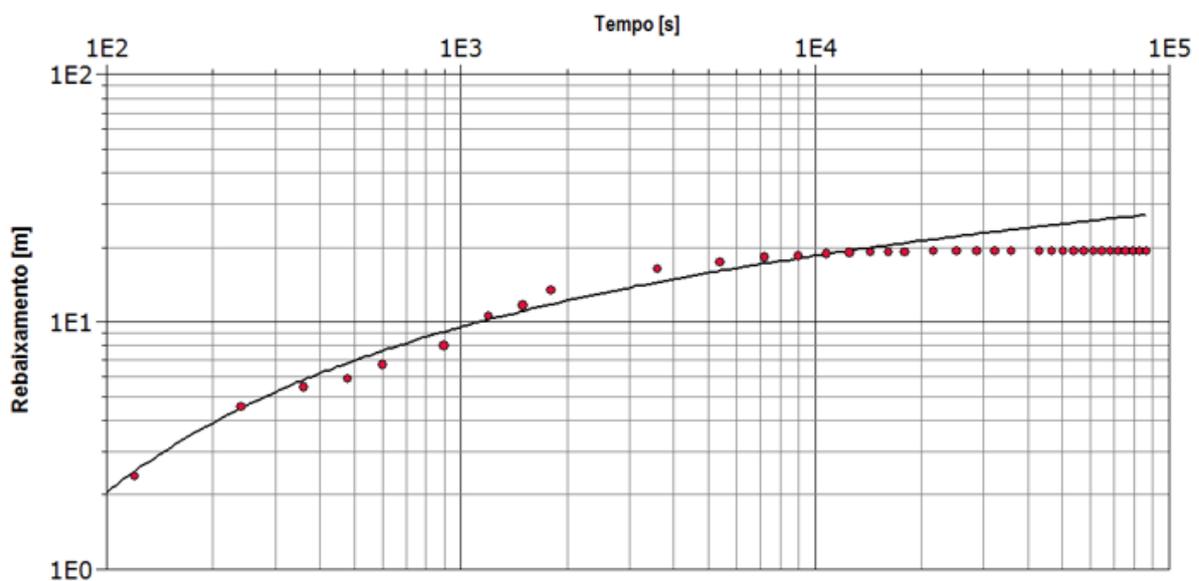


Figura 3.11. Gráfico de interpretação da curva rebaixamento versus tempo do ensaio de bombeamento do poço do teste 14 pelo método Neuman (1975). Dados processados no software *Aquifer Test 9.0*.

3.6 Estudo Geofísico – Eletrorresistividade (CA)

Seções geofísicas de eletrorresistividade foram realizadas com o intuito de se obter informações nos locais com ausência de poços tubulares e de dados geológicos em superfície, de modo a fornecer informações necessárias para a melhor delimitação do Aquífero Batalha, como: a presença / ausência do aquífero, sua espessura e valores de resistividades de referência, que permitam orientar futuras perfurações.

As seções de eletrorresistividade foram realizadas através da técnica de caminhamento elétrico, o que possibilita o mapeamento lateral das variações de resistividade elétrica (Telford *et al.* 1990). O posicionamento dos eletrodos (potencial e corrente) foi realizado pelo arranjo dipolo-

dipolo. O arranjo montado nesse trabalho apresenta 360 metros de extensão, com eletrodos metálicos espaçados de 10 em 10 metros, o que permitiu a investigação em profundidades de até 70 metros. A aquisição dos dados ocorreu com a utilização do Eletrorresistímetro SYSCAL Pro 72 (fabricado pela *Iris Instruments*), o qual se encontrava interligado aos cabos multieletrodos, onde a corrente é injetada ao solo (Figura 3.12). Os valores de resistividade obtidos refletem as variações do subsolo em resposta a passagem de correntes elétricas, onde cada material (classes de solo, tipos de rochas, etc.) apresentam intervalos distintos, devido a composição mineralógica e quantidade de fluidos presentes nos poros.



Figura 3.12. Equipamento Eletrorresistímetro SYSCAL Pro 72 e eletrodo montado pronto para iniciar o levantamento.

Nesse contexto, foram realizados 15 perfis de eletrorresistividade, espaçados ao longo da área de estudo, dos quais o perfil PGN-65 foi executado ao lado de um poço tubular com perfil litológico e construtivo conhecidos, de modo a se obter valores realistas das respostas de resistividade dos diferentes materiais, incluindo solo, saprolito e rocha (quartzitos e filitos). A localização dos 15 perfis de eletrorresistividade é representada na Figura 3.13.

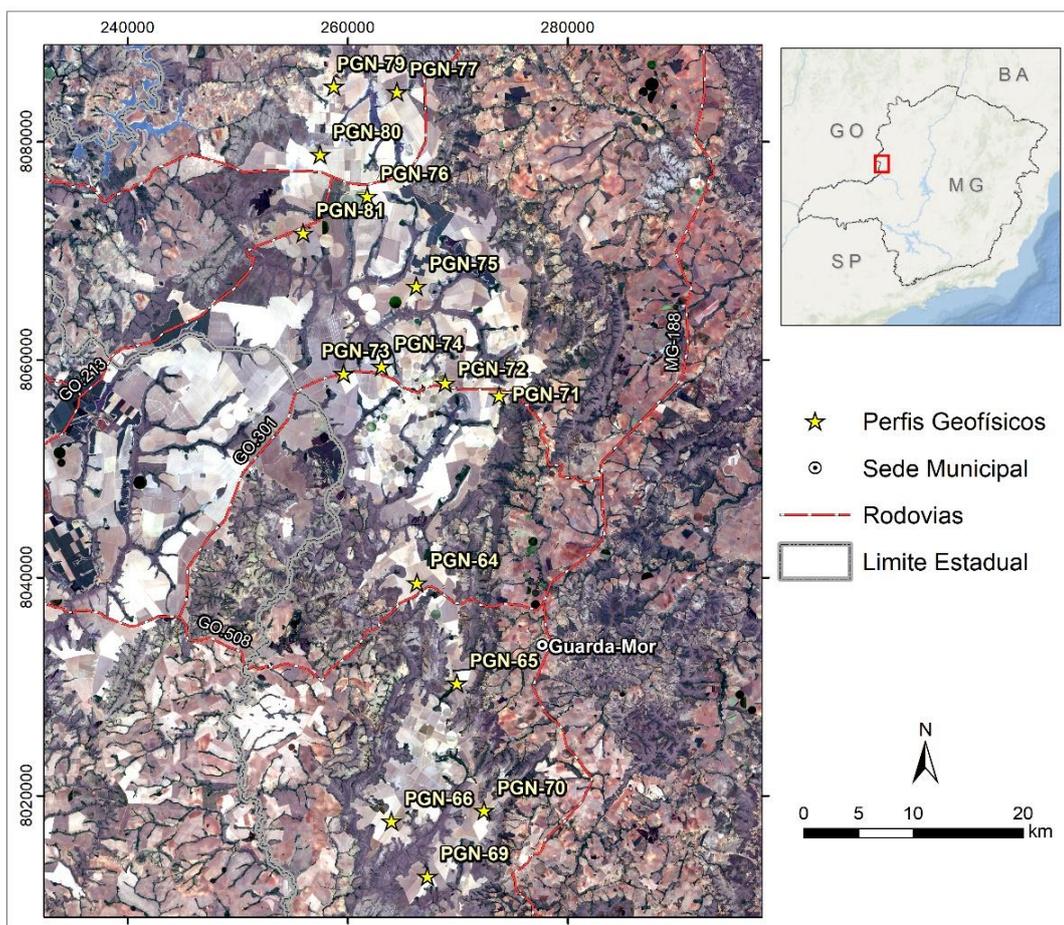


Figura 3.13. Localização dos perfis de eletrorresistividades realizados na região de estudo, com a finalidade de obtenção de informações geológicas em subsuperfície e que auxiliaram na delimitação do aquífero.

A partir da seção obtida no ponto PGN-65 foi proposto um modelo de camadas baseado na resposta da eletrorresistividade (Lima 2010). As camadas observadas no perfil litológico elaborado durante a perfuração do poço com seus intervalos de profundidade e valores de resistividade se encontram na Tabela 3.4. A Figura 3.14 apresenta os valores de resistividade obtidos ao longo desse perfil, bem como ilustra as camadas interpretadas, conforme o perfil litológico de poço tubular interceptado pela seção geofísica.

Tabela 3.4. Características das camadas obtidas durante o acompanhamento da perfuração do poço (perfil litológico) e seus respectivos intervalos de profundidade e resistividade.

Descrição do Perfil Litológico	Profundidade (m)	Resistividade (ohm.m)
Latossolo Vermelho Amarelo argiloso	0 - 15	500 - 1.200
Laterita Concrecionária	15 - 18	1.201 - 1.350
Saprolito arenoso	18 - 37	1.351 - 4.500
Rocha (Quartzito)	> 37	> 4500 até da ordem de 16.000
Rocha (filito)	Variáveis	~ 3000 até < 7.000

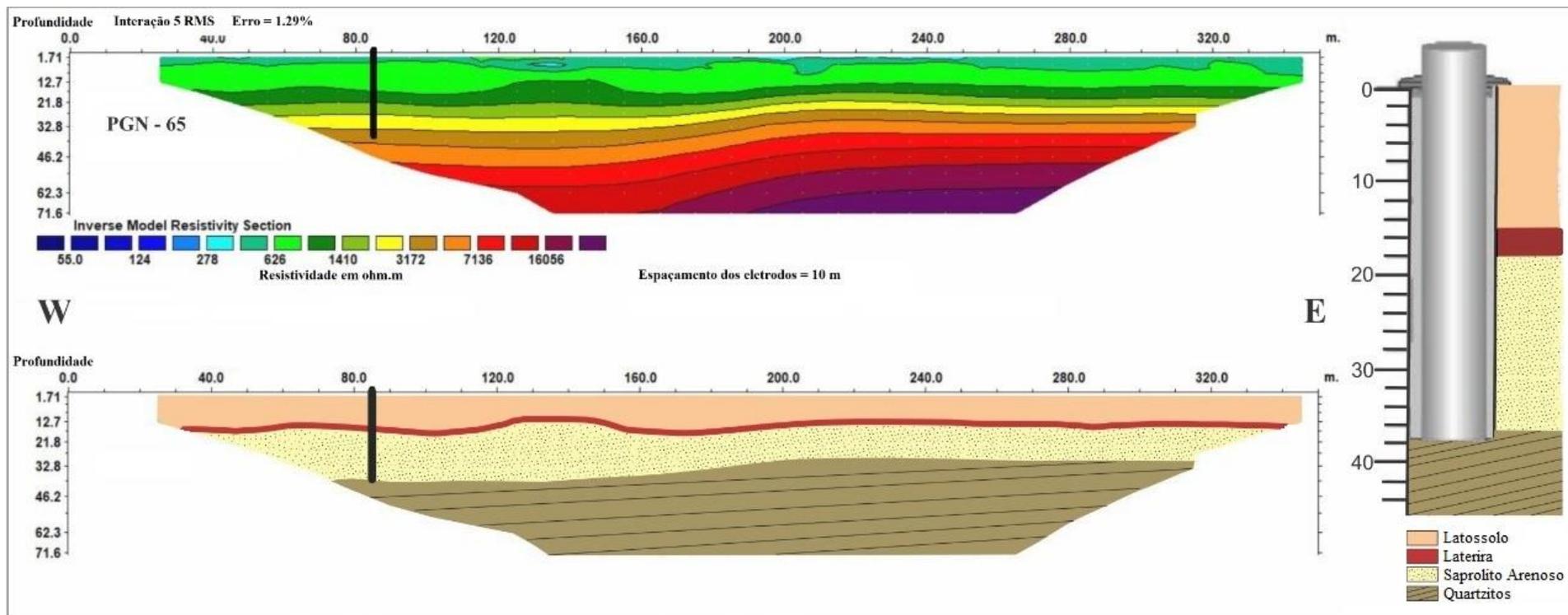


Figura 3.14. Modelo geológico elaborado a partir dos dados de resistividade do ponto PGN-65 e de perfil litológico de poço recém-construído.

A primeira camada do perfil litológico do poço é composta por Latossolo Vermelho Amarelo de textura argilosa, o qual possui 15 metros de espessura no local e valores de resistividade elétrica variando entre 500 e 1200 Ohm.m.

A camada sotoposta é caracterizada por concreções de plintita (laterita) formando uma camada de cerca de três metros de espessura, entre as profundidades de 15 e 18 metros e valores de resistividade elétrica entre 1201 e 1350 Ohm.m.

A camada imediatamente abaixo é composta por areia de coloração clara e granulometria variando entre fina a média correspondente ao soproto dos quartzitos da Formação Serra da Batalha, que no local apresenta 19 m de espessura se iniciando a 18 m de profundidade e com valores de resistividade entre 1301 a 4500 Ohm.m.

Por fim, caracterizando o substrato do aquífero se encontra a rocha sã formando uma barreira hidráulica e caracterizada por quartzito da Formação Serra da Batalha, a qual se encontra no local com profundidades maiores que 37 m e valores de resistividade elevados, superiores a 4500 Ohm.m. Esse substrato rochoso é pouco permeável e responsável pelo direcionamento do fluxo da água no aquífero, estando neste caso com o fluxo na direção oeste, mesmo sentido de mergulho das camadas de quartzito.

Os resultados das demais seções geofísicas são apresentados nas Figuras 3.15 e 3.16 seguidos da interpretação das variações laterais de resistividade.

Conforme observado na Figura 3.15 valores de resistividade inferidos conforme Tabela 3.4 pode-se afirmar que o Aquífero Batalha ocorre com espessuras médias próximas a 40 metros e características similares ao observados no perfil PGN-65. Esta observação é corroborada na análise das seções geofísicas: PGN-64, PGN-66, PGN-71, PGN-72, PGN-74, PGN-76, PGN-77, PGN-80 e PGN-81.

As seções com valores de resistividade muito baixos indicam um material mais silto-argiloso ao longo do perfil, possivelmente correspondente aos filitos do topo da Formação Serra da Batalha, ou outra unidade metapelítica do Grupo Canastra. Nesse contexto, pode-se afirmar que o Aquífero Batalha não ocorre ao longo das seções geofísicas PGN-70, PGN-73, PGN-75 e PGN-79.

A seção geofísica PGN-69 apresenta um caso distinto em que muito provavelmente o latossolo e o respectivo saprolito recobrem diretamente filitos do Grupo Canastra, uma vez que os valores de resistividades são muito baixos, e neste caso também o aquífero Batalha está ausente.

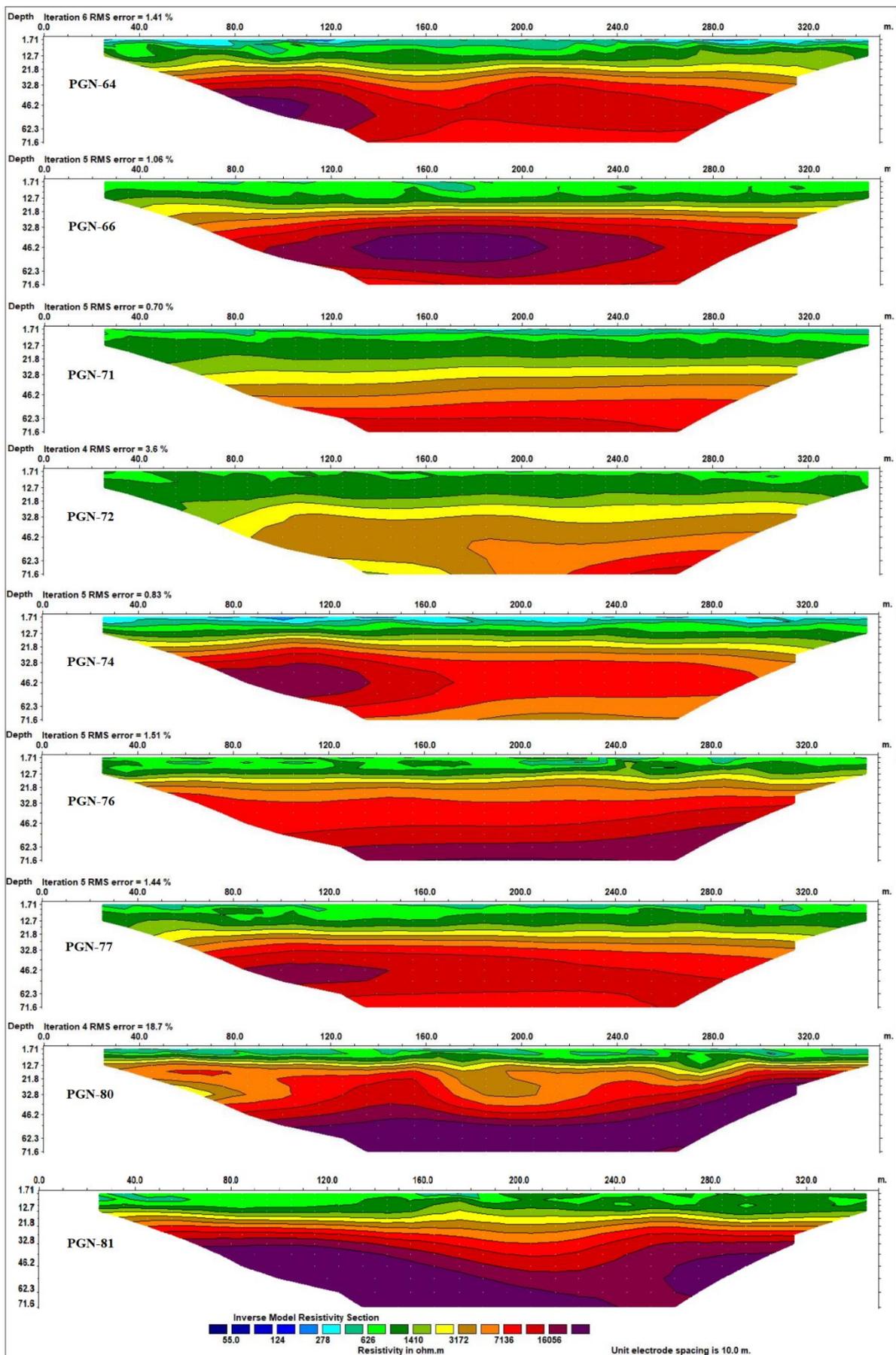


Figura 3.15. Compilado das seções de eletrorresistividade obtidas em que o Aquífero Batalha ocorre. Seções PGN-64, PGN-66, PGN-69, PGN-70, PGN-71, PGN-72, PGN-74, PGN-76, PGN-77, PGN-80 e PGN-81.

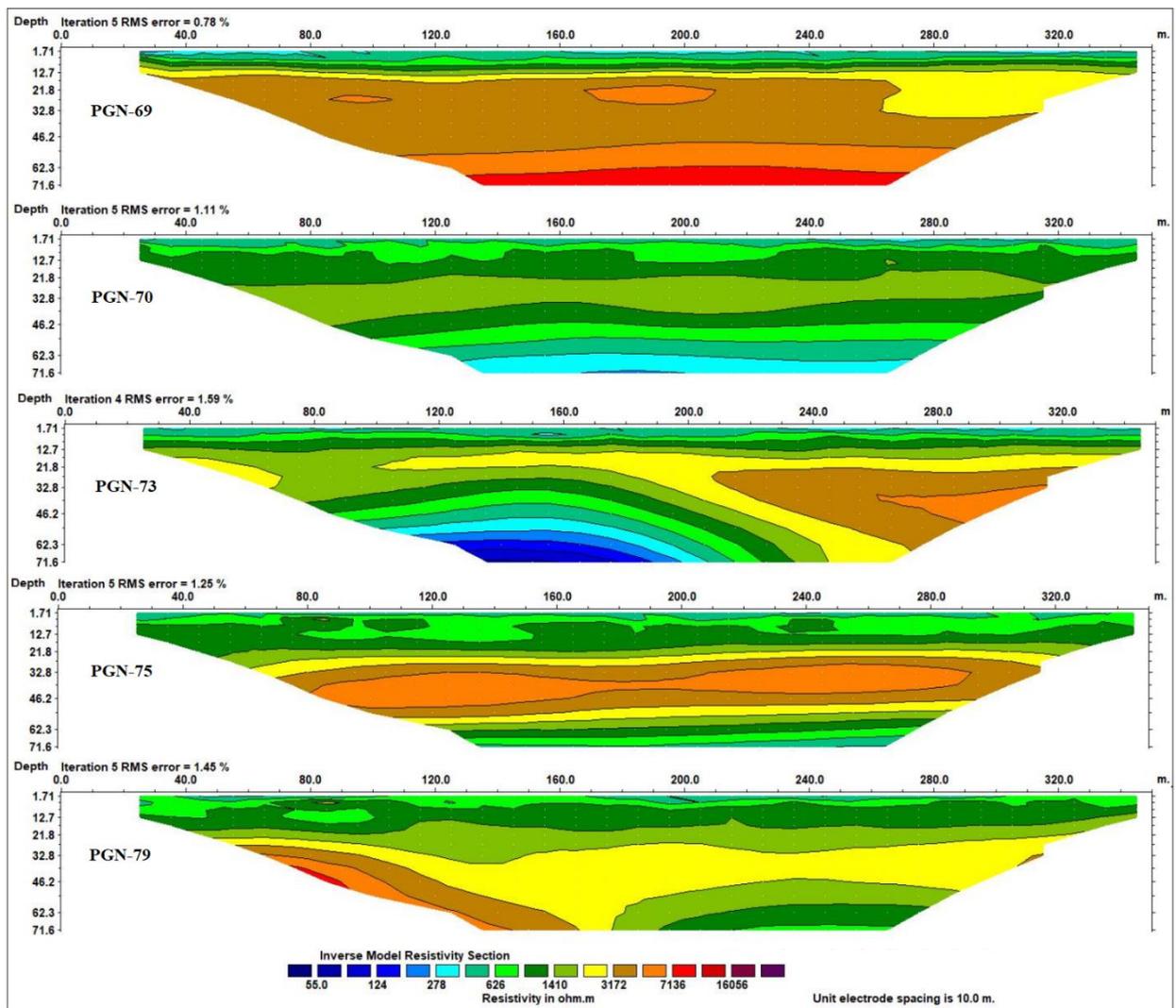


Figura 3.16. Compilado das seções de eletrorresistividade obtidas em que o Aquífero Batalha não ocorre. Seções PGN-69, PGN-70, PGN-73, PGN-75 e PGN-79.

3.7 Caracterização das Áreas de Recarga

As áreas de recarga são representadas pela própria área de ocorrência do aquífero, uma vez que não existem áreas topograficamente mais elevadas que possam contribuir com alimentação em direção ao aquífero.

As condições de recarga são significativas, sendo caracterizadas por solos espessos e estruturados, em declividades menores que 4% na maior parte da área, que recebe elevado índice pluviométrico e com usos que não promovem a impermeabilização ou compactação da superfície. Estas condições naturais favoráveis a infiltração e recarga são traduzidas pela baixa densidade de drenagem observada em toda a região da chapada. Outro aspecto que comprova as condições favoráveis de recarga é a elevada vazão específica da drenagem superficial, sua perenidade e regularidade das mesmas.

Já as áreas de descarga são representadas pela rede de drenagem superficial em associação com as amplas manchas de Gleissolos que ocorrem nas cabeceiras e ao longo das veredas.

A área total do Aquífero Batalha foi subdividida de acordo com as condições de recarga e descarga do mesmo, em área de recarga regional e área de recarga local. A área de recarga regional é caracterizada pela ausência de exutórios (cursos d'água/veredas), relevo plano e responsável pelos maiores volumes de recarga e conseqüentemente maior volume armazenado. Já a área de recarga local ocorre em maiores declividades, condicionadas aos canais de veredas, onde o escoamento superficial é maior, dificultando a infiltração, de modo que a recarga é menor em relação aos volumes infiltrados na área de recarga regional.

A Figura 3.17 apresenta um perfil esquemático da dinâmica da recarga ao longo da área total do Aquífero Batalha. A delimitação da área total do aquífero e respectivas áreas de recarga podem ser visualizadas no Apêndice III desta dissertação.

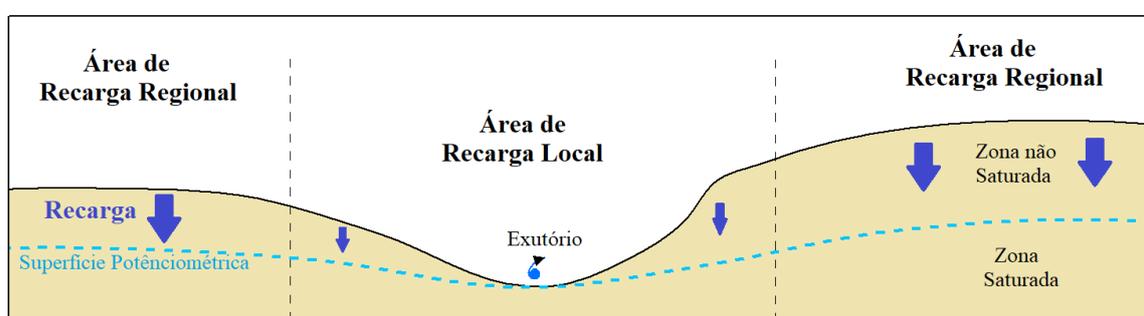


Figura 3.17. Perfil esquemático da dinâmica das áreas de recarga regional e local do Aquífero Batalha.

3.8 Estimativas de Reservas Hídricas

Para o cálculo das reservas será aplicada a proposta de Costa (1998), que considera que as disponibilidades hídricas de um aquífero equivalem às reservas renováveis mais um percentual das reservas permanentes.

As reservas permanentes e renováveis são obtidas por cálculos a partir de valores de parâmetros obtidos da descrição do aquífero, em associação com analogia a sistemas similares.

Como as águas dos aquíferos fraturados profundos não são utilizadas para irrigação, em função de sua disponibilidade limitada, as reservas relacionadas a este reservatório subterrâneo não serão consideradas.

Dessa forma, serão estimadas para fins de disponibilidades hídricas as reservas do sistema aquífero intergranular livre (Aquífero Batalha). As reservas renováveis são obtidas a partir de dados de variações de níveis em contexto climatológico, pedológico e geomorfológico similar.

Para a área em estudo não existem dados relativos à flutuação temporal dos níveis freáticos. Desta forma, para a qualificação das variações de profundidades dos níveis freáticos foram utilizados dados de Lousada & Campos (2006) que trabalharam na bacia do rio Jardim (afluente do rio preto, que é tributário do rio Paracatu). Esta bacia apresenta feições fisiográficas muito similares à área em estudo, incluídos geologia (rochas pelíticas e psamíticas), pedologia (latossolos

e gleissolos), geomorfologia (mesmo tipo de modelado de relevo) e clima (domínio do cerrado do Brasil Central).

As Figuras 3.18 e 3.19 mostram resultados de medições mensais em três classes de solos que correspondem aos dominantes na bacia em estudo. As medições foram realizadas entre outubro de 2003 e janeiro de 2005. Para efeito dos cálculos de reservas será utilizado um valor médio de 2,5 metros de flutuação anual do nível freático, o que é considerado coerente com o meio estudado e inclusive um valor subestimado se consideradas as variações de precipitação que ocorrem ao longo do tempo.

Lousada & Campos (2006) observaram que nos latossolos de textura muito argilosa os níveis variam entre 2 e 18 metros, sendo que a ampla maioria das medidas oscila entre 6 e 10 metros. A variação anual média é da ordem de 3 metros, entretanto para se obter uma estimativa conservadora será utilizado o valor de 2,5 metros. Os Gleissolos apresentam níveis mais rasos (flutuando entre 0,25 e 3,5 metros) com variação anual de cerca de 0,5 metro.

Este mesmo comportamento é esperado para a área em estudo, uma vez que nesta região há total correspondência dos aspectos fisiográficos (relevo, geologia, solos e clima).

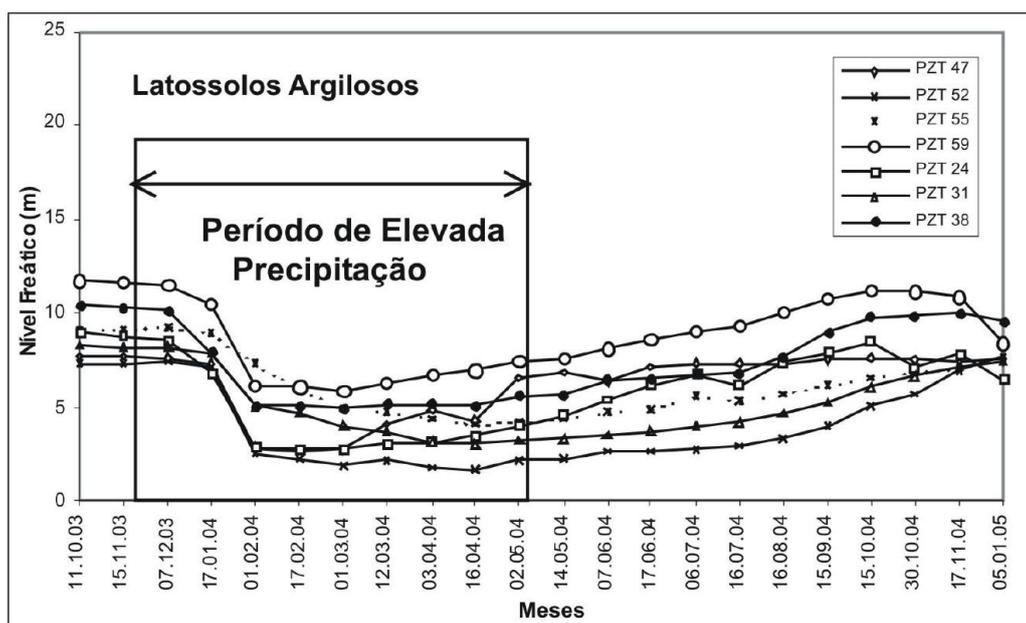


Figura 3.18. Variação dos níveis freáticos em Latossolos Argilosos, na bacia do alto Jardim, Distrito Federal. A demarcação retangular refere-se ao período de maior precipitação média na bacia.
Fonte: Retirado de Lousada & Campos (2006).

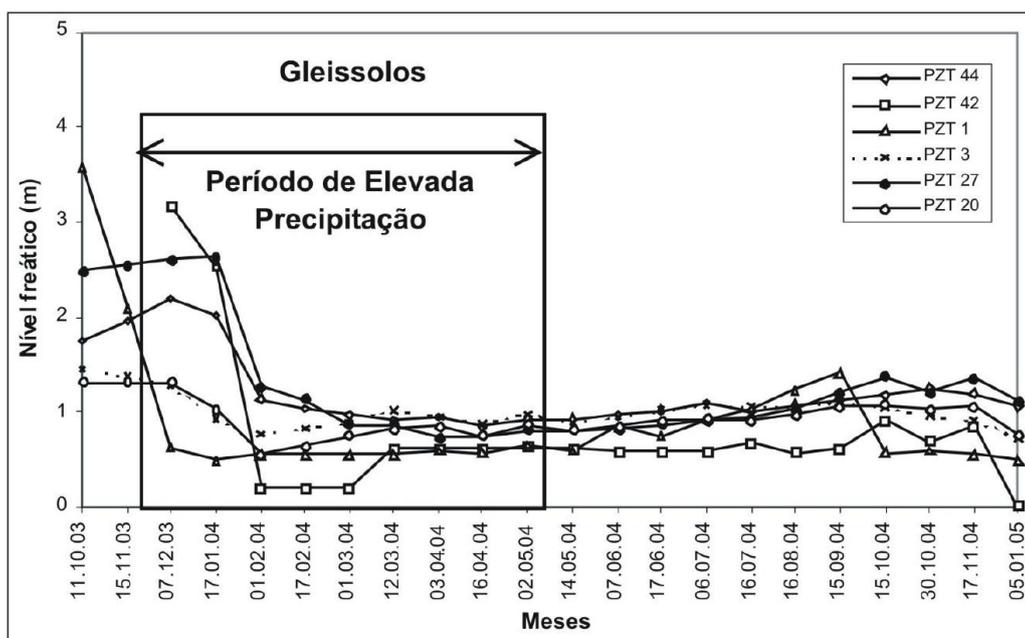


Figura 3.19. Variação dos níveis freáticos no grupo dos Gleissolos, na bacia do alto Jardim, Distrito Federal.
Fonte: Retirado de Lousada & Campos (2006).

Esta estimativa da reserva renovável pode ser obtida pela Equação 10:

$$Rr = A * \eta e * \Delta h$$

Onde:

Rr = reservas renováveis (m³/ano)

A = área de contribuição para o cone de depressão (área total do aquífero = 745 km²)

ηe = porosidade efetiva (18%)

Δh = variação anual do nível freático (2,5m)

$$Rr = 7,45 \times 10^8 \text{ m}^2 * 0,18 * 2,5 \text{ m/ano}$$

$Rr = 3,3525 \times 10^8 \text{ m}^3/\text{ano}$ ou 335.250.000 m³/ano (trezentos e trinta e cinco milhões, duzentos e cinquenta mil metros cúbicos por ano).

O valor da porosidade efetiva foi considerado de 18% para as areias, uma vez que se trata de solos bastante porosos com grãos variando de areia fina a média.

É importante ressaltar que os valores relativamente elevados obtidos para as reservas renováveis são compatíveis com as características do meio físico local, que permite elevada recarga natural e reduzido escoamento superficial, sendo que a maior perda é vinculada à evapotranspiração real.

Para o estabelecimento da reserva permanente foi utilizada a Equação 8 proposta por Costa (2008) para aquíferos intergranulares livres:

$$Rp = A * b * \eta e$$

Onde:

R_p = reserva permanente (m^3)

A = área de contribuição para os cones de depressão (área total do aquífero = 745 km^2)

b = espessura saturada do aquífero (média de $33,33 \text{ m}$)

η_e = porosidade efetiva (18%)

$$R_p = 4,26 \times 10^8 \text{ m}^2 * 33,33 \text{ m} * 0,18$$

$R_p = 2,55 \times 10^9 \text{ m}^3$ ou $2.553.944.580 \text{ m}^3$ (dois bilhões, quinhentos e cinquenta e três milhões, novecentos e quarenta e quatro mil, quinhentos e oitenta metros cúbicos).

A espessura da zona saturada foi estabelecida a partir da média dos 220 poços tubulares cadastrados (

) distribuídos no aquífero, tendo sido estabelecida pela diferença entre o nível freático e a profundidade média dos poços. Como o aquífero é relacionado ao manto de intemperismo sobre quartzitos, com média de $33,33 \text{ m}$ de espessura saturada. Os parâmetros dimensionais utilizados são bastante compatíveis com os tipos de aquíferos em estudo, tendo sido utilizados em sistemas similares por diversos autores.

Para o cálculo das reservas exploráveis (R_e) a área foi limitada a área de recarga regional, onde estão instalados a grande maioria dos poços tubulares, os quais estão distantes de exutórios.

Obtendo-se valores de reserva renovável (R_r) igual a $191.565.000 \text{ m}^3/\text{ano}$ e reserva permanente (R_p) de $2.553.944.580 \text{ m}^3$. As reservas exploráveis ou disponibilidades são determinadas através da Equação 9.

$$R_e = R_r + \%/\text{ano } R_p$$

Onde:

R_e = reserva explorável

R_r = reserva renovável

$\%/\text{ano } R_p$ = percentual por ano da reserva permanente

$$R_e = 191.565.000 \text{ m}^3/\text{ano} + 0,10/\text{ano} \times 2.553.944.580 \text{ m}^3$$

$$R_e = 191.565.000 \text{ m}^3/\text{ano} + 255.394.458 \text{ m}^3/\text{ano}$$

$R_e = 446.959.458 \text{ m}^3/\text{ano}$ (quatrocentos e quarenta e seis milhões, novecentos e cinquenta e nove mil e quatrocentos e cinquenta e oito metros cúbicos por ano).

Neste caso foram utilizados 10% das reservas permanentes, visto que se trata de um aquífero com condições de recarga bastante eficientes, sendo recobertos por latossolos estruturados (com estrutura granular no horizonte A e grumosa nos horizontes B). A utilização desse percentual da água de reserva permanente é baseada no fato de o cone de depressão resultante da exploração do aquífero gerar uma condição de infiltração adicional que compensa a retirada suplementar e auxilia para que o sistema alcance um novo equilíbrio.

Deve-se ressaltar que é de fundamental importância que para se garantir a melhor precisão dos cálculos dos parâmetros dimensionais, como a porosidade eficaz sejam obtidos através de estudos específicos, além do monitoramento da variação do nível estático seja realizado em vários locais do aquífero através de poços de monitoramento e que este seja realizado durante um longo período de tempo.

3.9 Modelo de Circulação

Segundo Fitts (2002) toda água que flui em um curso d'água natural tem origem pela precipitação, mas a água toma várias rotas até chegar ao seu destino. Parte corre diretamente sobre a superfície do solo até um canal por meio de escoamento superficial. Parte se infiltra parcialmente no solo e corre próximo à superfície até um canal (interfluxo). Outra parte se infiltra profundamente e se armazena em aquíferos, podendo migrar pela zona saturada para descarregar de volta à superfície em uma nascente, lago ou canal de curso d'água, através do fluxo de base.

Se o material que compõe a zona não saturada apresentar baixa permeabilidade, a maior parte da precipitação não infiltra e o fluxo de base é apenas uma pequena parte da descarga do curso. No entanto, se o material geológico na bacia de um curso for muito permeável, como é o caso da região em estudo, o fluxo de base pode ser uma grande parte da descarga de cursos d'água, como observado nas campanhas de campo, onde ocorrem diversos córregos perenes e veredas, que apresentam um fluxo de água de grande magnitude, sendo o fluxo de base o único contribuinte para as vazões durante o período de seca na região.

Sendo assim, o fluxo de base é um componente bastante uniforme da descarga de um curso d'água, mantendo fluxos durante períodos de seca. O fluxo de contribuição a partir do escoamento superficial é também conhecido como fluxo rápido, pois chega instantaneamente ao canal do curso d'água. O fluxo rápido é ocasional, pois ocorre durante e logo após os eventos de precipitação (Figura 3.20).

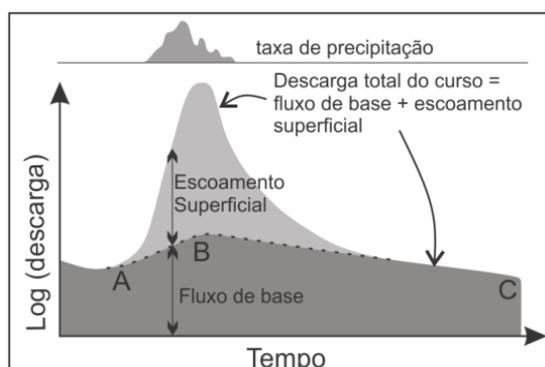


Figura 3.20. Hidrograma de um rio hipotético durante um evento de precipitação, mostrando as contribuições do fluxo de base e do escoamento superficial, para a descarga total do rio. A linha pontilhada ilustra um método empírico para determinar o fluxo de base: a linha se estende paralela a partir da parte de recessão do fluxo de base da curva C voltando diretamente para o pico de descarga B e depois para o início da subida A (Fonte Fitts, 2002).

Tendo em vista estes conceitos, foi proposto neste trabalho um modelo conceitual para a área de estudo, o qual se encontra ilustrado na Figura 3.21. Para efeito do modelo proposto um balanço hídrico preliminar é considerado:

- 1400 mm/ano correspondem a precipitação média histórica para toda a área que alimenta o sistema (dado subestimado obtido a partir da estação INMET de Patrocínio e Coromandel);
- 770 mm/ano são devolvidos à atmosfera por evapotranspiração (dado obtido do balanço hídrico climatológico da normal climatológica das estações Patrocínio e Coromandel);
- 630 mm/ano se infiltram através da zona vadosa (estimativa decorrente do fato de na região não haver escoamento superficial);
- 450 mm/ano são considerados recarga efetiva do Aquífero Batalha (dado obtido pela estimativa de reserva renovável do sistema).

Do total infiltrado, parte flui pelo fluxo de base até chegar a uma zona de descarga, e outra parte é responsável pela recarga efetiva do aquífero, isto é, representa parte da água subterrânea disponível para irrigação a partir de poços tubulares.

Além disso, o Aquífero Batalha é responsável por alimentar o aquífero fraturado sotoposto composto pelas rochas do Grupo Canastra, sendo que a recarga desse aquífero se dá por meio de anisotropias e que aqui é denominada de recarga profunda.

O escoamento superficial foi considerado desprezível devido ao relevo plano e pela alta capacidade de infiltração observada pelos solos da área de estudo. Este tipo de escoamento é apenas observado em vias de acesso e mesmo nestes casos práticas protecionistas, com instalação de baciões, terraços e trincheiras resultam em ampla limitação.

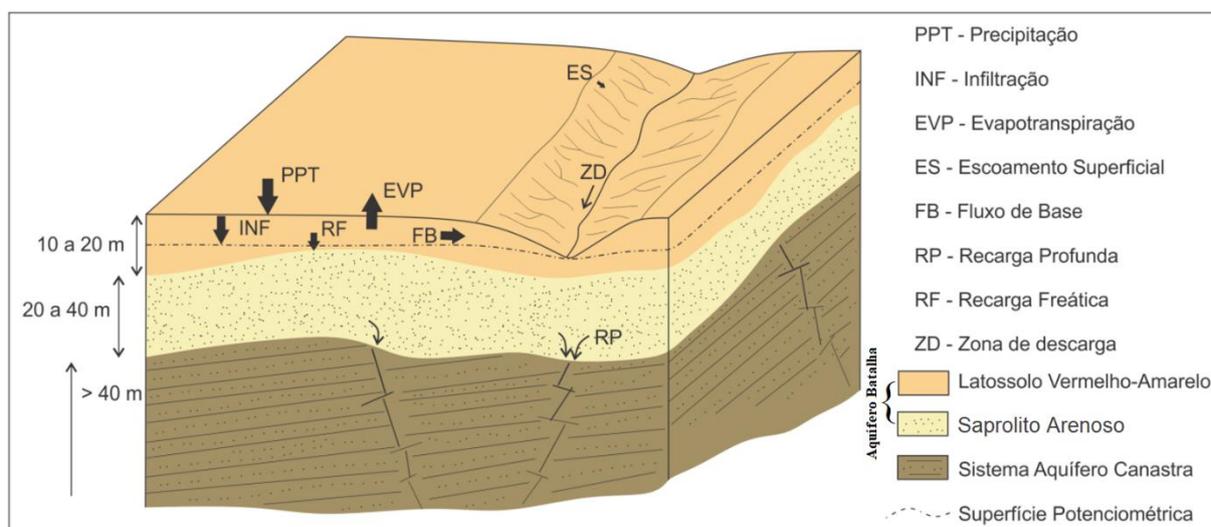


Figura 3.21. Modelo conceitual de fluxo para a região de estudo, indicando os principais processos envolvidos no sistema, e como ocorrem as transferências de águas do Aquífero Batalha para os cursos d'água e para o aquífero fraturado sotoposto.

Para que ocorra a manutenção das nascentes e cursos d'água e que sempre ocorra água disponível no aquífero, é de suma importância que o sistema hidrológico como um todo esteja em equilíbrio, ou seja, que o fluxo de entrada (precipitação) seja sempre maior ou igual à soma do fluxo de saída, o qual envolve também as vazões extraídas pelos poços tubulares para a irrigação, onde parte da água armazenada nos aquíferos é transferida para um reservatório e posteriormente lançada sobre as lavouras, sofrendo perdas por evaporação e por evapotranspiração das lavouras.

3.10 Qualidade das Águas

Neste trabalho também foi realizado o levantamento de alguns parâmetros que permitiram avaliar a qualidade da água oriunda do Aquífero Batalha, onde foram coletadas 24 amostras em veredas, poços tubulares, reservatórios e cisternas. Os parâmetros foram obtidos através de análise in situ com o auxílio da sonda multiparâmetro YSI Professional Plus e sonda HQ 40d da Hach Instruments, com determinação de condutividade elétrica (CE), temperatura, pH, total de sólidos dissolvidos (TDS) e quantidade de oxigênio dissolvido (OD). Do total de amostras coletadas 20 foram amostradas para análise de nitrato em laboratório, as quais foram realizadas pelo Laboratório da CAMPO Análises com sede na cidade de Paracatu/MG. Os resultados obtidos para os parâmetros medidos se encontram na Tabela 3.5 e a Figura 3.22 mostra os locais típicos de realização das análises in situ.

A temperatura média obtida para as águas do Aquífero Batalha apresenta média de 23 °C, e a menor temperatura de 20,4°C foi obtida em curso d'água superficial de vereda (ponto PGN-95), já fora dos domínios do reservatório subterrâneo.

Os valores de pH se apresentam levemente ácidos indicando coerência com o tipo de reservatório e correlação com a água da chuva. Em alguns casos o pH é neutro (próximo de 7,0), o qual é relacionado à dissolução de fragmentos de rochas carbonáticas utilizadas como pré-filtro, sendo observada apenas em poços sem bombeamento recente. A Figura 3.23 mostra a distribuição dos valores de temperatura e pH de acordo com o local de realização da coleta.



Figura 3.22. Análise e coleta de amostra d'água (subterrânea e superficial).

Tabela 3.5. Dados dos parâmetros analisados.

Ponto	X	Y	Coleta	Data	T (°C)	pH	CE µS/cm	TDS (mg/L)	OD (mg/L)	Nitrato (mg/L)
PGN-18	260731	8074475	Poço tubular em operação	set/17	23,40	7,15	7,46	-	-	-
PGN-19	260720	8074433	Poço tubular em operação	set/17	22,70	6,80	2,77	-	-	-
PGN-20	260661	8074435	Poço tubular em operação	set/17	22,50	6,69	3,51	-	-	-
PGN-21	260683	8074492	Poço tubular em operação	set/17	22,60	6,70	2,44	-	-	-
PGN-22	260716	8074485	Poço tubular em operação	set/17	23,40	6,72	2,90	-	-	-
PGN-82	272139	8057838	Poço tubular ligado para a coleta	nov/18	22,90	6,80	-	102,00	-	0,20
PGN-84	268032	8057629	Poço tubular em operação	nov/18	23,00	5,90	-	50,00	-	0,20
PGN-85	266720	8056001	Piscinão	nov/18	24,40	7,12	14,30	64,00	1,34	0,20
PGN-86	263765	8054779	Poço tubular em operação	nov/18	23,00	6,45	54,20	65,00	0,90	0,20
PGN-87	263765	8054777	Poço tubular em operação	nov/18	23,20	5,14	19,10	23,00	0,75	0,20
PGN-88	261687	8047269	Vereda	nov/18	23,60	6,25	53,00	26,00	0,46	0,20
PGN-90	268009	8037435	Poço tubular em operação	nov/18	24,70	5,10	23,00	50,00	0,51	0,20
PGN-91	269922	8031605	Poço Aberto nunca bombeado	nov/18	23,10	6,86	274,70	368,00	0,29	0,20
PGN-92	269939	8030348	Poço Aberto nunca bombeado	nov/18	23,90	7,06	203,70	198,00	0,31	0,20
PGN-94	263995	8017767	Poço Aberto desativado	nov/18	24,10	6,69	122,00	129,00	0,18	0,55
PGN-95	268482	8065927	Vereda	nov/18	20,80	4,60	11,70	13,00	0,15	0,66
PGN-96	273923	8067996	Poço tubular ligado para a coleta	nov/18	22,80	6,29	91,00	101,00	0,17	0,20
PGN-96b	273923	8067996	Poço tubular em operação	nov/18	22,40	5,52	22,20	-	0,17	0,20
PGN-97	270917	8070786	Poço tubular ligado para a coleta	nov/18	22,80	5,51	57,80	113,00	0,19	0,20
PGN-97b	270917	8070786	Poço tubular em operação	nov/18	22,90	6,30	48,30	52,00	0,19	0,20
PGN-98	274860	8066480	Poço tubular em operação	nov/18	23,00	5,14	13,20	16,00	0,15	0,20
PGN-98b	274860	8066480	Poço tubular em operação	nov/18	22,90	5,44	15,20	16,00	0,14	0,20
PGN-99	260697	8074459	Piscinão	nov/18	22,40	6,00	8,40	8,00	0,14	0,20
PGN-100	258650	8085601	Cisterna	nov/18	22,50	5,51	7,50	22,00	0,13	0,20
Média					23,04	6,16	50,27	74,58	0,36	0,24
Mediana					22,95	6,30	19,10	50,00	0,19	0,20
Máximo					24,70	7,15	274,70	368,00	1,34	0,66
Mínima					20,80	4,60	2,44	1,00	0,13	0,20

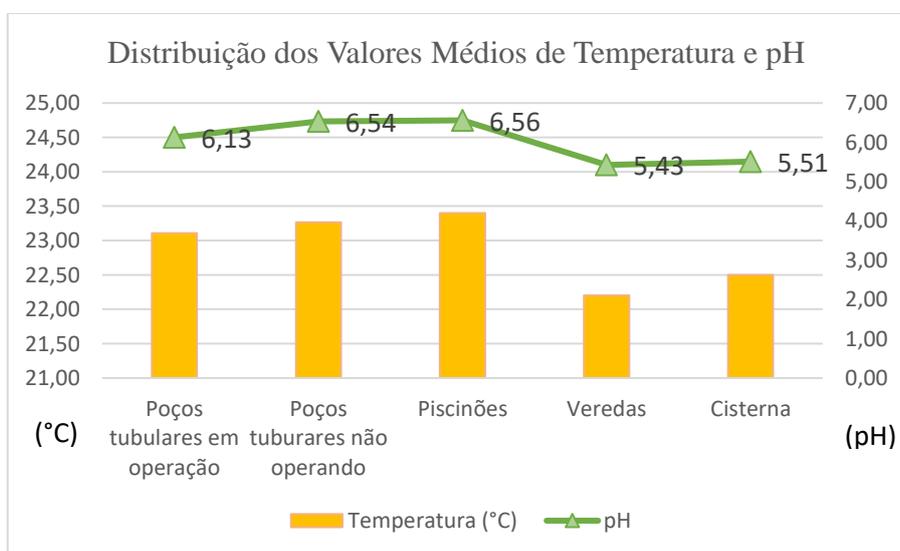


Figura 3.23. Gráfico da distribuição dos valores médios de temperatura e pH, ambos obtidos em campo.

Para análise dos valores de condutividade elétrica (CE), total de sólidos dissolvidos (TDS), oxigênio dissolvido (OD) e nitrato, os dados também foram agrupados de acordo com o seu contexto de coleta, onde se diferenciou os poços em operação rotineira, poços desativados ou sem bombeamento a algum tempo, além dos demais locais de coleta das amostras. A Figura 3.24 apresenta os valores obtidos para esses parâmetros.

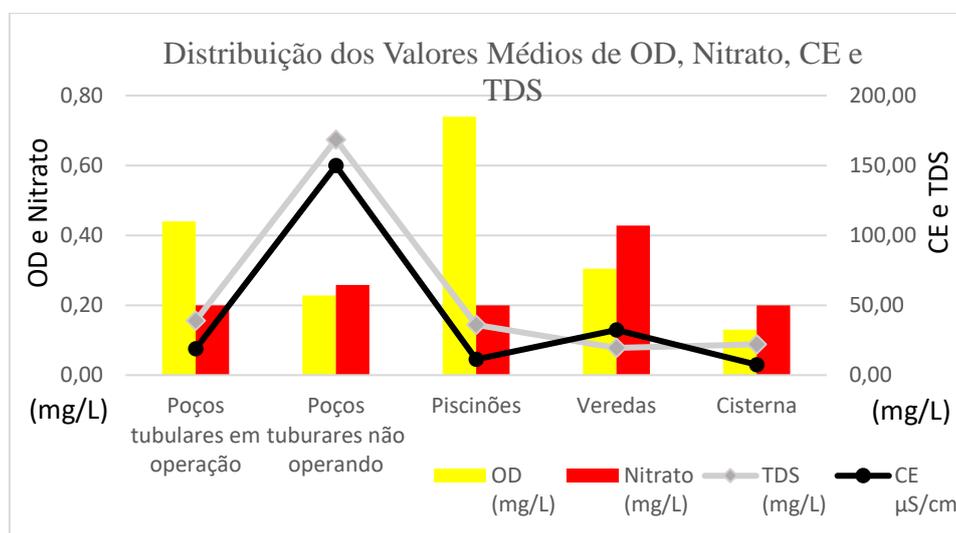


Figura 3.24. Gráfico da distribuição dos valores médios de oxigênio dissolvido (OD), condutividade elétrica (CE), total de sólidos dissolvidos (TDS) e nitrato.

A condutividade elétrica das águas medida em $\mu\text{S}/\text{cm}$ apresenta forte relação com o total de sólidos dissolvidos - TDS em mg/l . Segundo Feitosa *et al.* (2008) CE e TDS relacionam-se com fator de multiplicação que varia entre 0,55 e 0,75, exceto para águas salinas ($>0,75$) ou ácidas ($<0,55$).

A condutividade elétrica e o TDS dos poços com bombeamento rotineiro mostram valores muito baixos, o que é coerente com o tipo de aquífero estudado, composto pelo saprolito de material silicoso e, portanto, pouco solúvel. Já os poços desativados ou sem bombeamento recente apresentaram valores de CE e TDS considerados elevados, atribuídos à dissolução do material que compõe o pré-filtro, devido ao maior tempo em contato com o material usualmente composto por calcários e dolomitos.

A medição do teor de oxigênio dissolvido (OD) em águas superficiais objetiva avaliar a sua capacidade de manter a vida aquática, onde a maioria das espécies não resiste a concentrações de oxigênio dissolvido na água inferiores a $4,0 \text{ mg}/\text{L}$. Em águas subterrâneas, esse parâmetro apresenta concentrações muito baixas, uma vez que estas águas por não estão em contato direto com a atmosfera (Gonçalves *et al.*, 2009). No caso do Aquífero Batalha as concentrações de OD nas amostras analisadas apresentam média de $0,36 \text{ mg}/\text{L}$, onde os maiores valores de OD foram obtidos em piscinões, a média é da ordem de $0,74 \text{ mg}/\text{L}$ provavelmente pelo fato de existir contato

direto com a atmosfera que disponibiliza oxigênio para as águas destes reservatórios.

As análises de nitrato tiveram o objetivo de verificar a possível contaminação do aquífero devido ao uso continuado de fertilizantes diretamente sobre sua área de recarga. Os principais elementos químicos utilizados na fertilização dos solos são os popularmente denominados NPK, produzidos pela associação de por nitrogênio, fósforo e potássio solúveis. Pelo fato do potássio e do fósforo serem retidos pelo solo, devido a afinidade de cargas entre eles e as argilas e demais componentes dos solos, esses elementos não são esperados na composição da água. Entretanto, os compostos de nitrato podem ocorrer caso esteja acontecendo um excesso de aplicação de fertilizantes e a rápida infiltração de material lixiviado durante os períodos chuvosos.

Nesse contexto, os dados de 20 amostras coletadas e analisadas no Laboratório CAMPO Análises, não indicam ocorrência de contaminação por nitrato, onde a maior concentração (0,66 mg/L) ocorreu no ponto PGN-95. No entanto, os poços devem ser construídos de forma adequada, com a proteção sanitária devidamente instalada de modo a se evitar o contato direto do pré-filtro com a superfície. As maiores concentrações de nitrato foram identificadas nas veredas, isso se deve ao fato das análises terem sido realizadas durante o período chuvoso, onde a lixiviação do solo rico em fertilizantes, flui rapidamente para o interior das veredas.

Desta forma, pode-se afirmar que as águas do Aquífero Batalha apresentam boa qualidade, com semelhanças a água da chuva, devido as características inertes do material do aquífero, com pH levemente ácido e mineralização muito baixa e sem indícios de contaminação pelas práticas agrícolas da região, podendo ser aplicadas para qualquer tipo de uso considerado.

A amostra mais representativa da composição química das águas subterrâneas da região é aquela que foi obtida em poço tubular no ponto PGN-96b, que apresenta valores de condutividade elétrica de 22,2 $\mu\text{S}/\text{cm}$ e pH levemente ácido (5,2).

3.11 Potencial Regional

Como abordado anteriormente o Aquífero Batalha é um aquífero livre intergranular, formado por latossolos sotopostos a saprolitos arenosos provenientes do intemperismo químico de quartzitos do Grupo Canastra, localizado em região de chapada com elevadas ocorrências de precipitações, onde o relevo plano proporciona a infiltração de um volume considerável do total precipitado. O Aquífero Batalha também se caracteriza por vazões anômalas (média de 45,5 m^3/h) em poços relativamente rasos, propiciando um excelente custo benefício com relação à sua exploração. Estes fatores propiciaram o desenvolvimento da agricultura irrigada na sua região de ocorrência, promovendo o desenvolvimento e agregando valor às propriedades rurais localizadas sobre sua área de distribuição.

Tendo em vista essas características físicas, entende-se que outras regiões também podem

apresentar potencial hídrico similar ao do Aquífero Batalha, propiciando a elevação do desenvolvimento econômico em outras propriedades localizadas em mesmo contexto geológico, geomorfológico e climático.

Em sequência serão apresentadas regiões de chapada conhecidas com aspectos geológicos e climáticos similares ao da região de Paracatu/MG e Guarda/Mor.

Não muito distante a área de ocorrência do Aquífero Batalha, mais precisamente a 61 km a Sul do município de Guarda-Mor/MG, já nos limites do município de Coromandel/MG, se encontra uma área de chapada sustentada pelas mesmas litologias (quartzitos da Formação Serra da Batalha) precursoras do Aquífero Batalha, denominada de Chapada do Pau-Terra. Esse contexto leva a crer que essa área possui potencial hídrico similar ao encontrado na região de Paracatu/MG e Guarda-Mor/MG.

Outras Unidades geológicas também apresentam rochas siliciclásticas capazes de formar saprolitos arenosos similares aos descritos na Formação Serra da Batalha e também sustentam áreas planas e elevadas com alto potencial de recarga. Os quartzitos do Grupo Paranoá são um exemplo deste tipo de unidade regional, os quais sustentam diversas áreas de chapadas entre os estados de Goiás e Minas Gerais, que apresentam potencial hídrico alto no aquífero profundo, onde dados do Distrito Federal de Campos (2010) estimam uma vazão média considerável (12,0 m³/h) para o domínio fraturado, representado pela unidade R₃/Q₃ do Grupo Paranoá. A partir das feições dos aquíferos fraturados em profundidade estima-se a possibilidade de ocorrência de espessos mantos de intemperismo com elevado potencial hídrico associado a um aquífero inconsolidado.

A Figura 3.25 apresenta alguns exemplos de chapadas e serras com características hidrogeológicas e provável potencial hídrico elevado similar ao do Aquífero Batalha, o que poderia de certo modo, agregar valor as terras e promover o desenvolvimento da prática da agricultura irrigada nessas áreas.

Além da similaridade geológica e geomorfológica, essas áreas estão inseridas em mesmo contexto climático, o que possibilita estimar igualmente elevados altos índices de recarga natural dos aquíferos.

A localização e breve descrição dessas áreas são apresentadas a seguir:

- **Chapada do Pau-Terra** - localizada no município de Coromandel/MG, cortada pela rodovia MG-188 a menos de 60 km a sul (no mesmo *trend* geológico/estrutural) do Aquífero Batalha. A Chapada do Pau-Terra é sustentada pelos quartzitos da Formação Serra da Batalha com cotas superiores a 1000 metros. Assim como o Aquífero Batalha, o principal uso e ocupação de sua área de abrangência é caracterizado pela agricultura em grandes propriedades. Com agricultura irrigada restrita a dois pivôs centrais, que hoje captam água de vereda próxima.

- **Serra do Bonito** - situada no limite entre os estados de Goiás e Minas Gerais, nos municípios de Formosa/GO e Buritis/MG. A Serra do Bonito se encontra geomorfologicamente como uma ampla mesa, com relevo plano e cotas variando entre 800 m na base e superiores a 1070 m no topo, sendo sustentada por quartzitos do Grupo Paranoá. A agricultura de sequeiro se configura como principal uso da terra, podendo expandir sua produção caso o potencial hídrico subterrâneo se confirme.
- **Serra do Paranã** - a Serra do Paranã se inicia no limite entre os municípios de Formosa e Planaltina, ambos no estado de Goiás, avançando aproximadamente 145 km a norte até o município de Alto Paraíso de Goiás. Assim como a Serra do Bonito a Serra do Paranã é composta em sua maioria por quartzitos do Grupo Paranoá (Campos *et al.* 2013), formando relevo plano a suave ondulado em seu topo, em cotas superiores a 1200 metros.
- **Serra de Caldas-Novas** - localizada entre os municípios de Caldas-Novas/GO e Rio Quente/GO, a Serra de Caldas-Novas é uma janela estrutural em que afloram rochas do Grupo Paranoá, compostos predominantemente nessa área por quartzitos (Campos *et al.* 2013). A vegetação natural da área se encontra preservada, o que favorece maiores taxas de recarga, sendo a principal área de recarga para os poços de águas termais existentes em sua base. No entanto, caso o potencial hídrico do aquífero intergranular se confirme, sua exploração não poderá ocorrer, uma vez que a chapada da Serra de Caldas-Novas representa uma Unidade de Conservação (Parque Estadual da Serra de Caldas Novas - PESCAN / MMA, 2019).

Assim como as áreas acima citadas, outras áreas de chapadas e em outras unidades geológicas podem apresentar contexto hidrogeológico similar ao do Aquífero Batalha, podendo aumentar a produção agrícola dessas regiões a partir da prática da agricultura irrigada.

Vale ressaltar que as áreas acima descritas não possuem potencial hídrico subterrâneo confirmado para o aquífero intergranular, necessitando de estudos específicos antes de qualquer investimento nesse sentido.

Ainda se espera que as formas de captação sejam as mesmas, isto é, instalação e operação de poços tubulares relativamente rasos, com vazões anômalas e sujeitos às mesmas regras de gestão as que o Aquífero Batalha deverá ser submetido. A técnica de perfuração e construção dos poços deverá ser similar, incluindo: perfuração a trado mecanizado com circulação de lama e instalação de coluna de revestimento e filtro, com espesso envelope de pré-filtro com granulometria adequada para contenção de areia fina a média.



Figura 3.25. Áreas de chapada em mesmo contexto geológico, geomorfológico e climático em que o Aquífero Batalha se encontra.

Capítulo 4

PROPOSTAS PARA GESTÃO

A seguir é apresentada uma discussão em que se pretende integrar os dados apresentados anteriormente em uma perspectiva de contribuir com a gestão do aquífero em estudo, incluindo aspectos críticos quanto aos métodos de construção dos poços, riscos inerentes ao aquífero e ações para a gestão sustentável deste importante manancial de água.

4.1 Construção Adequada dos Poços Tubulares de Produção

Tendo em vista o incremento do número de poços tubulares no Aquífero Batalha nos últimos anos, motivado pela crescente demanda por água para a irrigação na região e aos diversos problemas construtivos observados nos poços tubulares existentes, tais como produção de areia (que assoreia os reservatórios de irrigação), necessidade continuada de reposição de material pré-filtro, ocasionais queimas de bombas e desmoronamento de poços, é pertinente destacar que a estrutura dos poços tubulares já existentes apresenta graves problemas quanto aos seus projetos e execução das obras.

Neste tópico serão discutidos os métodos atualmente adotados para a construção dos poços e serão apresentadas sugestões para o melhor desempenho dos poços e aumento de sua vida útil.

A descrição de amostras de calha coletadas de poços recém-construídos revela a presença de grãos de areia de granulometria fina a média (aquífero), ocasionalmente grossa (Figura 4.1). Além disso, descrevem-se também grânulos de dolomito e filito (pré-filtro) com até 0,2 mm. Esta situação permite concluir que a escolha do material para o preenchimento do espaço anelar dos poços é inadequada do ponto de vista físico, pois permite o carreamento de partículas sólidas para o interior do poço, além de que o pré-filtro comumente utilizado apresenta-se muito grosso e mal selecionado. Nos trabalhos de campo foram observados pré-filtros principalmente composto por fragmentos de rocha carbonática (calcário e dolomito) variando de 0,7 a 1,5 cm de comprimento e em alguns localmente com fragmentos muito grossos alcançando 5,0 cm de eixo maior (Figura 4.2). Este material não é propriamente produzido como um pré-filtro de poços, mas para aplicações em obras civis na forma de agregado graúdo (brita).

O bombeamento continuidade das partículas sólidas que compõem a formação é prejudicial às bombas, levando, em casos extremos, ao desgaste a à queima dos equipamentos.



Figura 4.1. Amostra de calha coletada durante a perfuração do poço. Foto adquirida em lupa de mesa (zoom de 8X). Composto por grãos de quartzo mal selecionados.



Figura 4.2. Pré-filtro comumente utilizado nas construções de poços da região. Composto por fragmentos de dolomitos de granulometria grossa a muito grossa.

Além do ponto de vista físico, quimicamente o material utilizado como pré-filtro é equivocadamente, pois sua composição majoritariamente carbonática é inerte. Como consequência, os grânulos são continuamente dissolvidos ao longo do tempo, causando, principalmente, redução de granulometria, permitindo assim sua passagem através dos orifícios do filtro, além de alterações nas condições físico-químicas das águas, especialmente quanto ao potencial hidrogeniônico (pH) e aos valores de TDS e CE.

Em geral a coluna de revestimento é instalada imediatamente após a perfuração, sendo constituída de PVC Geomecânico com diâmetro de 6 polegadas, e as entradas d'água ocorrem através de ranhuras perfuradas no próprio tubo de revestimento.

Com relação aos problemas de queimas de bombas, cabe ressaltar a inexistência, na maioria dos empreendimentos, de um sistema elétrico automático de desarme das bombas (relês de nível), os quais protegem todo o sistema elétrico e as bombas em situações de bombeamento prolongado e rebaixamento do nível dinâmico maior que o usual.

Finalmente, uma falha grave para as obras avaliadas é a inexistência de qualquer tipo de isolamento sanitário, ainda que haja uma laje delgada de concreto de 1,0 m x 1,0 m. Na ampla maioria dos poços visitados há contato direto do pré-filtro com a superfície (Figura 4.3). Esta situação permite a fácil e rápida percolação de águas de chuva ou irrigação, que carregam resíduos de fertilizantes ou mesmo resíduos sólidos e líquidos advindos do maquinário utilizado para manutenção das áreas plantadas, sendo, portanto, caminhos de contaminação direta para o recurso hídrico subterrâneo.



Figura 4.3. Situação comum a todos os poços existentes na região do Aquífero Batalha. A brita em torno do tubo de aço é diariamente colocada no espaço anelar do poço, por meio de um pequeno orifício na laje de concreto existente.

Para fins de consulta e certificação de que a empresa contratada realize uma obra segundo as normas técnicas vigentes, o contratante pode se referir às normas técnicas emitidas pela Agência Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) de números 12212 e 12244, as quais contemplam desde as diretrizes para a elaboração de um projeto de poço tubular profundo até sua execução.

Em síntese e como forma de complemento ao previsto por estas normas, pode-se sumarizar que o método de perfuração adotado (rotativa com percolação de lama) é condizente com a realidade geológica local e representa um bom custo-benefício. Contudo, a escolha do material pré-filtro, obrigatória para a situação de aquífero intergranular inconsolidado, é inadequada tanto física quanto quimicamente. Vale destacar ainda, a importância de um método criterioso de colocação deste material pré-filtro. Em vista da necessidade de que este seja bem empacotado, de forma a garantir a menor quantidade possível de espaços vazios e, conseqüentemente, estabilidade

para a estrutura como um todo, o simples padeamento não é prática aconselhável. Dentre as melhores técnicas, destacam-se aquela de contra fluxo e de circulação reversa.

De modo a se evitar os problemas associados a produção de areia por esses poços, recomenda-se a utilização de pré-filtro de granulometria fina de 0,4 a 0,6 cm de diâmetro, composto por material e quimicamente inerte, de preferência de material silicoso. Vale ressaltar que a redução da granulometria do pré-filtro não acarretará na diminuição da vazão no poço.

Também se sugere uma maior abertura da coluna de perfuração (10”), com adição de um volume maior de pré-filtro, podendo manter o diâmetro do revestimento comumente utilizado (6”). Com essa medida espera-se o maior aproveitamento da produtividade e da vida útil dos poços.

Por fim, é fundamental a concretagem do espaço anelar de pelo menos dos primeiros metros do poço, de forma a garantir o isolamento sanitário do sistema aquífero, como já discutido. Uma medida de precaução e até mesmo necessária para o cenário em questão é a previsão em projeto de um tubo repositor de pré-filtro que atravesse o espaço anelar a ser concretado e que seja protegido por um *cap* rosqueado na sua porção superior (Figura 4.4).

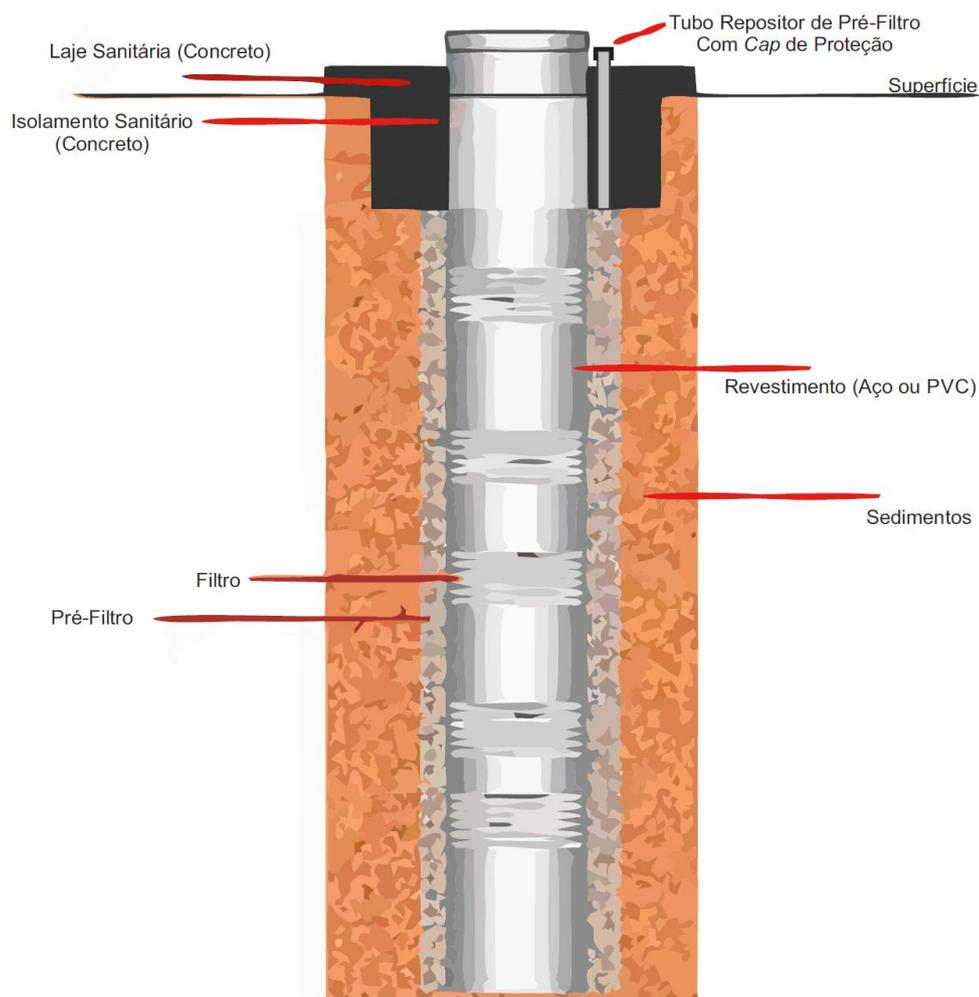


Figura 4.4. Perfil construtivo ideal para poços instalados no Sistema Aquífero Batalha. Notar importância da existência de um isolamento sanitário na porção superior da coluna de revestimento. Adaptado de AS - Geotecnia, Meio Ambiente e Poços Artesianos.

O intuito é permitir a manutenção da estrutura ao longo da vida útil do poço, uma vez que, pode haver falhas no empacotamento durante a construção do poço ou mesmo em função dos constantes períodos de bombeamento, que podem carrear alguma quantidade de finos para o interior dos poços e provocar pequenas colmatações em longo prazo (limite máximo permitido por norma técnica (NBR 12244): 10g de areia por m³ de água).

4.2 Minimização dos Riscos de Sobreexploração

A sobreexploração se caracteriza pela retirada de água subterrânea que ultrapassa os limites de produção das reservas exploráveis do aquífero, gerando o rebaixamento do nível potenciométrico que provocará danos ao meio ambiente ou ao próprio recurso, com secamento de nascentes e poços antigos menos profundos sem água. Portanto, a água subterrânea pode ser retirada de forma permanente e em volumes constantes, por muitos anos, desde que esteja condicionada a estudos prévios do volume armazenado no subsolo e das condições climáticas e geológicas de reposição.

No tópico 3.8 foi estimado que o valor da reserva explorável do Aquífero Batalha corresponde a 446.959.458 m³/ano (quatrocentos e quarenta e seis milhões, novecentos e cinquenta e nove mil e quatrocentos e cinquenta e oito metros cúbicos por ano). Já a soma das vazões outorgadas dos 220 poços cadastrados na SUPRAM/NOR corresponde a 9.963,28 m³/h, os quais são autorizados a bombear durante 20h/dia ao longo de todo o ano. Considerando que todos os poços cadastrados bombeiam durante todo o período o qual são autorizados, o volume anual de água subterrânea extraído desses poços corresponde a 72.731.944 m³/ano, ou seja, apenas 16,3% da reserva explorável do Aquífero Batalha. Logo, pode-se afirmar que com os dados levantados por esse trabalho, não está ocorrendo sobreexploração desse aquífero.

No entanto, deve se ressaltar que os valores das reservas calculados são estimados e que para se garantir a melhor precisão dos cálculos é de fundamental importância que os parâmetros dimensionais, como a porosidade eficaz, sejam obtidos através de estudos específicos, além do monitoramento da variação do nível estático seja realizado em vários locais do aquífero através de poços de monitoramento e que este seja realizado durante um longo período de tempo.

Outro aspecto relativo ao risco de sobreexploração se refere ao fato da necessidade de que a gestão dos aquíferos seja realizada localmente. Um aquífero pode ser totalmente exaurido em uma área de ocorrência sem que nenhum rebaixamento seja observado em outras porções de sua poligonal. Desta forma, os cálculos de reservas e avaliação da exploração devem ser realizados para diferentes unidades de gerenciamento. Para o caso específico do Aquífero Batalha, como as propriedades são representadas por grandes fazendas, as estimativas de reservas e disponibilidades

hídricas devem ser feitas para cada propriedade.

Nesse contexto, também se faz necessário maior detalhamento dos limites do Aquífero Batalha, visto que este trabalho teve como objetivo a sua delimitação de forma regional. Com isso, sugere-se a realização de mapeamento geológico de detalhe em escala 1:25.000, bem como a realização de levantamentos pedológicos e geomorfológicos em maior escala e mais seções geofísicas em locais em que não existam poços tubulares.

Também é de conhecimento que existem centenas de outros poços tubulares não cadastrados na base de dados da SUPRAM/NOR ou aguardando emissão de outorga, elevando consideravelmente o volume do aquífero a ser explorado.

Como recomendação para o melhor acompanhamento do uso das reservas hídricas, este trabalho propõe a compartimentação do Aquífero Batalha em sete áreas conforme Figura 4.5, as quais foram individualizadas de acordo com as áreas de recarga do aquífero. Para tanto, estas áreas devem ser dotadas de poços de monitoramento para medição das variações mensais dos níveis estático ao longo do tempo, bem como pluviômetros instalados para se obter dados de precipitação anual da área, devido a variabilidade espaço-temporal da precipitação total. Como exemplo dessa variação tem-se os dados da estação automática de Guarda-Mor que registrou no ano de 2013 uma precipitação total de 1800 mm e no ano de 2015 foram registrados apenas 600 mm, o que afeta consideravelmente a de recarga do aquífero.

Nesse contexto, as estimativas de reservas hídricas devem ser realizadas periodicamente conforme os dados obtidos ao longo dos anos anteriores e utilizadas no gerenciamento e controle de outorgas.

Outro fator a ser abordado corresponde a utilização dos volumes irrigados para o cálculo das reservas hídricas. Essa prática foi observada em relatórios ambientais dos processos de outorga, no entanto, a soma do volume irrigado à precipitação só pode ser realizada caso a irrigação esteja ocorrendo de forma ineficiente, ou seja, de forma que se irriga volumes superiores aos necessários a cultura, que além de dispendioso é prejudicial as plantas e pode desencadear processos erosivos. Para esse trabalho foi considerado que todos os projetos de irrigação existentes na área do Aquífero Batalha são eficientes, sendo aplicado para irrigação somente o necessário ao desenvolvimento das culturas e que o excedente é perdido pelo processo de evapotranspiração, não ocorrendo recarga acidental pela irrigação.

Outro aspecto relativo à sobreexploração é a interferência potencial com os exutórios superficiais. Neste sentido, foi determinado que o divisor subterrâneo situa-se próximo ao divisor hidrográfico, na porção mais a leste da quebra de relevo que define a chapada em que o aquífero está situado (Figura 4.5). A determinação do divisor das bacias hidrogeológicas foi possível a partir da integração dos seguintes dados: relevo aplainado, sistema de aquífero homogêneo e isotrópico, dados potenciométricos (mesmo que de baixa densidade) e padrão do sistema de

drenagem superficial.

A partir da avaliação relativa ao divisor hidrogeológico, fica claro que a eventual sobreexploração ou pressão de bombeamento sobre o Aquífero Batalha deverá afetar nascentes e vazões de veredas situadas na porção oeste da chapada divisora do relevo. Os cursos d'água situados na porção a leste (abaixo da quebra de relevo que define a Serra da Tiririca) não são alimentados pela descarga de base do Aquífero Batalha e, portanto, não são afetados pelo uso e exploração de suas águas.

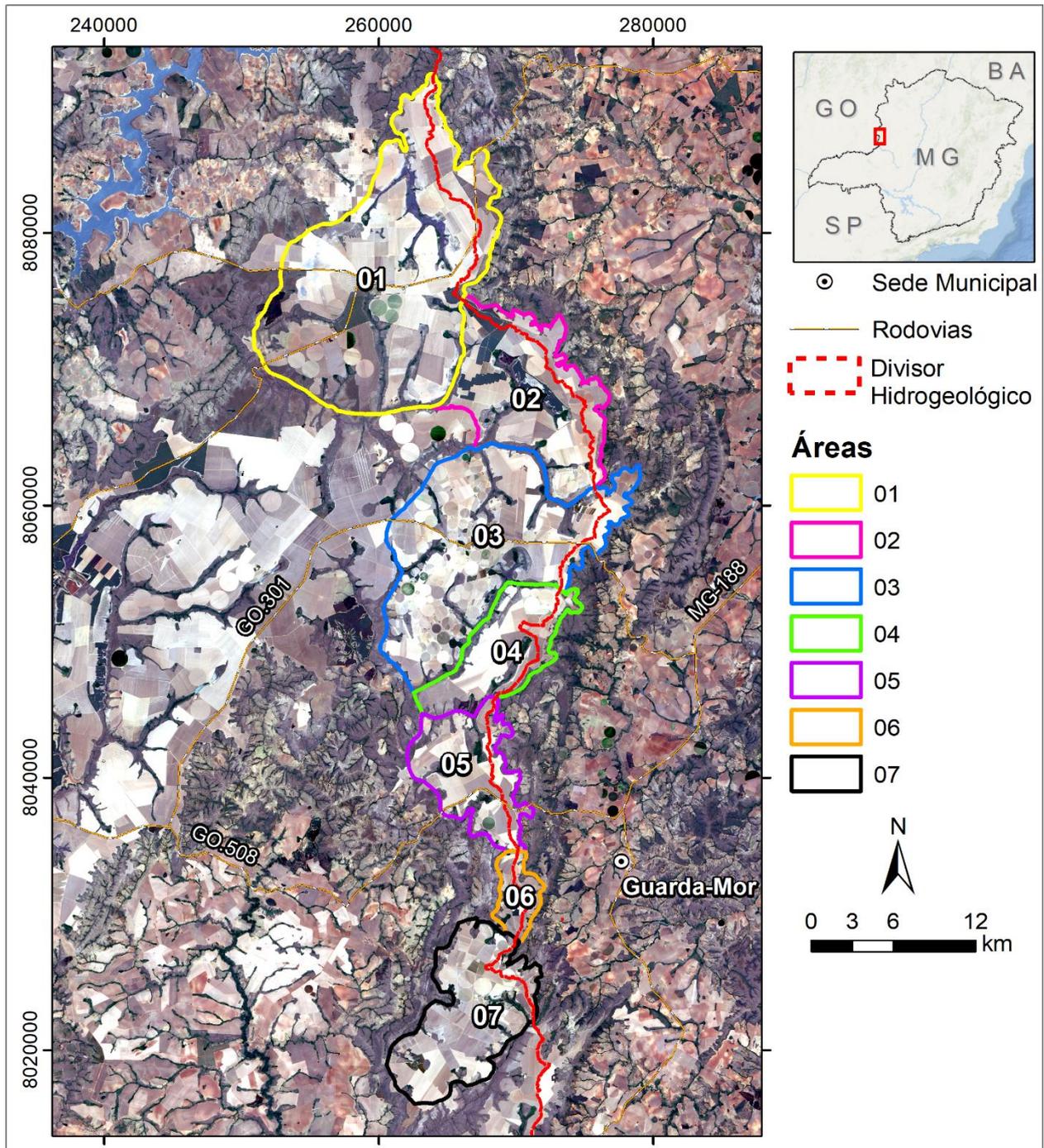


Figura 4.5. Sugestão de compartimentação do Aquífero Batalha para realização dos cálculos de estimativas de reservas hídricas. Limite aproximado do divisor hidrogeológico no âmbito do Aquífero Batalha.

Os objetivos dos poços de monitoramento são acompanhar o aquífero, principalmente quanto a flutuações do nível estático ao longo do tempo, bem como permitir a coleta de amostras de águas em áreas livres de interferências antrópicas. Para estes fins, é fundamental que os poços estejam fora do raio de influência de poços produtores, além de seguir critérios mais rigorosos de construção. A Figura 4.6 ilustra um projeto de poço de monitoramento.

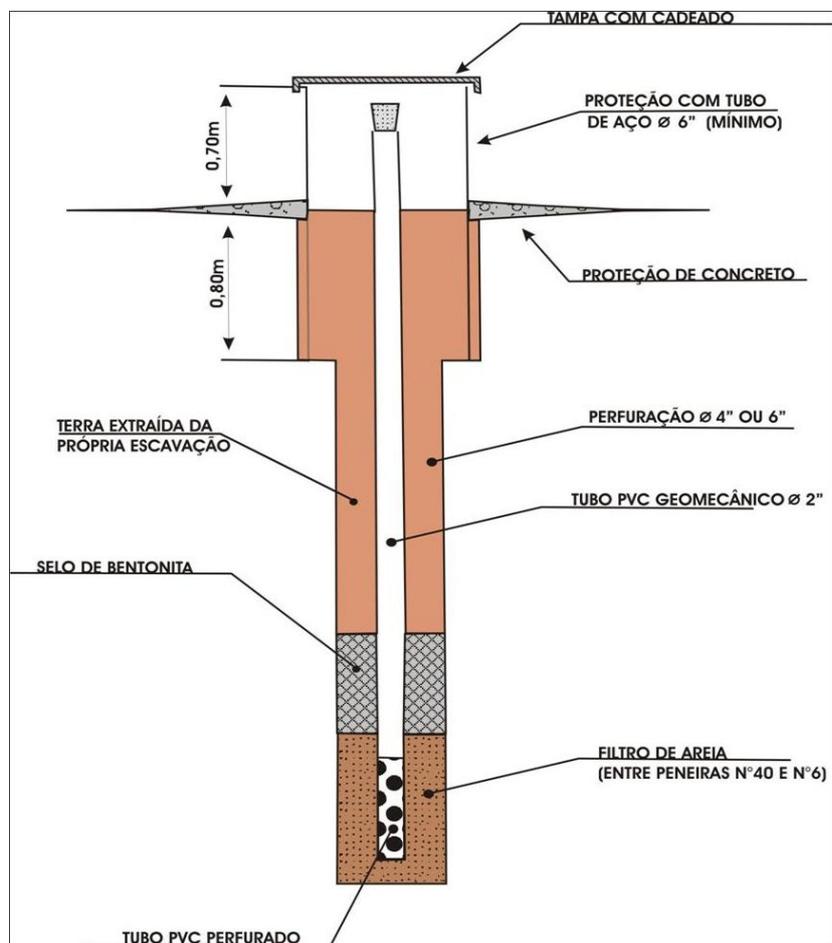


Figura 4.6. Perfil construtivo de um poço de monitoramento adequado ao contexto geológico local. Poço simples com seção de filtro curta. Observação: utilizar PVC ao invés de aço carbono como material de revestimento.

Dentre os principais aspectos, destaca-se a não necessidade de perfurações profundas (20 a 30m), além do menor diâmetro dos tubos de revestimento (2") e a existência de uma única seção filtro na parte mais profunda da estrutura, sendo que esta deve ser quase que imediatamente protegida por uma camada de bentonita. Em função destes aspectos, o método de perfuração mais adequado seria o uso de uma sonda rotativa, pois garante-se maior controle do diâmetro de perfuração durante a execução da obra. Vale lembrar que, por ser o aquífero inconsolidado, é necessário a circulação de algum material estabilizante durante a obra com uso de sonda rotativa. Apesar da lama bentonítica ser o mais comum, esta precisaria ser muito densa para alcançar o efeito desejado, podendo assim causar perda de porosidade do aquífero por impregnação do material nas paredes do poço. Desta forma, recomenda-se o uso de polímeros (*polysafe*), um

material que substitui a lama e apresenta a vantagem de ser degradável e facilmente removível durante a etapa de desenvolvimento do poço.

As coordenadas das locações dos poços de monitoramento se encontram na Tabela 4.1, e plotados no Mapa Hidrogeológico do Aquífero Batalha (Apêndice I). Destaca-se que para a locação foram considerados os seguintes critérios: região distante de poços de produção e áreas com baixa taxa de compactação e uso (distância mínima de estradas e pátios de galpões de fazendas).

Tabela 4.1. Tabela das propostas de locação dos poços de monitoramento para as sete áreas.

Área	Poço de Monitoramento	Coordenadas UTM Zona 23S	
		X	Y
01	PM-01	256104,6	8071177,9
	PM-02	262417,3	8074127,2
	PM-03	256420,8	8076795,6
	PM-04	265825,6	8082021,9
02	PM-05	274160,4	8064252,0
	PM-06	268529,2	8072853,5
03	PM-07	263951,3	8054147,3
	PM-08	272603,0	8056537,1
	PM-09	269374,5	8057792,3
	PM-10	261871,9	8057882,9
04	PM-11	267002,3	8046966,4
	PM-12	270681,2	8051958,5
05	PM-13	268537,5	8037020,3
	PM-14	266997,7	8040006,2
06	PM-15	269977,6	8029038,7
	PM-16	270977,7	8030872,2
07	PM-17	264778,9	8019429,2
	PM-18	266402,2	8026004,5

Como justificativa final, o monitoramento em longo prazo permitirá a elaboração de uma base de dados que, por sua vez, também fornecerá dados sobre os *backgrounds* químicos das águas da região, isto é, determinar a composição química natural das águas do aquífero, facilitando assim a identificação de situações de eventual contaminação. Além disso, a avaliação mensal do nível estático de poços em locais livres de bombeamento permite o cálculo de forma mais consistente das taxas anuais de recarga e das reservas hídricas locais (Healey & Cook, 2002), essenciais para a gestão sustentável do recurso hídrico subterrâneo.

Recomenda-se que a área em torno dos poços seja protegida com cercas, a fim de se evitar acidentes que danifiquem a estrutura dos poços. Finalmente, é importante estabelecer um

cronograma de medição de nível estático e mensuração de parâmetros físico-químicos *in situ* com periodicidade mensal, preferencialmente no mesmo dia do mês e na mesma hora do dia, sendo esta, definida pelo fim de um período em que não haja poços produtores em atividade durante pelo menos 12 horas contínuas. Idealmente os poços a serem medidos devem estar, a no mínimo, dois quilômetros de poços em bombeamento.

4.3 Minimização do Risco de Contaminação

O Aquífero Batalha se encontra na zona rural dos municípios de Paracatu/MG e Guarda-Mor/MG e sua área é ocupada por grandes propriedades rurais cuja atividade principal é a agricultura de grãos. Logo, atualmente o maior risco de contaminação para as águas do Aquífero Batalha se restringe as aplicações sucessivas de fertilizantes que auxiliam no desenvolvimento das culturas. Em menor proporção, existem os riscos de contaminações por vazamento de tanques de armazenamentos de combustíveis, óleos e graxas oriundos da limpeza do maquinário agrícola, além de fossas sépticas instaladas nas propriedades.

Já a vulnerabilidade do aquífero está relacionada às propriedades físicas do aquífero, por se tratar de um aquífero livre e intergranular e somado ao grande número de poços tubulares instalados e construídos de forma inadequada, que podem se comportar como vetores diretos de infiltração de contaminantes.

Neste contexto, recomenda-se o monitoramento semestral de parâmetros físico-químicos de qualidade da água, como pH, TDS, CE e NO_3 , tanto nos poços de monitoramento anteriormente recomendados, quanto exutorios em veredas e poços tubulares existentes. Também se recomenda o monitoramento de hidrocarbonetos, devido ao risco de contaminação por combustíveis, óleos lubrificantes e graxas provenientes dos maquinários agrícolas e tanques de armazenamento, que devem ser armazenados de forma adequada e com proteções exigidas nas normais legais.

Em relação aos riscos de contaminação por fertilizantes, Jadoski *et al.* (2010) advertem para o risco da lixiviação de nitrato considerando a prática intensiva da fertilização nitrogenada associada com irrigação abundante. Em caso de ocorrência de contaminação por fertilizantes espera-se detectar com o monitoramento das concentrações de nitrato (NO_3), uma vez que os demais compostos presentes nos fertilizantes, como fósforo e potássio, apresentarem potencial de retenção no solo, não sendo esperados na composição química da água. Da mesma forma inúmeros autores relatam a influência de compostos nitrogenados na qualidade das águas subterrâneas (Hirata *et al.*, 1993; Luiz *et al.*, 2004).

Vale ressaltar que não foram identificados nas análises químicas realizadas por este trabalho indícios de contaminações na área do Aquífero Batalha, no entanto, a elevada vulnerabilidade do aquífero, somada a grande importância, tanto econômica quanto ambiental, requerem ações imediatas para minimização de desenvolvimento deste processo potencial, como a exigência de

isolamento sanitário nos primeiros metros dos poços e aplicações de sanções aos proprietários de poços abertos e sem proteção sanitária, assim como observado em dezenas de poços tubulares na região, principalmente aqueles que aguardam liberação de outorga de direito de uso (Figura 4.7).



Figura 4.7. Poço tubular aberto sem isolamento sanitário (pré-filtro em contato direto com a superfície). Vetor para a rápida percolação de águas da chuva ou irrigação e de materiais lixiviados. Diâmetro do revestimento de 6 polegadas.

4.4 Otimização das Condições de Recarga

A recarga do aquífero corresponde ao fluxo de água descendente que infiltra até o topo da zona saturada do aquífero cujo volume infiltrado contribui ao volume armazenado. Em aquíferos sem exploração de seus recursos, o valor anual médio da recarga equivale aos valores das descargas naturais (veredas e nascentes).

Como mencionado no tópico 3.7 as condições de recarga no Aquífero Batalha são consideradas muito boas, sendo caracterizadas por latossolos espessos e estruturados, em área de chapada de relevo plano a suave ondulado, com elevado índice pluviométrico e usos que não promovem a impermeabilização ou compactação da superfície. As baixas declividades favorecem o fluxo descendente com escoamento superficial restrito aos locais de maior declividade, geralmente próximos as veredas. Neste contexto, pode-se afirmar que as áreas de recarga do aquífero Batalha são representadas pela própria área de ocorrência do aquífero, uma vez que não existem áreas topograficamente mais elevadas que possam contribuir com alimentação em direção ao aquífero.

No entanto, a retirada da vegetação para a prática da agricultura proporcionou o aumento do escoamento superficial, gerando a redução do volume infiltrado nos locais de maior declividade. Com isso, recomenda-se a utilização de práticas de retenção do escoamento superficial, como o taludamento em curvas de nível e a construção de pequenas barragens de retenção propostas pela

Embrapa e denominada de Sistema Barraginhas. Essas medidas devem ser aplicadas em áreas onde o escoamento superficial se concentra, podendo ser identificados por pequenos processos erosivos formados após os eventos chuvosos.

Segundo a Embrapa, o Sistema Barraginhas consiste na construção de pequenos barramentos de água de chuva (mini açudes) à frente de cada enxurrada perceptível em áreas de pastagem, lavouras e adjacências de estradas. O sistema se aplica bem na recuperação de solos degradados (compactados ou erodidos), resultantes da não observação de práticas conservacionistas do solo e, além disso, contribui para o recurso hídrico subterrâneo, pois a água da chuva captada por cada barraginha se infiltra no solo sucessivamente durante a estação chuvosa, proporcionando a recarga e a elevação do lençol freático, além do umedecimento de baixadas. Vale frisar que estas não devem ser instaladas sobre gleissolos, pois as regiões de ocorrência destes solos (encharcadas ou continuamente úmidas) são protegidas por lei de qualquer tipo de intervenção, excetuado casos específicos que aqui não se aplicam (Art. 4º da Lei 12.651).



Figura 4.8. Exemplo de “sistema barraginha” após evento de chuva. Imagem retirada da Circular Técnica nº 177 da EMBRAPA.

Ao conter as enxurradas (escoamento superficial), as barraginhas reduzem a erosão, o assoreamento e amenizam as enchentes. Ao reter a água da chuva, essas barraginhas proporcionam condições para que a água nelas represada infiltre no solo, atingindo assim o lençol freático (recarga). Depois que a água se infiltra por completo, o lençol freático tem seu volume aumentado e a barraginha está pronta para receber as águas das próximas chuvas. Esse processo se repetirá sucessivamente em todo o ciclo chuvoso. Com isso, surgem minadouros em períodos de pouca chuva, e os mananciais responsáveis pela manutenção de nascentes e as veredas se fortalecem.

A Embrapa recomenda que a construção de barraginhas ocorra durante a época mais úmida do ano, a qual se inicia após as duas primeiras chuvas e se estende de quatro a cinco meses após o encerramento do período chuvoso.

Uma observação é que as barraginhas devem se localizar em áreas altas do terreno

(inclinação inferior a 12%) e ao longo do caminho de encurradas, com o objetivo de frear o escoamento superficial e, assim, favorecer a infiltração.

4.5 Diminuição de Custos com Bombeamento

Os custos com energia elétrica representam a principal despesa na prática da agricultura irrigada, mas estes custos podem ser reduzidos com a adoção de projetos de irrigação eficientes e se evitando desperdícios, tornando ainda mais vantajoso o aproveitamento do manancial hídrico subterrâneo.

Bahia (1998) por meio do manual de orientações do PROCEL/ELETROBRAS, aponta que na prática de bombeamento de poços tubulares os desperdícios de energia elétrica são encontrados nos procedimentos operacionais existentes, no dimensionamento dos sistemas, na idade dos equipamentos, nas tecnologias não eficientes utilizadas, na falta de manutenções e no desperdício de água.

Perroni (2005) apresenta como alternativas para a redução dos custos com energia elétrica alguns fatores técnicos como a utilização de equipamentos de bombeamento de alto rendimento, redimensionamento dos sistemas de bombeamento e a modernização dos sistemas de acionamento e automação.

O valor de rendimento eletromecânico dos conjuntos motor-bomba apresenta um valor médio de cerca de 80%, valor esse trazido em catálogos e curvas de performance dos fabricantes de bomba submersas de alto rendimento. Mas, esse valor não condiz com o real, pois é seguro considerar que o valor de rendimento do conjunto pode ser de no máximo 76%. Entretanto, esse valor de rendimento chega a um valor de 85% para os demais componentes do sistema, o que resulta numa expectativa de rendimento global do sistema de no mínimo 65%. De acordo com os autores Perroni e Rodrigues (2004), esse valor foi obtido em condição real e pode ser, portanto, considerado viável de ser alcançado com equipamentos disponíveis no mercado.

Atualmente, para o dimensionamento de bombeamento a metodologia mais usual é a que utiliza projeções de rebaixamento do nível de água em um ciclo de bombeamento de 24 horas. Neste método não é considerado as respostas do aquífero para longos períodos de exploração e as interferências com outros poços circunvizinhos. Devido a esses fatores não considerados nesse tipo de dimensionamento os equipamentos de bombeamento irão operar a maior parte de sua vida útil fora do seu ponto de melhor rendimento. Por outro lado, pode ocorrer super-dimensionamento no início da operação caso seja adotada uma projeção do nível estático para o fim da vida útil da bomba, o que acarretaria em desperdícios de energia em válvulas estranguladoras do fluxo.

Diversos autores relatam que uma das principais causas do desperdício de energia em sistemas de bombeamento é a variação de carga na saída das bombas provocadas pelo acionamento de válvulas estranguladoras do fluxo, durante períodos de baixa demanda. Em poços tubulares um

problema adicional a este, é a variação de carga na entrada da bomba devida às variações do nível da água, que faz com que as bombas dos poços operem de forma distinta das estipuladas em seu dimensionamento.

Fatores como alteração da tensão de alimentação, desativação das instalações não utilizadas, correção do fator de potência, melhoria do fator de carga, e a minimização do funcionamento em horários de ponta (preferindo o bombeamento em horários noturnos), são algumas sugestões para se reduzir os custos operacionais com energia elétrica durante os períodos de bombeamento.

4.6 Otimização dos Métodos de Irrigação

Irrigação superficial, irrigação localizada (microaspersão e gotejamento) e irrigação por aspersão (pivô central e autopropelido) são as metodologias mais usuais para irrigação de culturas. Na irrigação superficial a água é conduzida para o ponto de infiltração diretamente pela superfície do solo, esse tipo é muito utilizado em irrigações por inundações, como por exemplo na produção de arroz. Na irrigação localizada a água é aplicada na área ocupada pelas raízes das plantas, formando círculos molhados ou faixas úmidas. Já na irrigação por aspersão é simulada uma chuva artificial onde um aspersor expelle água para o ar, que por aerodinâmica se transformam em pequenas gotículas de água que caem sobre a plantação.

As culturas de grãos como soja e feijão prevalecem na área de estudo, irrigadas por aspersão, uma grande desvantagem desse método de irrigação é o seu alto custo inicial, de energia e de manutenção.

Atualmente o valor médio da saca de soja (60kg) é de R\$65,00 (Agrolink, março de 2019), valor esse inferior quando se comparado com outras culturas como café – R\$ 390,00 e algodão – R\$ 95,00 (Agrolink, março de 2019), que se adaptam bem as condições climáticas e pedológicas da área, assim como observado em algumas propriedades. A escolha de culturas de maior valor agregado é uma sugestão para o melhor aproveitamento do valioso e privilegiado manancial do Aquífero Batalha.

Desta forma sugere-se a alternância de culturas mais rentáveis de ciclo curto para a região (ex: algodão e trigo) ou a introdução de culturas de ciclo longo (ex: café). Além do valor financeiro, essa alternância de culturas contribui com a fertilidade do solo. A utilização de irrigação alternativa, como a da irrigação por gotejamento, por exemplo, pode também ser de grande valia para a área, pois, esse método de irrigação localizado apresenta um menor custo de manutenção e energia em relação ao método de aspersão. O gotejamento também gera menor perda de água por evaporação, e a declividade e o vento não são empecilhos (desvantagens essas encontradas na irrigação por aspersão).

4.7 Propostas de Critérios para a Emissão de Outorga de Direito de Uso

A definição da outorga e da respectiva vazão outorgável (quantidade de água a ser disponibilizada para os diversos usos), além de critérios meramente hidrológicos, deve levar em conta as opções e as metas de desenvolvimento social e econômico que se pretende atingir, considerando os múltiplos usos, a capacidade de suporte do ambiente e a busca do desenvolvimento sustentável (Lei Nº 9.433/97).

Nesse sentido, as outorgas de direito de uso de recursos hídricos subterrâneas estão entre os instrumentos previstos pela Política Nacional de Recursos Hídricos (Lei Nº 9.433/97), as quais necessitam de levantamentos das características intrínsecas do aquífero em questão, quanto ao seu regime de fluxo, reservas, parâmetros hidrodinâmicos, e interrelações com o ciclo hidrológico. A obtenção desses dados é imprescindível para o bom gerenciamento dos recursos hídricos, de modo a garantir o equilíbrio dos usos múltiplos e a sustentabilidade dos mananciais, conforme fundamentado na Política Nacional de Recursos Hídricos.

A partir da Lei nº 21.972 de 21 de janeiro de 2016, a operacionalização da outorga dos recursos hídricos do estado de Minas Gerais é de cargo do Instituto Mineiro de Gestão das Águas (IGAM), regulamentado pelo Decreto 47.343 de 23 de janeiro de 2018. O IGAM realiza a análise dos pedidos de outorga por meio das Unidades Regionais de Gestão das Águas – URGAS, as quais, têm localização e área de abrangência equivalentes às das Superintendências Regionais de Meio Ambiente (SUPRAMs), definidas no Decreto nº 47.042, de 6 de setembro de 2016.

Os processos de outorga na área do Aquífero Batalha se encontram sob competência da URGAS do noroeste de Minas Gerais, com sede no município de Unaí/MG. Até o final do ano de 2018 foram liberadas mais de 230 autorizações de outorga para poços tubulares localizados no Aquífero Batalha, e estima-se que mais de 100 novos processos se encontram em andamento.

Os principais critérios exigidos pelo IGAM para a abertura de processo de obtenção de outorga de recurso hídrico subterrâneo se encontram listados a seguir, os quais compõem o relatório técnico que deve ser apresentado ao órgão, bem como formulários de qualidade da água e dos testes de bombeamento e de interferência (informações obtidas na plataforma *online* <http://igam.mg.gov.br/outorga>):

- Caracterização e descrição geral do empreendimento.
- Finalidade do uso da água no empreendimento: demanda diária de água do empreendimento e quais as formas de abastecimento; tipos de consumo (irrigação, consumo humano, consumo industrial, etc.); balanço do uso da água no empreendimento (vazões utilizadas para cada finalidade de uso especificando suas fontes de abastecimento); condições de reservação e métodos de tratamento de água aplicados (se for o caso); descrição do sistema de recirculação de água, quando for o caso, apresentando os valores e o percentual de

reaproveitamento; justificativa da vazão requerida frente às necessidades do empreendimento. No caso de irrigação, apresentar projeto básico de irrigação contendo pelo menos: área irrigada e lâmina bruta diária, turno de rega, manejo de setores irrigados e vazão necessária ao projeto;

- Descrever o procedimento de operação do poço (vazão de bombeamento, características técnicas do equipamento de bombeamento instalado e regime de bombeamento);
- Descrever os métodos de controle de vazão e níveis de água utilizados;
- Levantar os poços tubulares e nascentes existentes nas circunvizinhanças do poço tubular em estudo (raio de 500m) e avaliar as possíveis interferências hidrodinâmicas. Para poços tubulares situados num raio de 200m apresentar o teste de interferência;
- Elaborar um relatório sucinto que descreva a geologia local, caracterize o(s) sistema(s) aquífero(s) captado(s) pelo poço tubular e sua vulnerabilidade natural;
- Avaliar as interferências do regime de bombeamento do poço na disponibilidade hídrica local (condições de recarga e descarga);
- Apresentar boletins das análises físico-químicas e bacteriológicas, quando for o caso.

Costa *et al.* (2008) afirmam que além de serem ferramentas indispensáveis para a determinação das vazões de exploração de poços, os testes de bombeamento e de interferência representam o método de mais fácil aplicação (e de garantia de resultados) para determinação dos parâmetros hidrodinâmicos dos aquíferos e para verificação da qualidade construtiva das obras de captação de água subterrânea.

Durante a etapa de caracterização foram obtidos dados referentes a 220 processos de outorgas no Aquífero Batalha, dos quais foram analisados 70 testes de bombeamento onde se verificou a inconsistência de vários deles, o que dificultou a obtenção dos parâmetros hidrodinâmicos da zona saturada. Dos 70 testes de bombeamento analisados, apenas 22 puderam ser aproveitados para a obtenção dos parâmetros. Dentre os problemas observados destacam-se as variações das vazões bombeadas ao longo do teste; em alguns casos o intervalo muito grande entre as medições (1h); ocorrência de recuperação do poço durante o bombeamento e até mesmo a ausência de rebaixamento. Nesses casos, a obtenção dos parâmetros se torna inviável devido a não obtenção da curva de rebaixamento, o que não permite atribuir os dados do teste (tempo *versus* rebaixamento) a nenhum modelo disponível nos softwares de tratamento de dados (ex. Neuman para aquífero livre, Theis para aquífero totalmente confinado, Walton para aquífero semiconfinado).

Nesse sentido, este trabalho propõe a padronização dos testes de bombeamento por parte do órgão outorgante, objetivando a geração de dados mais robustos que possam ser aplicados à gestão do aquífero (ex: determinação da vazão ideal de operação do poço) e à obtenção de dados

hidrodinâmicos (ex: condutividade hidráulica e coeficiente de armazenamento).

Como observado nos testes de bombeamento estudados, a estabilização do nível dinâmico ocorre de forma muito rápida. Tendo em vista essa característica, sugere-se a execução de testes de bombeamento escalonados com bombeamento contínuo e aumento da vazão em cada etapa (com aumento instantâneo da vazão entre cada etapa). Propõe-se a aplicação de três estágios com intervalos de 4 horas nas primeiras duas etapas de bombeamento e de 16 horas com vazão máxima na última etapa, totalizando um teste de duração de 24 horas (Figura 4.9). Os dados devem ser coletados em uma escala aproximadamente logarítmica no início de cada etapa, passando a cada 15 a 30 minutos até a estabilização do nível dinâmico (ND).

Antes de iniciar o teste de bombeamento deverá ser realizado um pré-teste para dimensionar as vazões a serem adotadas, onde a vazão máxima (estabilizada) corresponderá a vazão Q_3 . Os valores de Q_1 e Q_2 devem ser proporcionais a Q_3 , de modo que $Q_1 \sim 1/3$ da Q_3 e $Q_2 \sim 2/3$ da Q_3 .

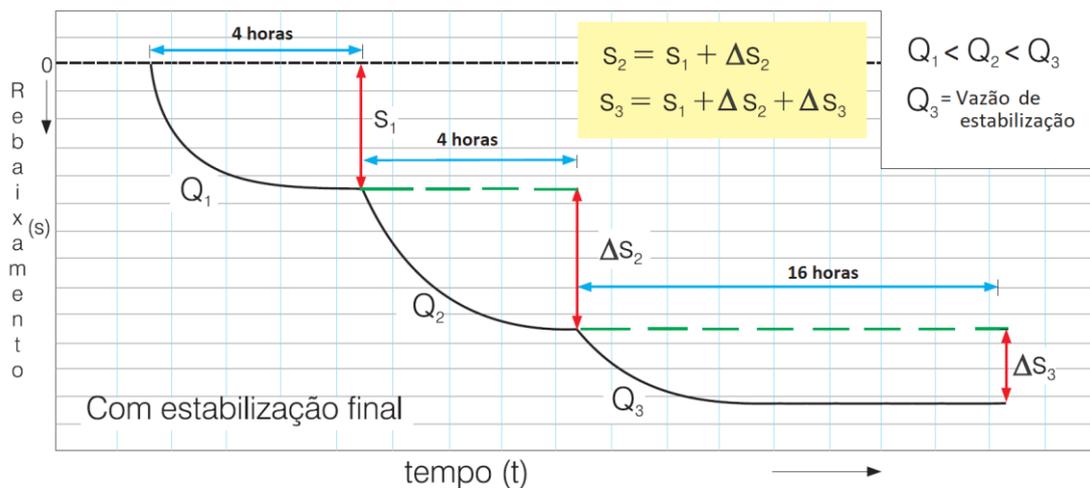


Figura 4.9. Curvas de rebaixamento *versus* tempo referentes a testes de bombeamento escalonado com estabilização de nível. A vazão outorgável deverá ser próxima a Q_3 , em função do comportamento da curva de rebaixamento. Figura adaptada de Custodio & Llamas, 1983.

Ao final do teste de bombeamento deverá ser realizado o teste de recuperação até que o nível dinâmico se restabeleça à condição original (nível estático).

Para a determinação da vazão outorgável o técnico responsável deve verificar a curva de rebaixamento, a diferença entre ND e NE e o tempo de recuperação do nível estático.

Capítulo 5

CONCLUSÕES

A compilação dos dados e resultados obtidos nesse trabalho permite concluir que o Aquífero Batalha representa um reservatório subterrâneo intergranular homogêneo e isotrópico, correspondente a um manancial de fundamental importância para a manutenção de vazões de afluentes de importantes rios brasileiros, como os rios Paranaíba e Paracatu. Além da contribuição no aumento de produtividade agrícola de diversas propriedades rurais que fazem uso de seu potencial hídrico, propiciando o desenvolvimento da irrigação na região.

Neste sentido, é grande a necessidade de atenção por parte dos órgãos gestores e usuários, de modo a promover o uso sustentável das reservas através da gestão integrada dos recursos hídricos, garantindo a preservação das condições de recarga, assim permitindo condições de exploração dos poços tubulares de forma adequada, sem impactar de forma alguma os cursos d'água e veredas alimentados por sua descarga.

A reinterpretação de dados da literatura, somados a descrições geológicas de campo e levantamentos geofísicos permitiram a delimitação da área de ocorrência do Aquífero Batalha, a qual foi estimada em 745 km².

Estudos de eletrorresistividade com aplicação de caminhamentos elétricos em seções de 360 metros apresentam resultados adequados para a determinação da presença / ausência do aquífero em profundidade.

A média das vazões dos 220 poços tubulares cadastrados é de 45,5 m³/h em poços relativamente rasos com média de profundidade de 42,5 metros e espessura saturada média de 33,33 metros.

A zona não saturada do aquífero é composta em sua maioria por latossolos argilosos de condutividade hidráulica (Kv) média da ordem de 10⁻⁵ m/s em superfície com diminuição nos primeiros metros de profundidade. Esses solos foram formados pelo intemperismo de filitos do topo da Formação Serra da Batalha, posicionados estratigraficamente acima de quartzitos desta mesma unidade, os quais são os precursores do saprolito arenoso responsável pelo elevado potencial de armazenamento hídrico.

Os parâmetros hidrodinâmicos principais da zona saturada do Aquífero Batalha são:

- Condutividade hidráulica (K) média da ordem de 10⁻⁵ m/s;
- Transmissividade (T) média na ordem de 10⁻⁴ m²/s;
- Porosidade efetiva (Sy) média corresponde a 20% e
- Capacidade específica (Cp) média de 3,91 m³/h/m.

Depois da caracterização do aquífero foram estimadas as reservas hídricas, onde foram obtidos valores de 4.469.553.000 m³ (aproximadamente 4,5 bilhões de metros cúbicos) para a reserva permanente, com reserva renovável de 335.250.000 m³/ano e reserva explorável de cerca de 780 milhões de m³/ano.

Considerando a soma das vazões dos poços tubulares cadastrados, bombeando 20 h/dia ao longo de 1 ano obtém-se o volume de 72.731.944 m³/ano, ou seja, apenas cerca de 9,3% da reserva explorável do Aquífero Batalha. Logo, pode-se afirmar que com base nessas estimativas não está ocorrendo sobreexploração do Aquífero Batalha (em uma análise regional do aquífero). É importante considerar que esta estimativa é um dado estimado, e que a gestão dos recursos hídricos subterrâneos deve ser pensada de forma local.

Também foram avaliados parâmetros de qualidade da água do aquífero, os quais apresentam forte similaridade com a química da água das chuvas, em que a água subterrânea é caracterizada como levemente ácida (pH entre 5 e 6) e de baixa mineralização, com TDS e CE muito baixos. As análises de nitrato mostraram concentrações irrelevantes (da ordem de 0,2 mg/L), o que permite afirmar que até o momento da execução deste trabalho não está ocorrendo contaminação por excesso de uso de fertilizante químico solúvel na região. A hidroquímica é coerente com a mineralogia do material constituinte do aquífero, com ampla predominância de quartzo e ausência de minerais solúveis que em potencial possam ampliar a mineralização das águas subterrâneas.

A recarga natural corresponde a cerca de 30% da precipitação, o que está de acordo com as condições do meio físico associado à praticamente toda a área de ocorrência do aquífero: latossolos espessos e estruturados, relevo plano e declividades inferiores a 4%.

Diante das questões apresentadas, no início do desenvolvimento da pesquisa, se encontram listadas as sugestões para projetos futuros na região, assim como ações para gestão dos recursos hídricos do Aquífero Batalha:

- Construção adequada dos poços tubulares;
- Instalação de poços de monitoramento com monitoramento mensal do nível estático;
- Divisão das áreas de recarga do aquífero para a realização dos cálculos de estimativas de reservas de forma a se determinar unidades de gerenciamento do aquífero;
- Realização de estudos específicos para a determinação de porosidade efetiva e para a melhor delimitação do aquífero com mapeamento geológico de detalhe (escala 1:25.000) e realização de mais levantamentos geofísicos;
- Instalação de pluviômetros nas diversas áreas de recarga, propiciando a melhor estimativa de volume de precipitação para determinação de balanços hídricos setorizados e mais precisos;

- Cálculo anual das estimativas de reservas hídricas subterrâneas com base nos valores de precipitação do ano anterior, de modo a propiciar o gerenciamento dos volumes explorados em casos extremos;
- Monitoramento semestral dos parâmetros determinantes de indicação da qualidade da água;
- Execução de medidas para diminuir o escoamento superficial, como o taludamento em curvas de nível e a construção do Sistema de Barraginhas da EMBRAPA, propiciando o aumentando da recarga e diminuição dos processos erosivos;
- Redução dos custos de bombeamento com a automação do sistema, além de substituição de equipamentos e manutenção de equipamentos mais eficientes;
- Otimização dos métodos de irrigação, de modo a evitar desperdícios e valorizar os recursos hídricos do Aquífero Batalha, através da produção de culturas com maior valor agregado;
- Padronização dos testes de bombeamento como critério para obtenção de outorga, com adoção da metodologia de teste escalonado e com estabilização final do nível dinâmico em cada etapa de bombeamento.

A aplicação das ações enumeradas deverá em médio e longo prazos contribuir para a continuidade das atividades econômicas na região, resultando no uso sustentável das águas do aquífero.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABGE – Associação Brasileira de Geologia de Engenharia e Ambiental, 1996. Ensaio de permeabilidade em solos - orientações para sua execução no campo. 3ª ed. Boletim, n. 4, 35p.
- Bahia, S.R. 1998. Eficiência energética nos sistemas de saneamento. IBAM, PROCEL/ELETOBRÁS. Rio de Janeiro. 76 pg.
- Barbosa, O.; Braun, O.P.G.; Dyer, R.C.; Rodrigues, C.A.B. 1970. Geologia da região do Triângulo Mineiro. Rio de Janeiro. DNPM/DGM. bol. 136. 140p.
- Bernardo, S. 1986. Manual de irrigação. Viçosa, UFV, 596p.
- Brasil. Decreto n. 9.433, de 08 de jan. de 1997. Política Nacional de Recursos Hídricos, Brasília, DF, jan 1997.
- Brito, D.C. 2015. Carta geológica: folha Serra da Tiririca-SE. 23-VC-II.
- Campos, J.E.G. 2004. Hidrogeologia do Distrito Federal. Rev. Bras. Geoc., 34(1): 41-48.
- Campos, J. E. G. 2010. Meio Físico do Distrito Federal. In: Zoneamento Ecológico-Econômico do Distrito Federal. GDF, SEDHAB.
- Campos, J.E.G; Dardenne, M.A.; Freitas-Silva, F.H.; Martins-Ferreira, M.A.C. 2013. Geologia do Grupo Paranoá na porção externa da Faixa Brasília. Brazilian Journal of Geology, v. 43, n. 3, p. 461-476.
- Campos, J.E.G. & Gonçalves, T.D. 2015. Diretrizes para o desenvolvimento de recarga artificial de aquíferos no distrito federal. Relatório de consulta técnica, ADASA. 66p.
- Campos Neto, M.C. 1984. Litoestratigrafia, relações estratigráficas e evolução paleogeográfica dos grupos Canastra e Paranoá (região de Vazante-Lagamar, MG). Rev. Bras. Geol., 14: 81-91.
- Costa, W. D. 2000. Uso e gestão de Água Subterrânea. In: Feitosa F. A. C. E Filho, J. M. (coordenação). Hidrogeologia – Conceitos e Aplicações. (2ª edição) Fortaleza, CPRM/REFO, LABHID – UFPE, p. 341 – 367.
- Costa, W. D. 1998. Avaliação de reservas, potencialidade e disponibilidade de aquíferos. Águas Subterrâneas, n. 1, 1998.
- CPRM, Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais - Mapa de Declividade em Percentual do Relevo Brasileiro. 2018. Disponível em: <<http://www.cprm.gov.br/publique/Gestao-Territorial/Gestao-Territorial/Mapa-de-Declividade-em-Percentual-do-Relevo-Brasileiro-3497.html>>. Consultado em março de 2018
- CPRM, Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais. 2017. Disponível em <<http://geosgb.cprm.gov.br/>>. Acessado em: agosto de 2017.
- Dardenne M.A. 2000. The Brasília Fold Belt. In: Cordani U.G.; Milani E.J.; Thomaz Filho A.; Campos D.A. (Edit.). Tectonic Evolution of South America. p. 231-263. XXXI International Geological Congress. Rio de Janeiro, Brazil.
- Descovi Filho, Leonidas Luiz Volcato et al. Subsídios ambientais para o enquadramento das águas subterrâneas da bacia hidrográfica do rio Santa Maria–Rio Grande do Sul. Águas Subterrâneas, 2008.
- De Oliveira Braga, A. C. 2016. Geofísica aplicada: métodos geoeletricos em hidrogeologia. Oficina de Textos. 160 p.
- Elis, V.R. 1998. Avaliação da aplicabilidade de métodos elétricos de prospecção geofísica no estudo de áreas utilizadas para disposição de resíduos. Tese de Doutorado, Instituto de

- Geociências e Ciências Exatas, UNESP, Campus de Rio Claro - SP, 264p.
- Feitosa, F.A.C.; Filho, J.M.; Feitosa, E.C.; Demetrio, J.G.A. 2008. Hidrogeologia: conceitos e aplicações. 3ª. Ed. CPRM, Rio de Janeiro, 812pp.
- Fetter C.W. 1994. Applied Hydrogeology. Person Education International. New Jersey, 691pp.
- Fitts, C. R. 2002. Groundwater science. Elsevier.
- Fiori, J.P.O. 2010. Avaliação de métodos de campo para a determinação de condutividade hidráulica em meios saturados e não saturados. Dissertação de Mestrado, Instituto de Geociências, Universidade de Brasília, 107p.
- Fiori, J. P.; Campos, J. E. G.; Almeida, L. 2010. Variabilidade da condutividade hidráulica das principais classes de solos do Estado de Goiás. Geociências (São Paulo), v. 29, n. 2, p. 229-235.
- Freeze, R. A.; Chery, J. A. 1979. Groundwater: Englewood Cliffs. New Jersey.
- Freeze, R. A.; Chery J.A. 1996. Groundwater. Prentice Hall, New York, 604 pp.
- Freitas Silva F.H. and Dardenne M.A. 1992. Quadro estratigráfico das Formações Paracatú e Vazante na região de Paracatu, MG. In: Simpósio de Geologia de Minas Gerais, 6, Anais..., Ouro Preto, Revista da Escola de Minas, vol. 56, n. 1/2, p.91-93.
- Freitas-Silva, F. H.; Dardenne, M. A. 1994. Proposta de subdivisão estratigráfica formal para o grupo Canastra no oeste de Minas Gerais e leste de Goiás. In: Simpósio de Geologia do Centro-Oeste. Brasília. Atas... Brasília: SBG, 1994. p. 164-165
- Freitas-Silva F. H. 1991. Enquadramento litoestratigráfico e estrutural do depósito de ouro do Morro do Ouro, Paracatu - MG. Brasília. Dissertação de Mestrado - Universidade de Brasília/Instituto de Geociências. 151p.
- Freitas-Silva F. H. 1996. Metalogênese do depósito do Morro do Ouro, Paracatu - MG. Brasília. Tese de Doutorado - Universidade de Brasília/Instituto de Geociências. 338p.
- Gaspar M.T.P. 2006. Sistema Aquífero Urucuia: caracterização regional e propostas de gestão. Tese de Doutorado, Instituto de Geociências, Universidade de Brasília, 148 p.
- Gonçalves, C.; Cruz, L. T. M.; Silvério, P. F. 2009. Soluções Rastreáveis e Estáveis Para Determinação de Oxigênio Dissolvido em Águas subterrâneas: melhoria da qualidade técnica dos Resultados de Campo. Águas Subterrâneas, v. 1.
- Healey, R.W. & Cook, P.G. 2002. Using groundwater levels to estimate recharge. Hydrogeology Journal, 10(1), pp.91-109.
- Hirata, R.; Rodrigues, G.; Paraiba, L.; Buschinelli, C. 1993. Groundwater contamination risk for agriculture activity in São Paulo State (Brazil). In: Chil-ton, J. (Org.). Groundwater and agriculture: the inter-relationship. Wallingford, Reino Unido, p. 91-93.
- IBGE, Coordenação de Recursos Naturais e Estudos Ambientais. 2009. Manual técnico de geomorfologia. 2. ed. – Rio de Janeiro/ Brasil. 182 p.
- IGAM, Instituto Mineiro de Gestão das Águas - Outorgas. 2018. Disponível em: <<http://www.igam.mg.gov.br/outorga>>. Consultado em: outubro de 2018
- Jadoski, S.O.; Saito, L.R.; Prado, C.; Lopes, E.C.; Sales, L.L.S.R. 2010. Características da lixiviação de nitrato em áreas de agricultura intensiva. Pesquisa Aplicada & Agrotecnologia, v3, n°1, 193-200.
- Lima, O.A.L. 2010. Estruturas geoeletrica e hidroquímica do sistema aquífero cristalino da Bacia do Alto Rio Curaçá, semiárido da Bahia. Revista Brasileira de Geofísica, v. 28(3):445-461.
- Lousada, E.O.; Campos, J.E.G. 2006. Correlação entre Precipitação e Piezometria em Aquíferos

- Freáticos: Implicações para o Planejamento dos Recursos Hídricos da Bacia do Rio Jardim-DF. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, v. 11, n. 4, p. 37-46.
- Luiz, A.J.B.; Neves, M.C.; Dynia, J.F. 2004. Implicações potenciais na qualidade das águas subterrâneas das atividades agrícolas na região metropolitana de Campinas, SP. *EMBRAPA/MEIO AMBIENTE, Bol. de Pesquisa Nº 25, Jaguariúna-SP*, 33 p.
- Madalosso, A.; Valle, C.R.O. 1978. Considerações sobre a estratigrafia e sedimentologia do Grupo Bambuí na região de Paracatu-Morro Agudo (MG). *SBG, Cong. Bras. Geol.*, 30, Recife, Anais, 2:622-634.
- Madalosso, A. 1979. Stratigraphy and sedimentation of the Bambui Group in Paracatu region, MG, Brazil. University of Missouri. 127p. (Master Dissertation).
- Madalosso, A. 1980. Considerações sobre a paleogeografia do Grupo Bambuí na região de Paracatu, M.G. *SBG, Cong. Bras. Geol.*, 31, Camboriú, Anais, 2:772-785.
- Minas Gerais. Lei nº 21.972 de 21 de janeiro de 2016. Sistema Estadual de Meio Ambiente e Recursos Hídricos, Belo Horizonte, MG
- Minas Gerais. Decreto 47.343 de 23 de janeiro de 2018. Regulamento do Instituto Mineiro de Gestão das Águas – Igam, Belo Horizonte, MG.
- Minas Gerais. Decreto nº 47.042 de 6 de setembro de 2016. Organização da Secretaria de Estado de Meio Ambiente e Desenvolvimento Sustentável, Belo Horizonte, MG.
- Vertex: ASF's Alaska Satellite Facility. 2017. Data portal for remotely sensed imagery of the Earth. Fairbanks, Alaska, USA: Geophysical Institute, University of Alaska-Fairbanks (UAF). Disponível em: <<https://vertex.daac.asf.alaska.edu/>>. Consultado em: agosto de 2017.
- NBR 12244/NB-1290, ABNT. 1992. Construção de poço para captação de água subterrânea. Associação Brasileira de Normas Técnicas.
- Neuman S P. 1975. Analysis of pumping test data from anisotropic unconfined aquifers considering delayed gravity response. *Water Resources Research*, 11(2): 329–342.
- Oliveira, L. A. 2002. O Sistema Aquífero Bauru na Região de Araguari/MG: parâmetros dimensionais e propostas de gestão. Tese de Doutorado. Dissertação (Mestrado em Geologia). Universidade de Brasília. Instituto de Geociências. Brasília.
- Oliveira L.A. & Campos J.E.G. 2004. Parâmetros hidrogeológicos do Sistema Aquífero Bauru na região de Araguari/MG: fundamentos para a gestão do sistema de abastecimento de água. *Rev. Bras. Geoc.*, 34(2): 213-218.
- Pena, R. F. A. 2014. Distribuição da água no mundo. *Brasil Escola*.
- Pereira, L. F. 1992. Relações tectôno-estratigráficas entre as unidades Canastra e Ibiá na região de Coromandel, MG. Brasília. IG-UnB. 75p. (Dissertação de Mestrado).
- Pereira, L. F.; Dardenne, M. A.; Rosière, C. A.; Pedrosa Soares, A. C. 1992. Evolução geológica dos grupos Canastra e Ibiá na região entre Coromandel e Guarda-Mor, MG. In: *Congr. Bras. Geol.*, 37. São Paulo, 1992. Anais... São Paulo, SBG. v. 1 p. 310-311.
- Perroni, J. C. A. 2005. Avaliação do consumo de energia elétrica para produção de água subterrânea: o caso do abastecimento público da cidade de São Carlos-SP. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo.
- Rebouças, A. C.; Amore, L. 2002. O Sistema Aquífero Guarani–SAG. *Revista Águas Subterrâneas*, v. 16, p. 135-43.
- Rodrigues, J.B. 2008. Proveniência de sedimentos dos grupos Canastra, Ibiá, Vazante e Bambuí: um estudo de zircões detríticos e idades modelo Sm-Nd. 141 f. Tese (Doutorado em Geologia).

Universidade de Brasília, Brasília.

- Rigobello; I. A. E.; Branquinho, J. A.; Dantas, M. G. S.; Oliveira, T.F.; Neves Filho, W. 1988. Mina de zinco de Vazante, Minas Gerais. In: Chobbenha, C. & Coelho, C. E. S. Principais depósitos minerais do Brasil. Metais básicos não ferrosos, ouro e alumínio. Brasília. DNPM. v. 3. p.101-110.
- Santos, E.D. & Ribeiro, A.G. 2004. Clima e agricultura no município de Coromandel (MG). Caminhos de Geografia, 8(13), pp.122-140.
- Santos, H.G. dos; Jacomine, P.K.T.; Anjos, L.H.C. dos; Oliveira, V.A. de; Lumbrelas, J.F.; Coelho, M.R.; Almeida, J.A. de; Cunha, T.J.F.; Oliveira, J.B. de; Sistema brasileiro de classificação de solos. 3ª ed. rev. ampl., Brasília, DF: Embrapa, 353 p., 2013.
- Silva, T. M. G. 2013. Caracterização do Sistema Aquífero Parecis na região centro-norte do Estado de Mato Grosso: Subsídios para a gestão dos recursos hídricos subterrâneos.
- Tuller, M.P.; Signorelli, N.; Baptista, M.C.; Brito, D.C. 2013. Carta geológica: folha Guarda-Mor-SE.23-V-C-V.
- Telford, W.M.; Geldart, L.P.; Sheriff, R.E., 1990. Applied Geophysics. Second Edition, Cambridge University Press, United Kingdom, 770p.
- Zini, A.; Forlin, R.; Andreaza, P.; Souza, A. 1988. Depósito do Morro do Ouro. Paracatu, Minas Gerais. In: Schobbenhaus, C. & Coelho, C. E. S. Principais depósitos minerais do Brasil. Metais básicos não ferrosos, ouro e alumínio. Brasília. DNPM. v. 3. p.479-489.

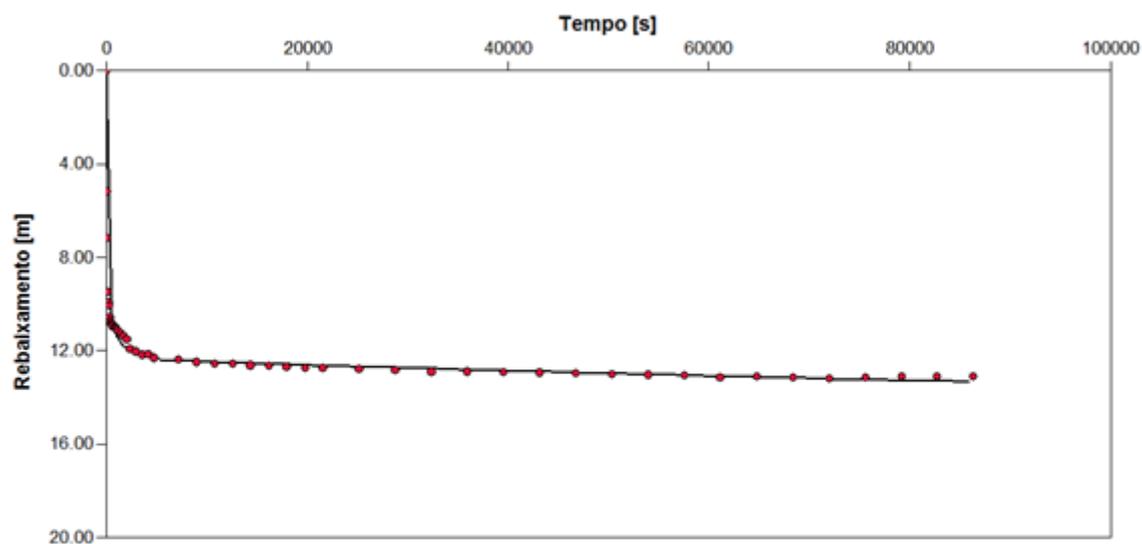
APÊNDICES

APÊNDICE I - Gráficos de Análises de Testes de Bombeamento

TESTE 1

Aquifer Thickness: 29.96 m

Discharge Rate: 42.2 [m³/h]



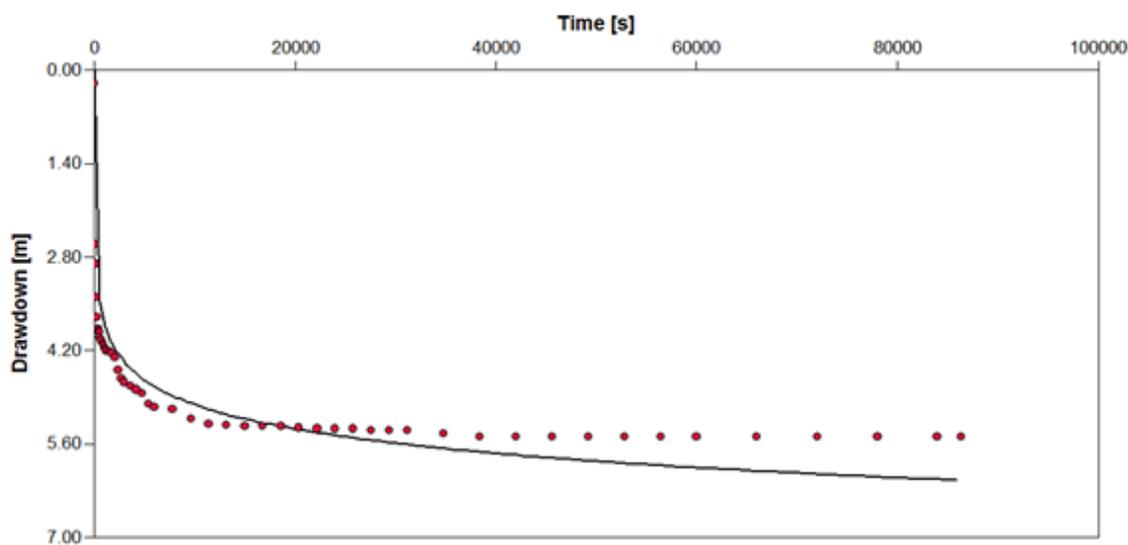
Calculation using Neuman

Observation Well	Transmissivity [m ² /s]	Hydraulic Conductivity [m/s]	Specific Yield	Ratio K(v)/K(h)	Ratio Sy/S	Radial Distance to PW [m]
Well2	4.18×10^{-4}	1.39×10^{-5}	2.60×10^{-1}	5.56×10^{-1}	2.42×10^2	1.41

TESTE 2

Aquifer Thickness: 34.40 m

Discharge Rate: 40.08 [m³/h]



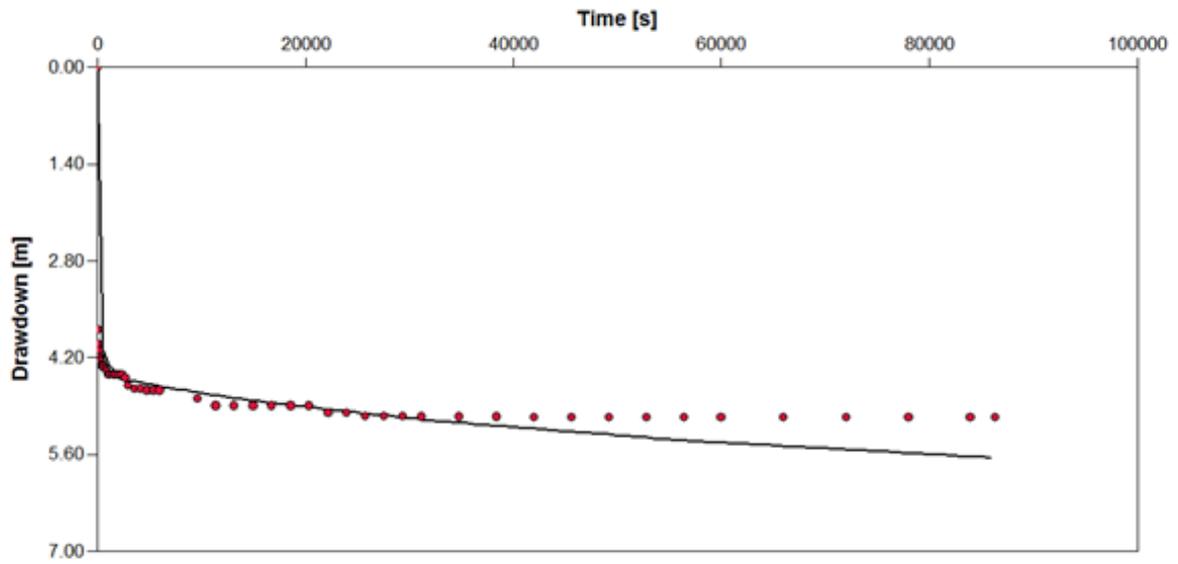
Calculation using Neuman

Observation Well	Transmissivity [m ² /s]	Hydraulic Conductivity [m/s]	Specific Yield	Ratio K(v)/K(h)	Ratio Sy/S	Radial Distance to PW [m]
Well2	1.67×10^{-3}	4.87×10^{-5}	4.60×10^{-2}	2.54×10^{-1}	3.16×10^1	1.41

TESTE 3

Aquifer Thickness: 34.50 m

Discharge Rate: 42.12 [m³/h]



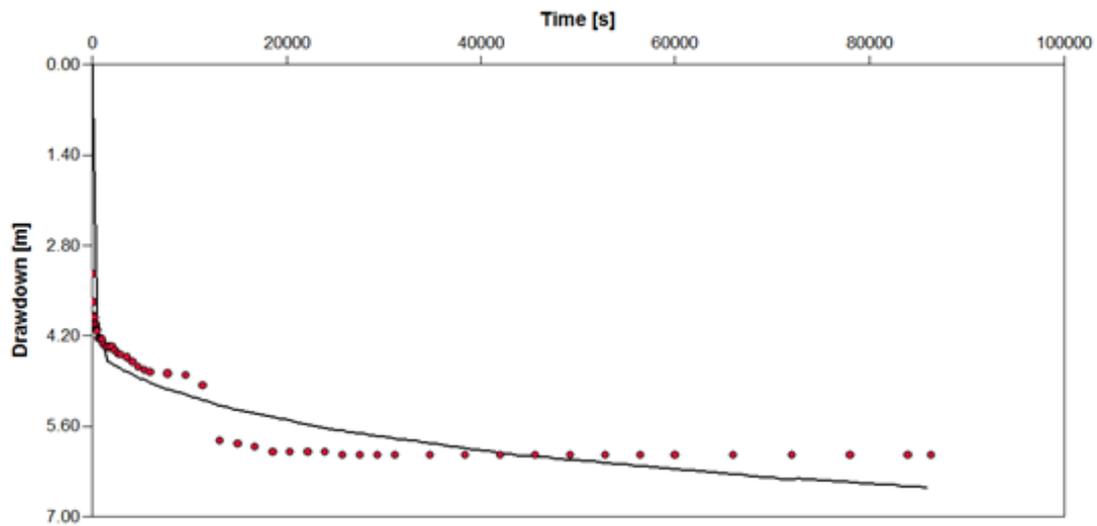
Calculation using Neuman

Observation Well	Transmissivity [m ² /s]	Hydraulic Conductivity [m/s]	Specific Yield	Ratio K(v)K(h)	Ratio Sy/S	Radial Distance to PW [m]
Well2	1.18×10^{-3}	3.43×10^{-5}	9.61×10^{-2}	5.95×10^{-1}	6.77×10^1	1.41

TESTE 4

Aquifer Thickness: 33.50 m

Discharge Rate: 50.88 [m³/h]



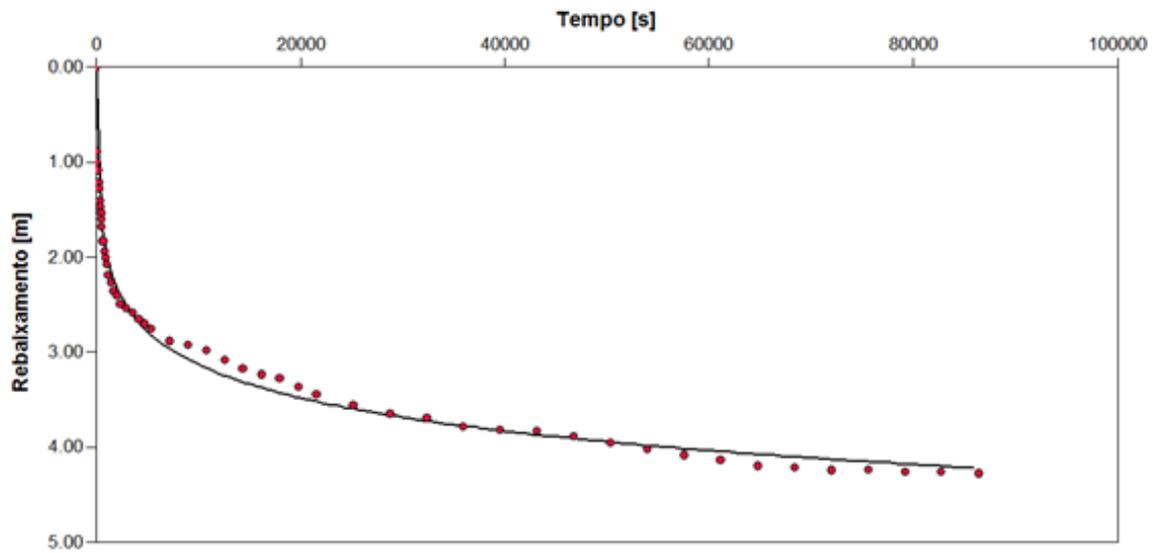
Calculation using Neuman

Observation Well	Transmissivity [m ² /s]	Hydraulic Conductivity [m/s]	Specific Yield	Ratio K(v)K(h)	Ratio Sy/S	Radial Distance to PW [m]
Well2	1.36×10^{-3}	4.05×10^{-5}	4.88×10^{-2}	9.71×10^{-1}	3.14×10^1	1.41

TESTE 5

Aquifer Thickness: 17.30 m

Discharge Rate: 29.8 [m³/h]



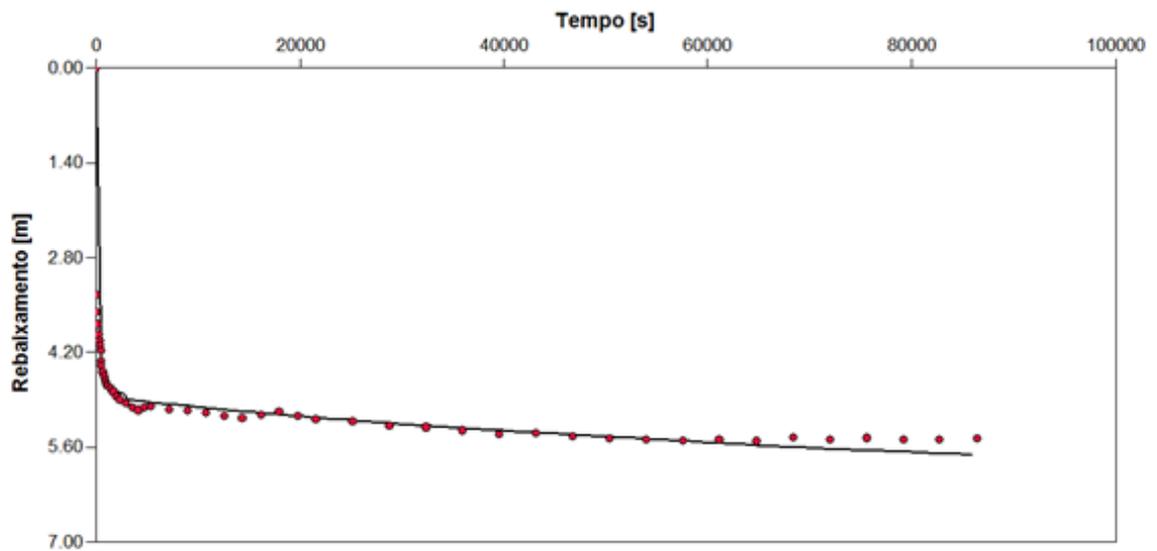
Calculation using Neuman

Observation Well	Transmissivity [m ² /s]	Hydraulic Conductivity [m/s]	Specific Yield	Ratio K(v)K(h)	Ratio Sy/S	Radial Distance to PW [m]
Well2	1.30×10^{-3}	7.51×10^{-5}	4.70×10^{-1}	3.57×10^{-2}	1.54×10^1	1.41

TESTE 6

Aquifer Thickness: 24.30 m

Discharge Rate: 34.4 [m³/h]



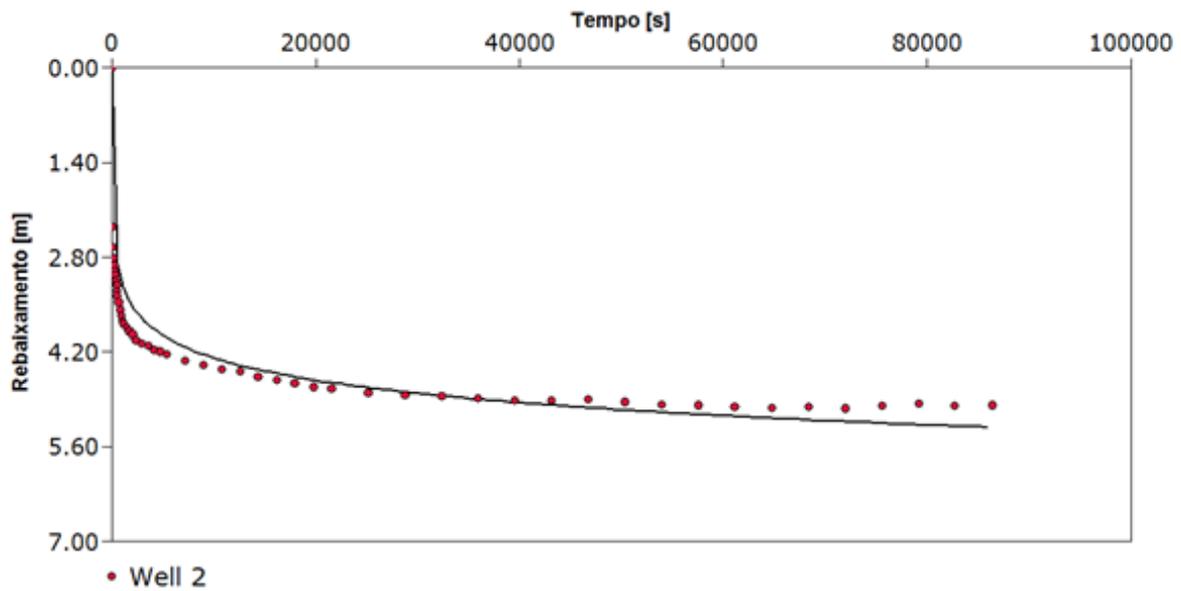
Calculation using Neuman

Observation Well	Transmissivity [m ² /s]	Hydraulic Conductivity [m/s]	Specific Yield	Ratio K(v)K(h)	Ratio Sy/S	Radial Distance to PW [m]
Well2	8.84×10^{-4}	3.64×10^{-5}	1.48×10^{-1}	2.95×10^{-1}	1.12×10^2	1.41

TESTE 7

Aquifer Thickness: 27.10 m

Discharge Rate: 29.8 [m³/h]



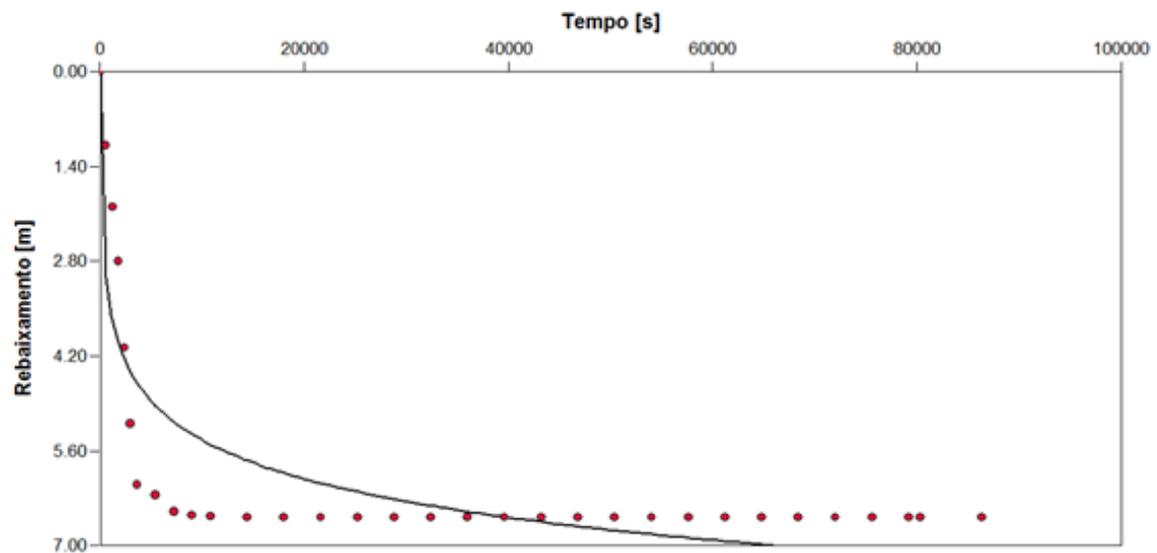
Calculation using Neuman

Observation Well	Transmissivity [m ² /s]	Hydraulic Conductivity [m/s]	Specific Yield	Ratio K(v)/K(h)	Ratio Sy/S	Radial Distance to PW [m]
Well 2	1.38×10^{-3}	5.08×10^{-5}	2.50×10^{-1}	1.79×10^{-1}	1.26×10^2	1.41

TESTE 8

Aquifer Thickness: 28.10 m

Discharge Rate: 36 [m³/h]



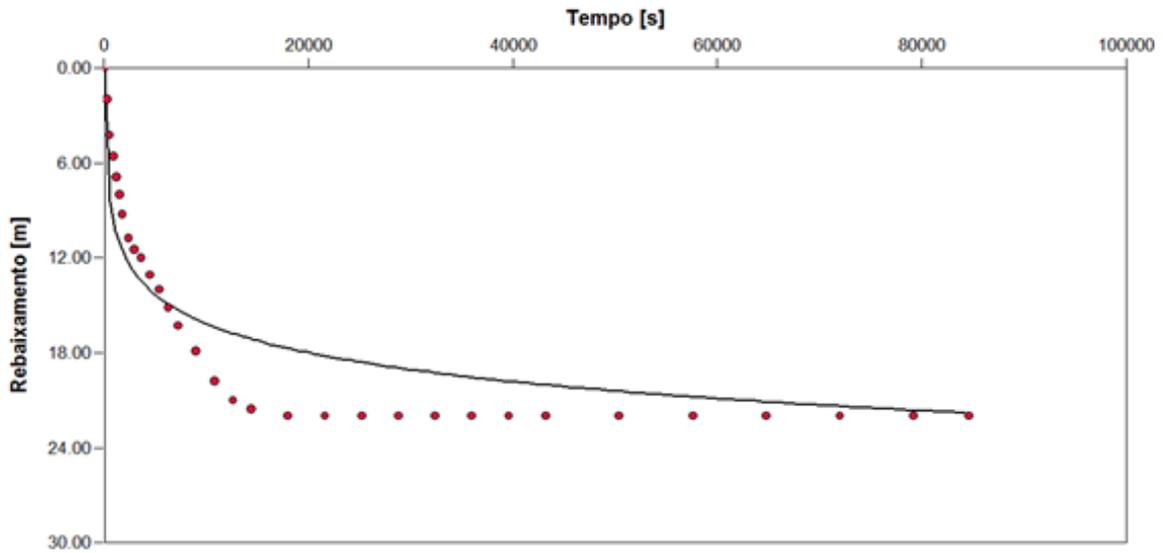
Calculation using Neuman

Observation Well	Transmissivity [m ² /s]	Hydraulic Conductivity [m/s]	Specific Yield	Ratio K(v)/K(h)	Ratio Sy/S	Radial Distance to PW [m]
Well 2	9.62×10^{-4}	3.42×10^{-5}	1.58×10^{-1}	4.96×10^{-2}	1.05×10^1	1.41

TESTE 9

Aquifer Thickness: 26.00 m

Discharge Rate: 38 [m³/h]



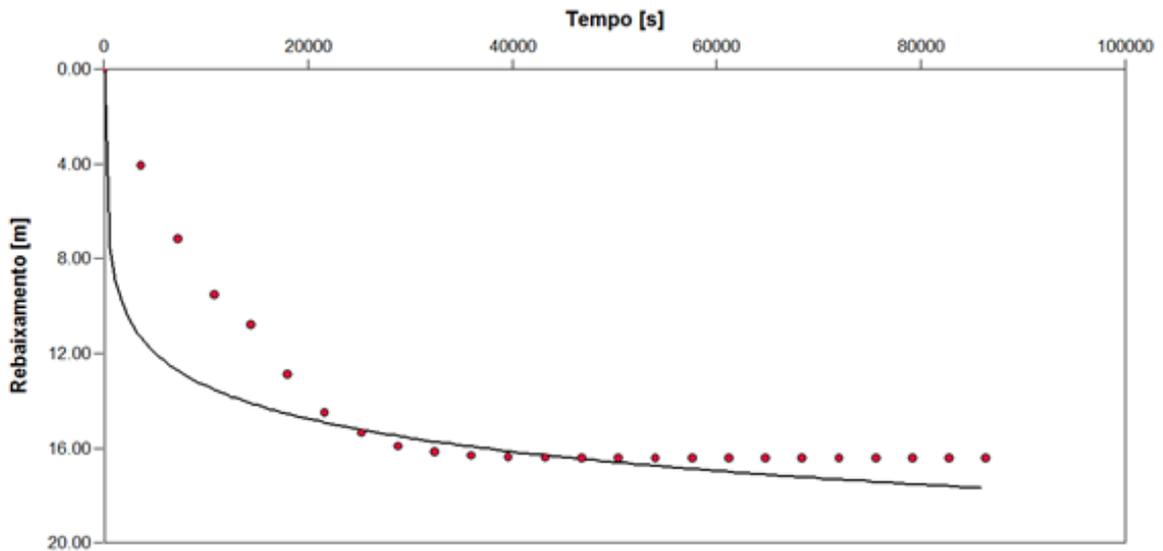
Calculation using Neuman

Observation Well	Transmissivity [m ² /s]	Hydraulic Conductivity [m/s]	Specific Yield	Ratio K(v)/K(h)	Ratio Sy/S	Radial Distance to PW [m]
Well 2	3.16×10^{-4}	1.22×10^{-5}	3.16×10^{-1}	3.07×10^{-1}	3.87×10^1	1.41

TESTE 10

Aquifer Thickness: 28.73 m

Discharge Rate: 23.7 [m³/h]

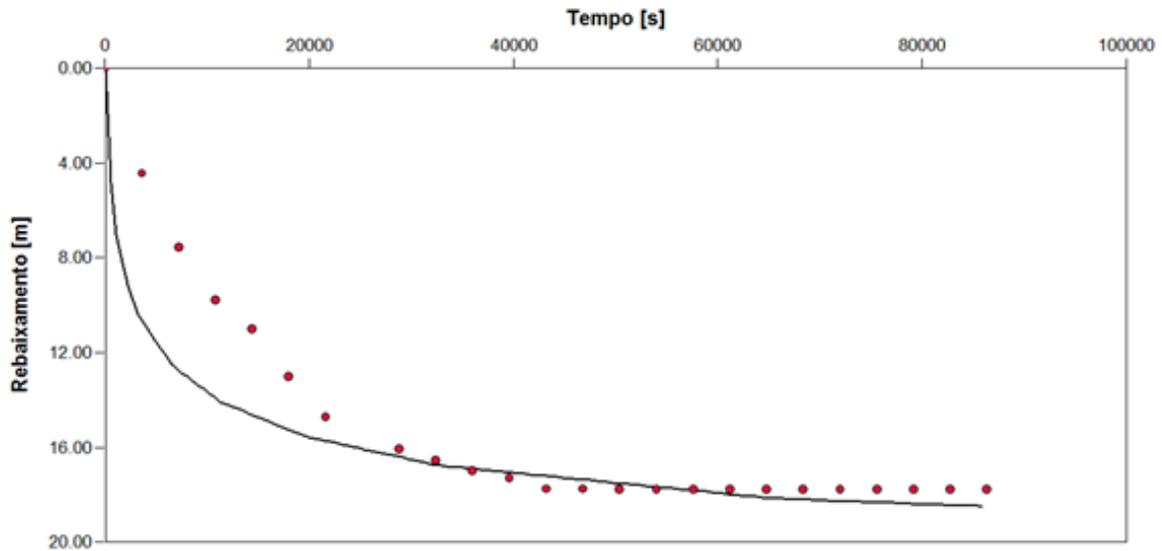


Calculation using Neuman

Observation Well	Transmissivity [m ² /s]	Hydraulic Conductivity [m/s]	Specific Yield	Ratio K(v)/K(h)	Ratio Sy/S	Radial Distance to PW [m]
Well 2	2.61×10^{-4}	9.09×10^{-5}	2.26×10^{-1}	2.52×10^{-1}	6.02×10^1	1.41

TESTE 11

Aquifer Thickness: 25.65 m Discharge Rate: 20.55 [m³/h]

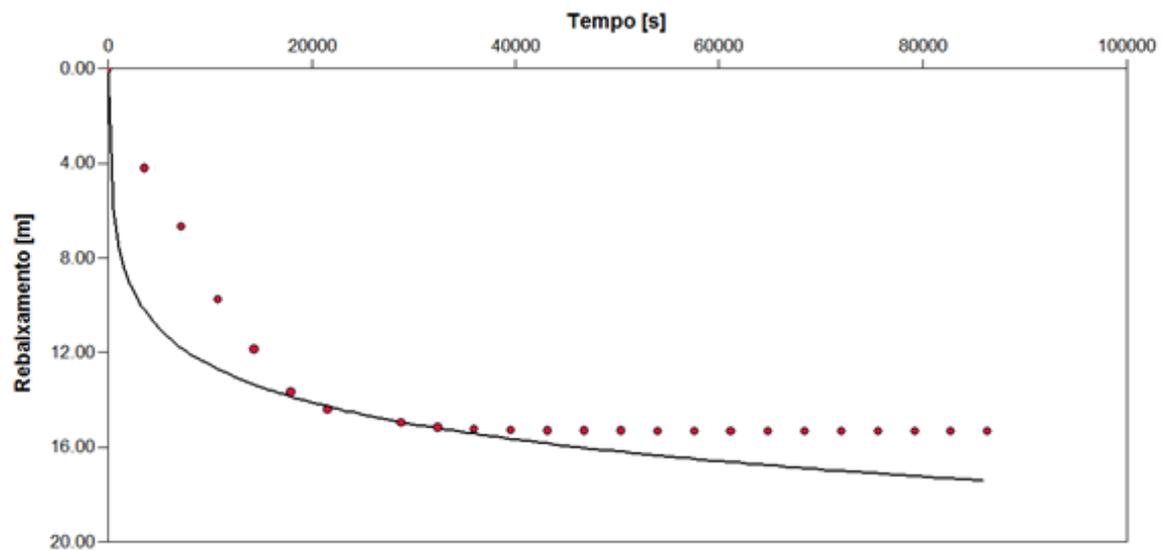


Calculation using Neuman

Observation Well	Transmissivity [m²/s]	Hydraulic Conductivity [m/s]	Specific Yield	Ratio K(v)/K(h)	Ratio Sy/S	Radial Distance to PW [m]
Well 2	1.29×10^{-4}	5.04×10^{-5}	2.16×10^{-1}	3.29×10^{-1}	1.02×10^1	1.41

TESTE 12

Aquifer Thickness: 22.60 m Discharge Rate: 25.2 [m³/h]



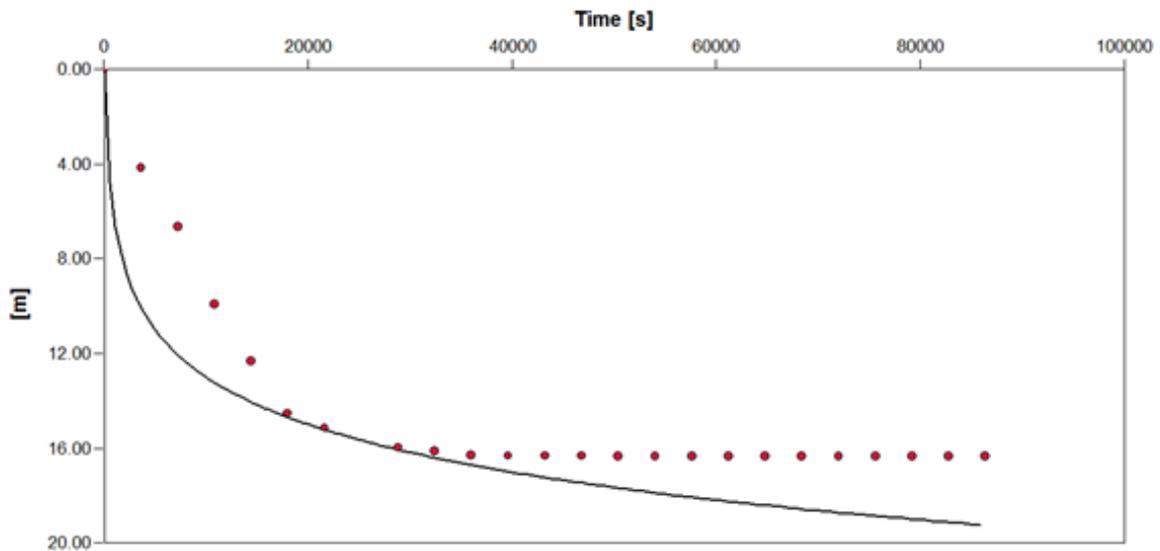
Calculation using Neuman

Observation Well	Transmissivity [m²/s]	Hydraulic Conductivity [m/s]	Specific Yield	Ratio K(v)/K(h)	Ratio Sy/S	Radial Distance to PW [m]
Well 2	2.45×10^{-4}	1.08×10^{-5}	1.54×10^{-1}	1.54×10^{-1}	1.38×10^1	1.41

TESTE 13

Aquifer Thickness: 23.90 m

Discharge Rate: 22 [m³/h]



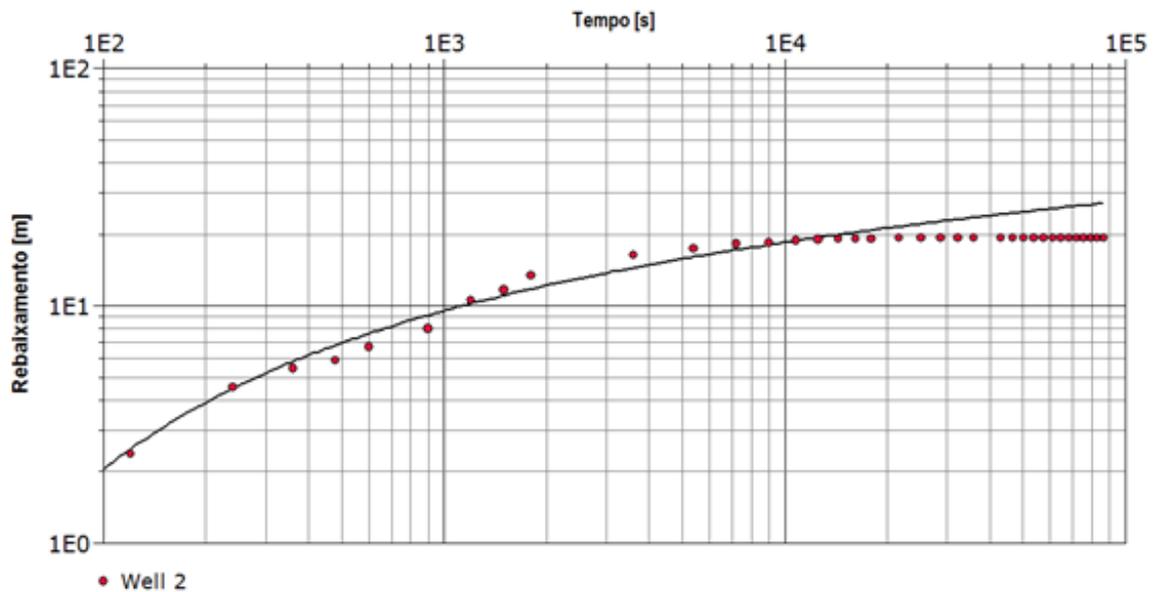
Calculation using Neuman

Observation Well	Transmissivity [m²/s]	Hydraulic Conductivity [m/s]	Specific Yield	Ratio K(v)/K(h)	Ratio Sy/S	Radial Distance to PW [m]
Well 2	1.67×10^{-4}	6.98×10^{-5}	2.68×10^{-1}	2.58×10^{-1}	1.22×10^1	1.41

TESTE 14

Aquifer Thickness: 25.90 m

Discharge Rate: 32 [m³/h]

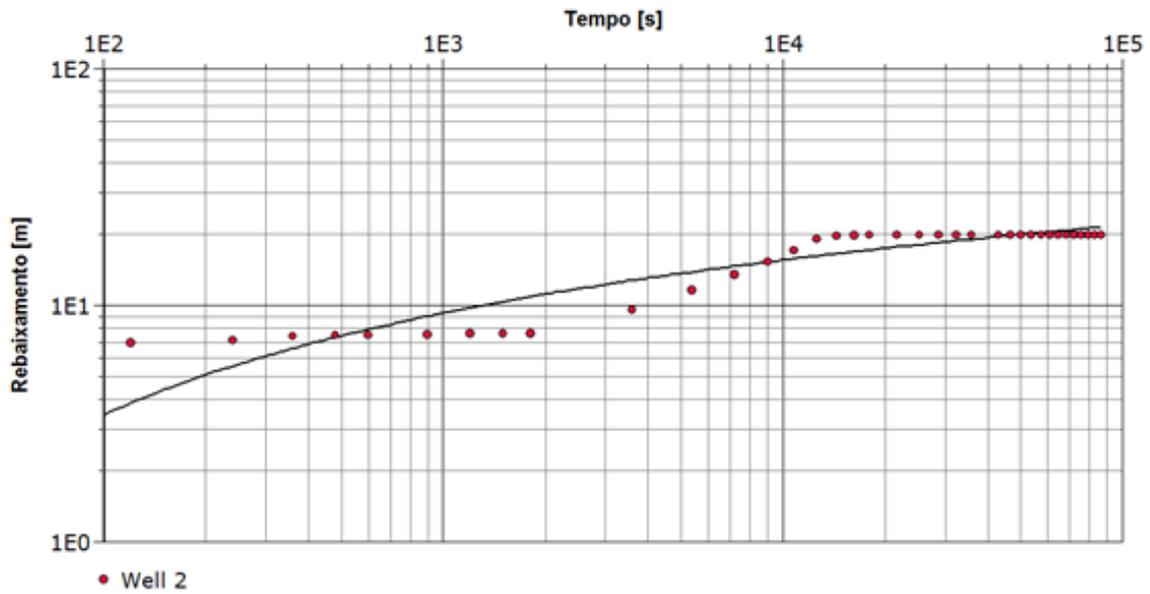


Calculation using Neuman

Observation Well	Transmissivity [m²/s]	Hydraulic Conductivity [m/s]	Specific Yield	Ratio K(v)/K(h)	Ratio Sy/S	Radial Distance to PW [m]
Well 2	1.78×10^{-4}	6.87×10^{-5}	2.33×10^{-1}	3.07×10^{-1}	1.22×10^1	1.41

TESTE 15

Aquifer Thickness: 28.00 m Discharge Rate: 45.15 [m³/h]

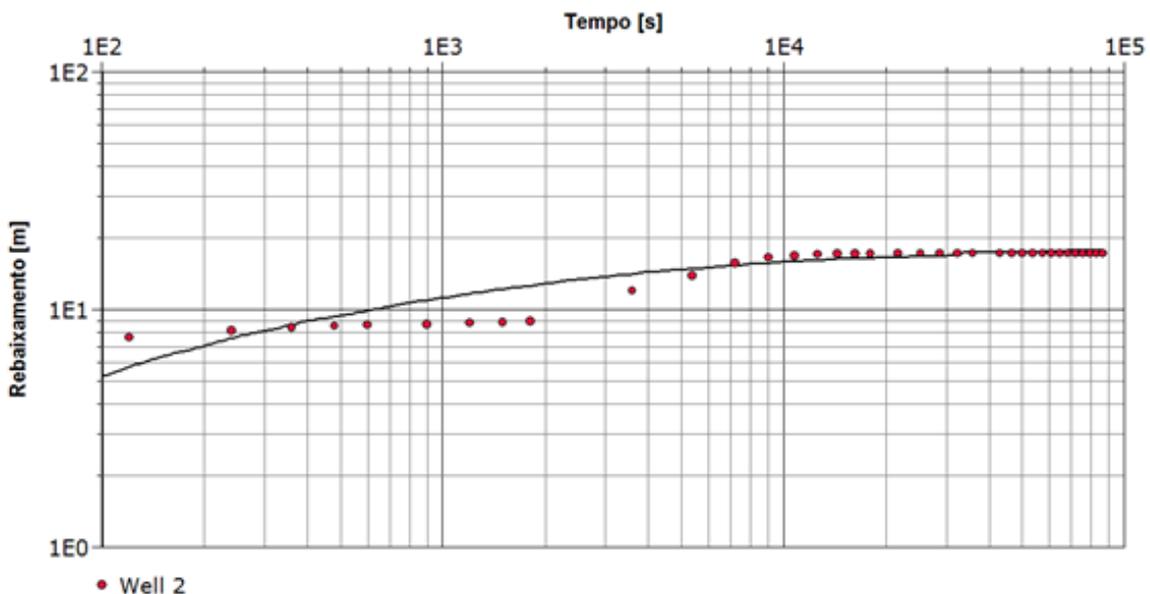


Calculation using Neuman

Observation Well	Transmissivity [m²/s]	Hydraulic Conductivity [m/s]	Specific Yield	Ratio K(v)/K(h)	Ratio Sy/S	Radial Distance to PW [m]
Well 2	3.65×10^{-4}	1.30×10^{-5}	1.42×10^{-1}	3.06×10^{-1}	1.02×10^1	1.41

TESTE 16

Aquifer Thickness: 23.90 m Discharge Rate: 46.08 [m³/h]



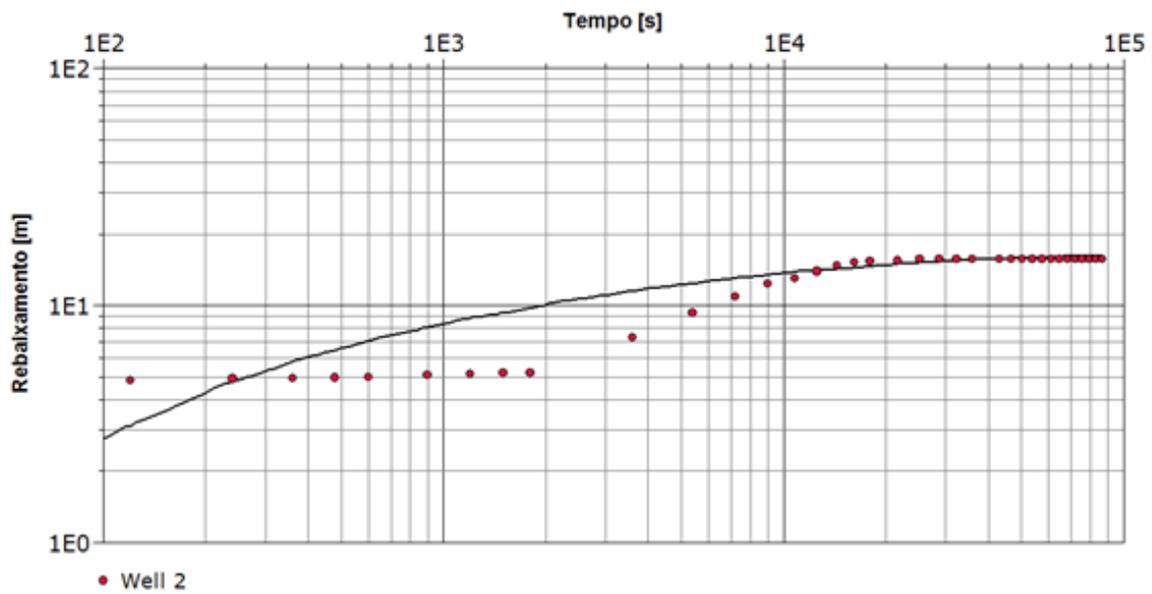
Calculation using Neuman

Observation Well	Transmissivity [m²/s]	Hydraulic Conductivity [m/s]	Specific Yield	Ratio K(v)/K(h)	Ratio Sy/S	Radial Distance to PW [m]
Well 2	3.37×10^{-4}	1.41×10^{-5}	3.41×10^{-1}	2.86×10^{-1}	5.07×10^1	1.41

TESTE 17

Aquifer Thickness: 21.70 m

Discharge Rate: 17.2 [m³/h]



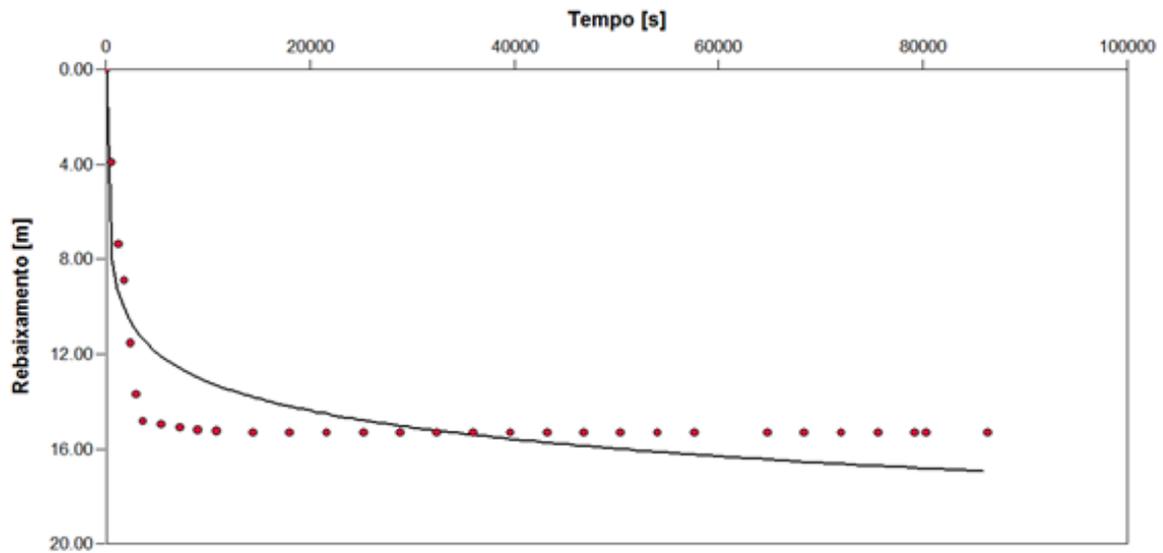
Calculation using Neuman

Observation Well	Transmissivity [m ² /s]	Hydraulic Conductivity [m/s]	Specific Yield	Ratio K(v)/K(h)	Ratio Sy/S	Radial Distance to PW [m]
Well 2	1.29×10^{-4}	5.95×10^{-6}	3.65×10^{-1}	2.74×10^{-1}	5.09×10^1	1.41

TESTE 18

Aquifer Thickness: 33.90 m

Discharge Rate: 42 [m³/h]



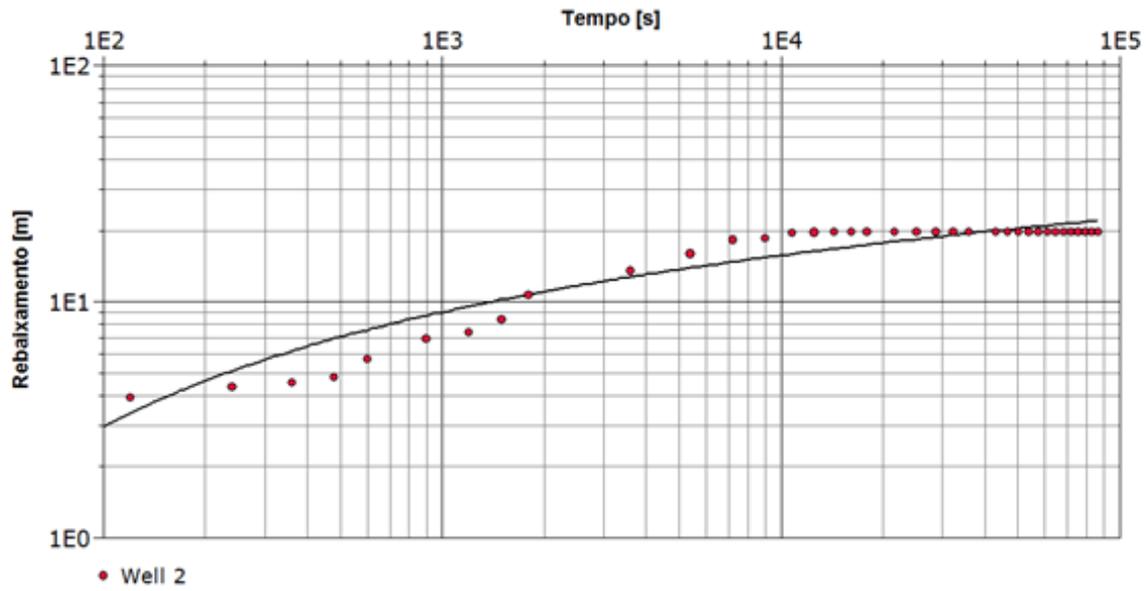
Calculation using Neuman

Observation Well	Transmissivity [m ² /s]	Hydraulic Conductivity [m/s]	Specific Yield	Ratio K(v)/K(h)	Ratio Sy/S	Radial Distance to PW [m]
Well 2	5.27×10^{-4}	1.56×10^{-5}	1.62×10^{-1}	4.49×10^{-1}	4.83×10^1	1.41

TESTE 19

Aquifer Thickness: 30.80 m

Discharge Rate: 69 [m³/h]



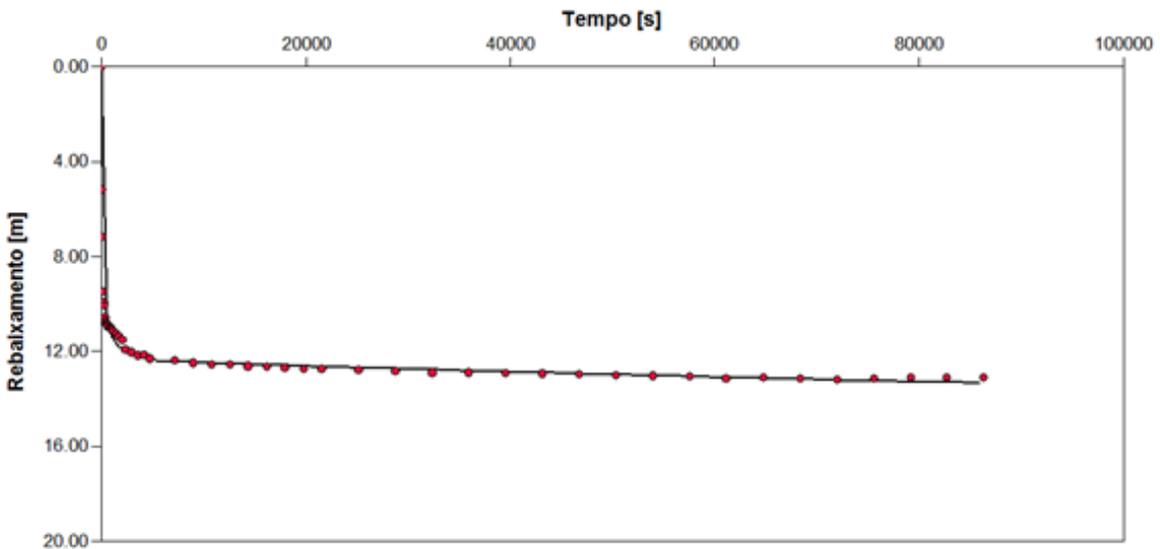
Calculation using Neuman

Observation Well	Transmissivity [m ² /s]	Hydraulic Conductivity [m/s]	Specific Yield	Ratio K(v)/K(h)	Ratio Sy/S	Radial Distance to PW [m]
Well2	5.21×10^{-4}	1.69×10^{-5}	3.90×10^{-1}	4.00×10^{-1}	1.43×10^1	1.41

TESTE 20

Aquifer Thickness: 29.96 m

Discharge Rate: 42.2 [m³/h]



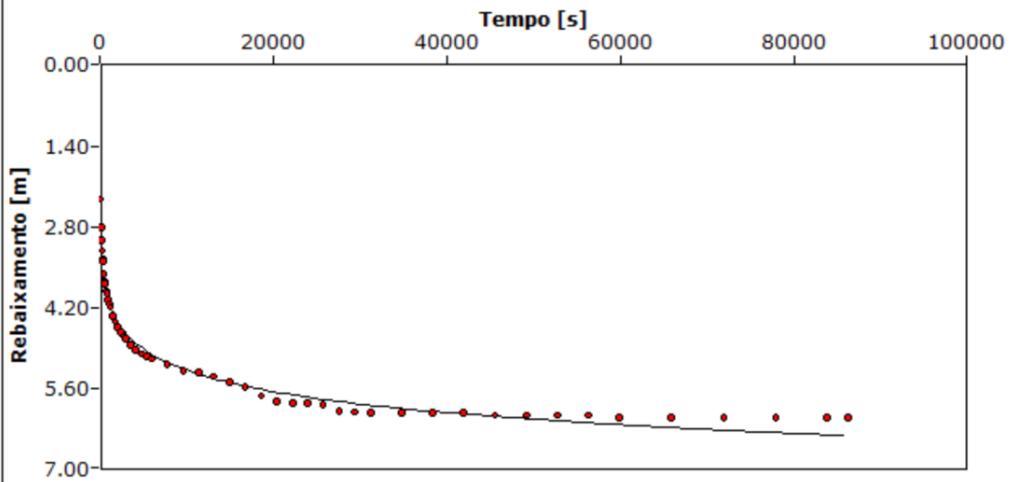
Calculation using Neuman

Observation Well	Transmissivity [m ² /s]	Hydraulic Conductivity [m/s]	Specific Yield	Ratio K(v)/K(h)	Ratio Sy/S	Radial Distance to PW [m]
Well2	4.18×10^{-4}	1.39×10^{-5}	2.60×10^{-1}	5.56×10^{-1}	2.42×10^2	1.41

TESTE 21

Aquifer Thickness: 16.00 m

Discharge Rate: 39 [m³/h]



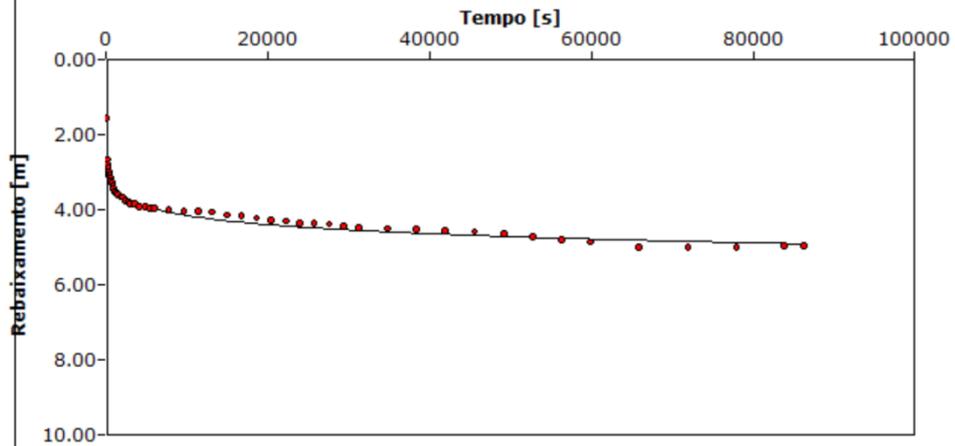
Calculation using Neuman

Observation Well	Transmissivity [m ² /s]	Hydraulic Conductivity [m/s]	Specific Yield	Ratio K(v)/K(h)	Ratio Sy/S	Radial Distance to PW [m]
Poço 6 F	1.63×10^{-3}	1.02×10^{-4}	1.64×10^{-2}	9.68×10^{-3}	1.02×10^1	1.0

TESTE 22

Aquifer Thickness: 26.98 m

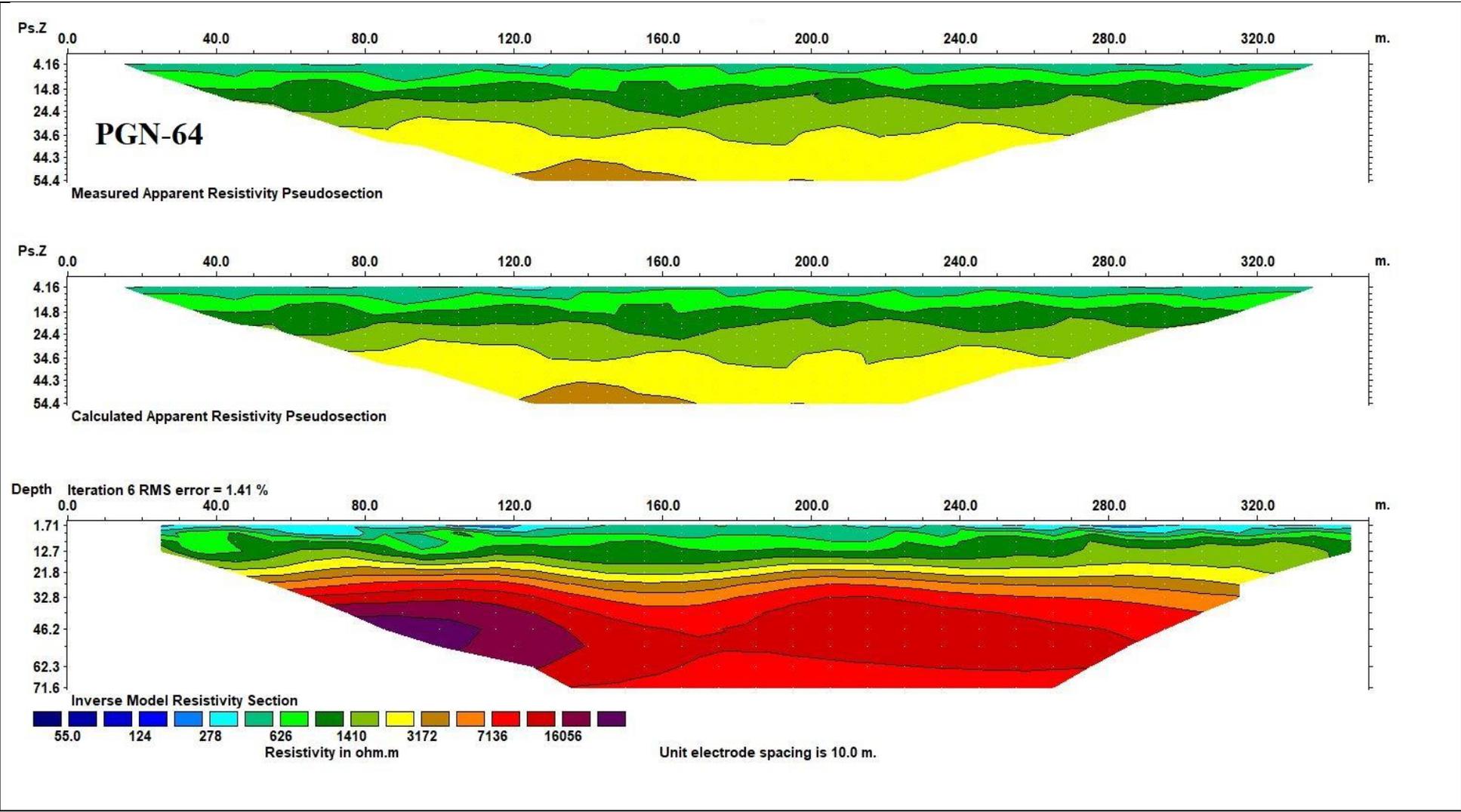
Discharge Rate: 66 [m³/h]

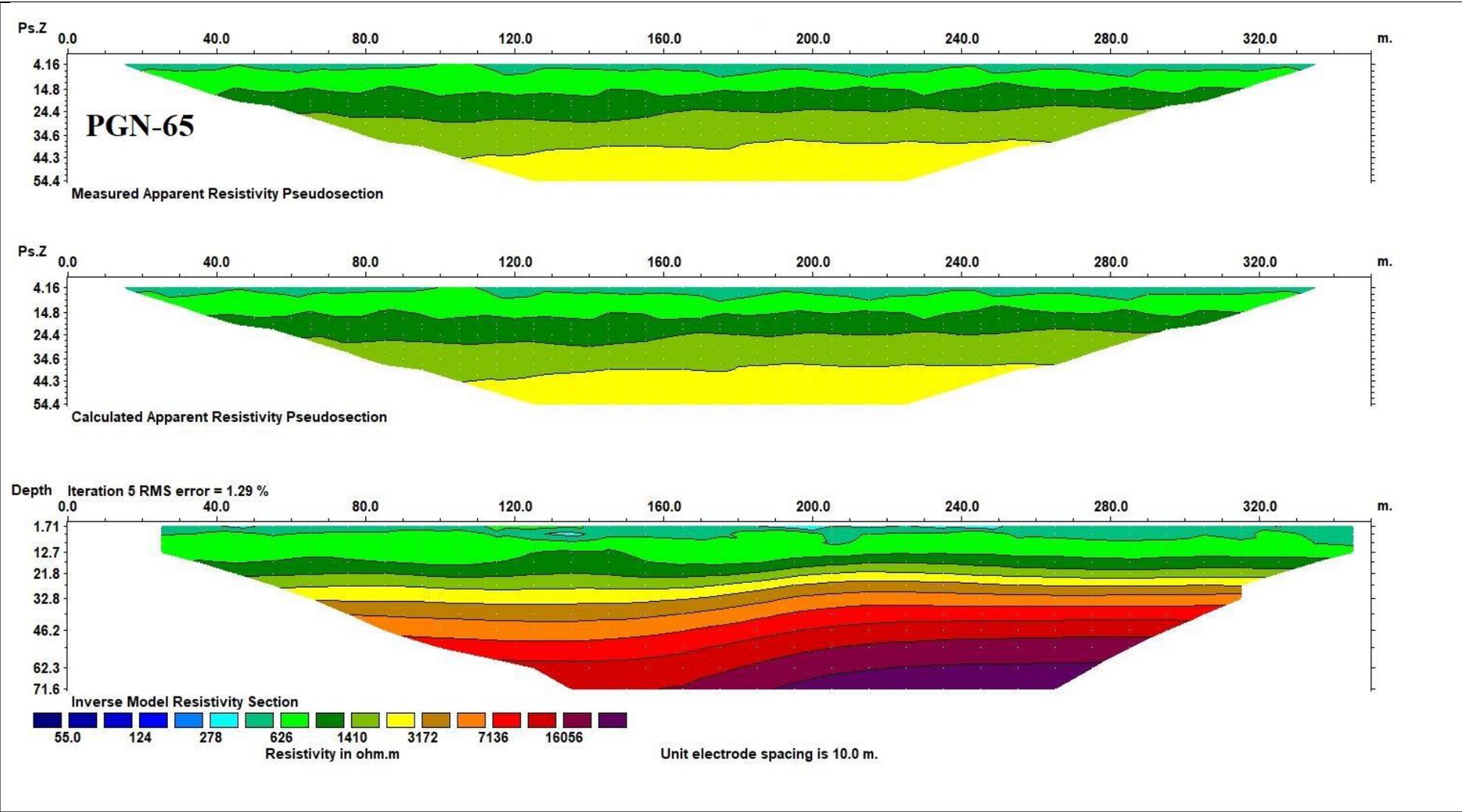


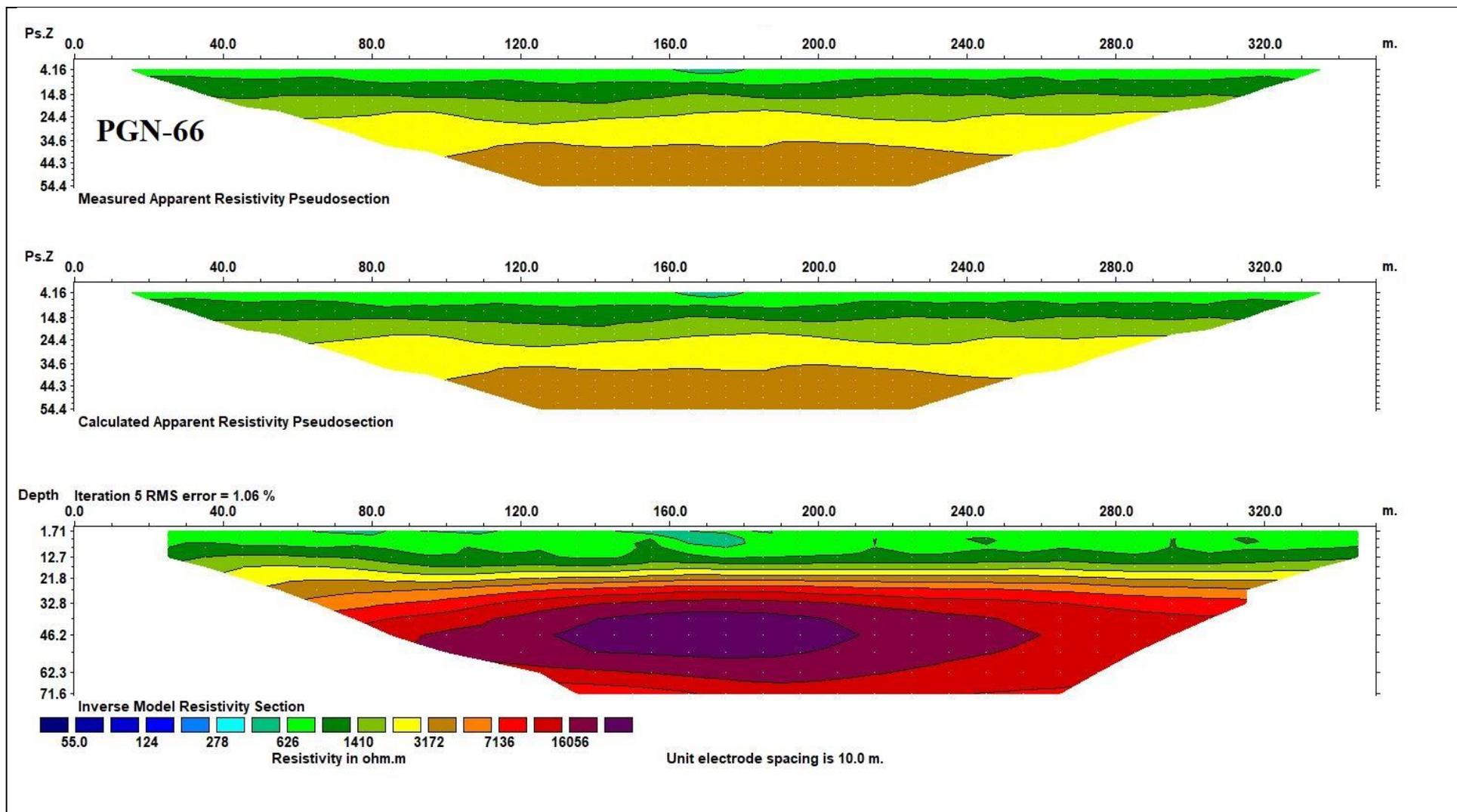
Calculation using Neuman

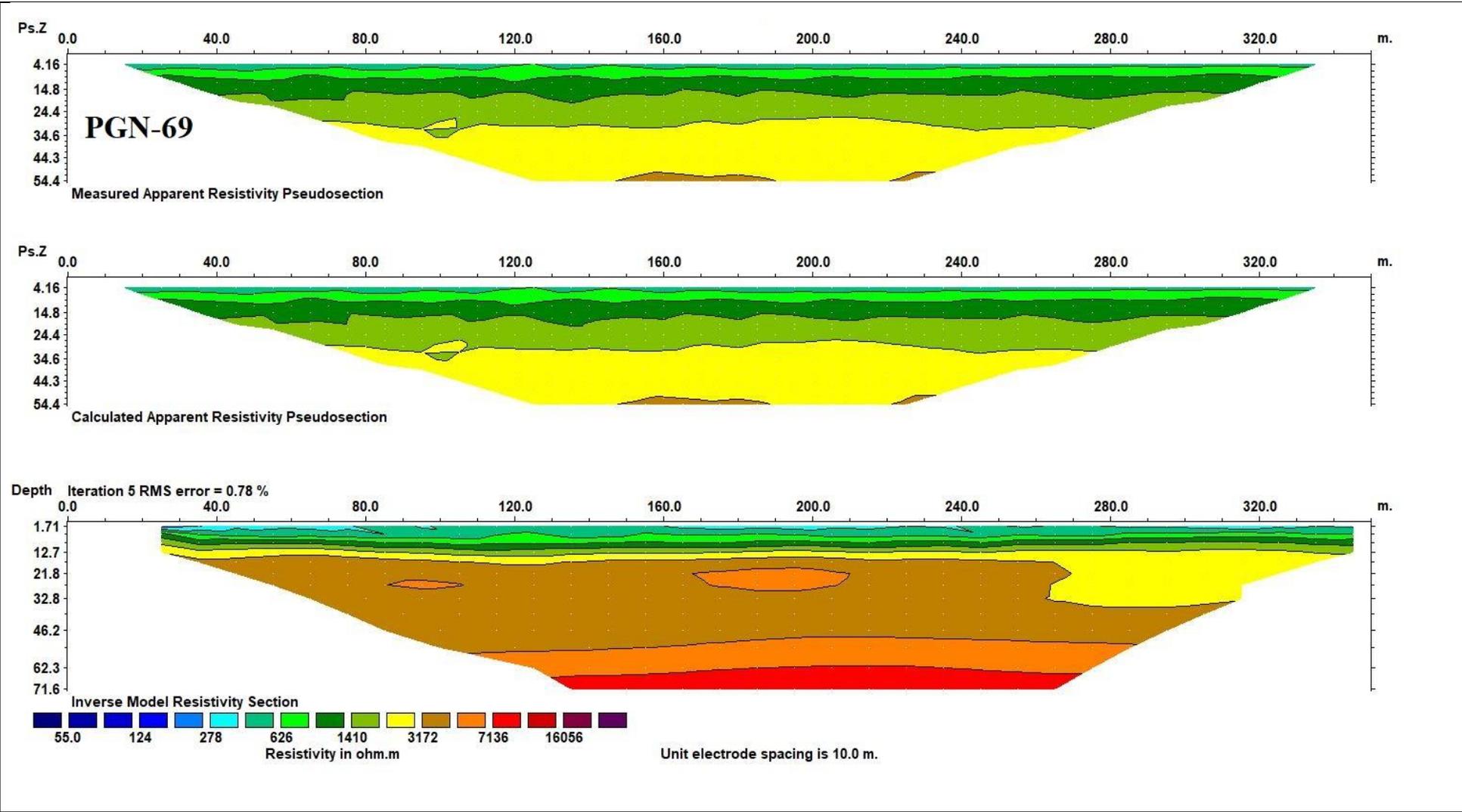
Observation Well	Transmissivity [m ² /s]	Hydraulic Conductivity [m/s]	Specific Yield	Ratio K(v)/K(h)	Ratio Sy/S	Radial Distance to PW [m]
Poço 8 F	4.19×10^{-3}	1.55×10^{-4}	1.98×10^{-2}	8.73×10^{-3}	3.39×10^1	1.0

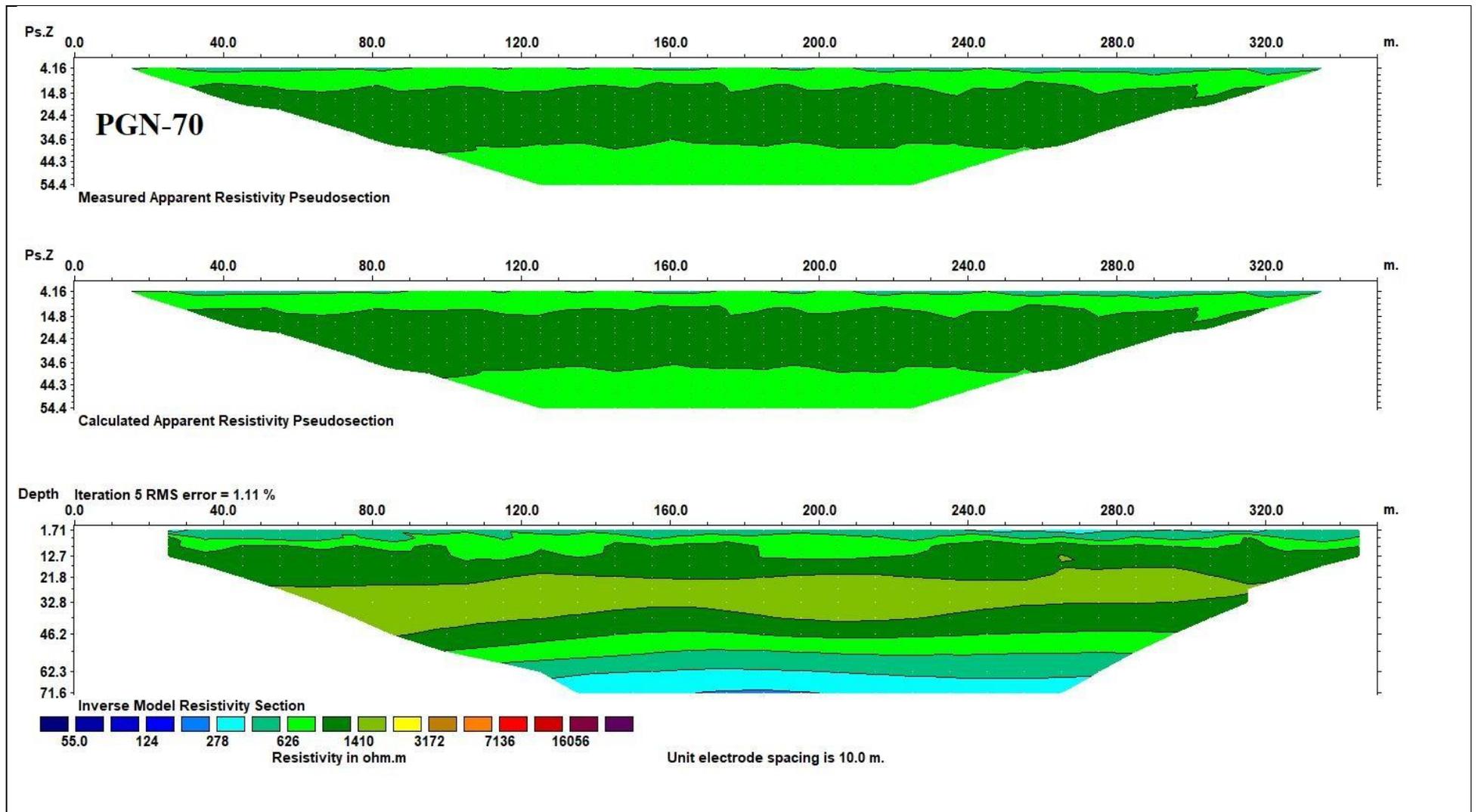
APÊNCIDE II – Perfis Geofísicos

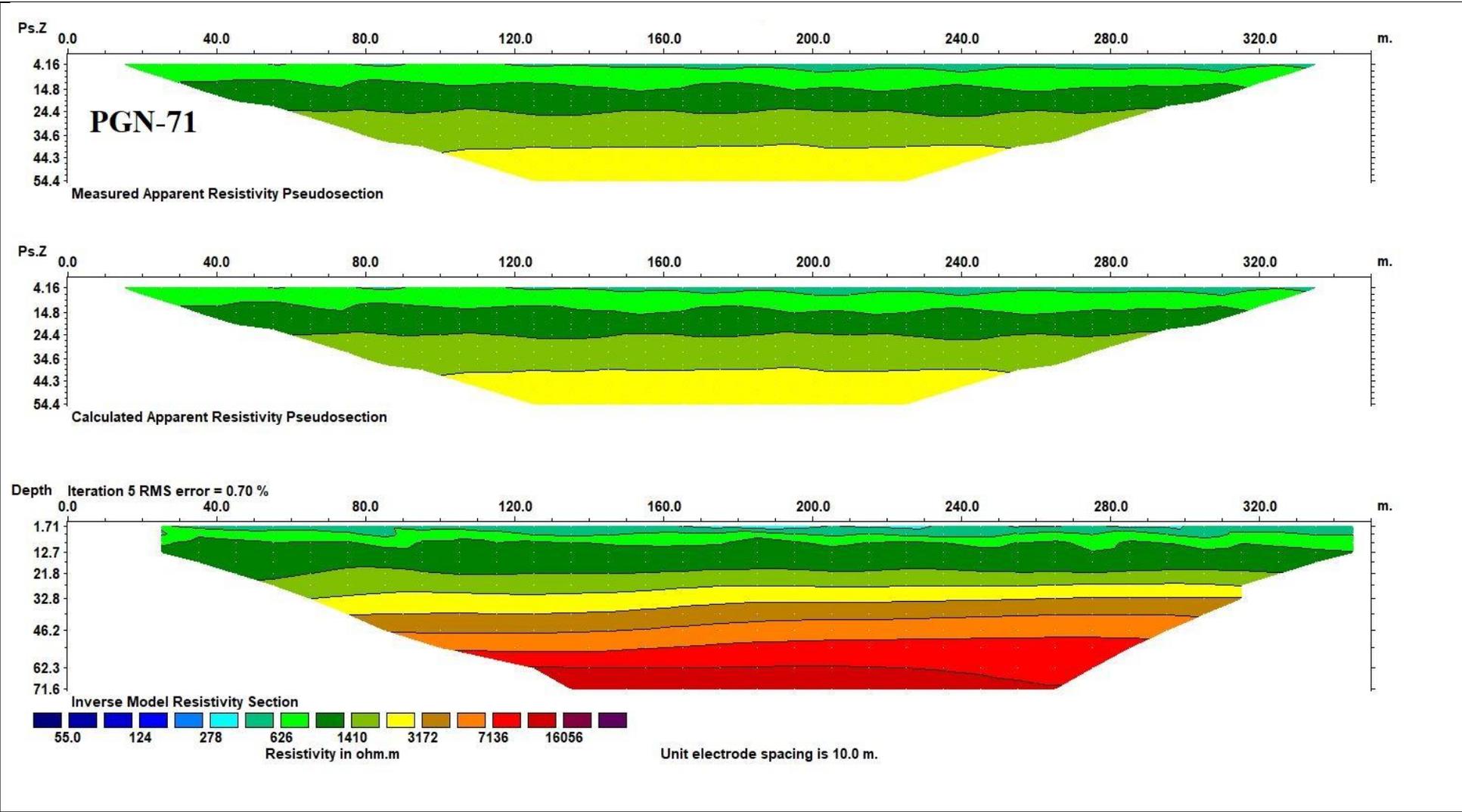


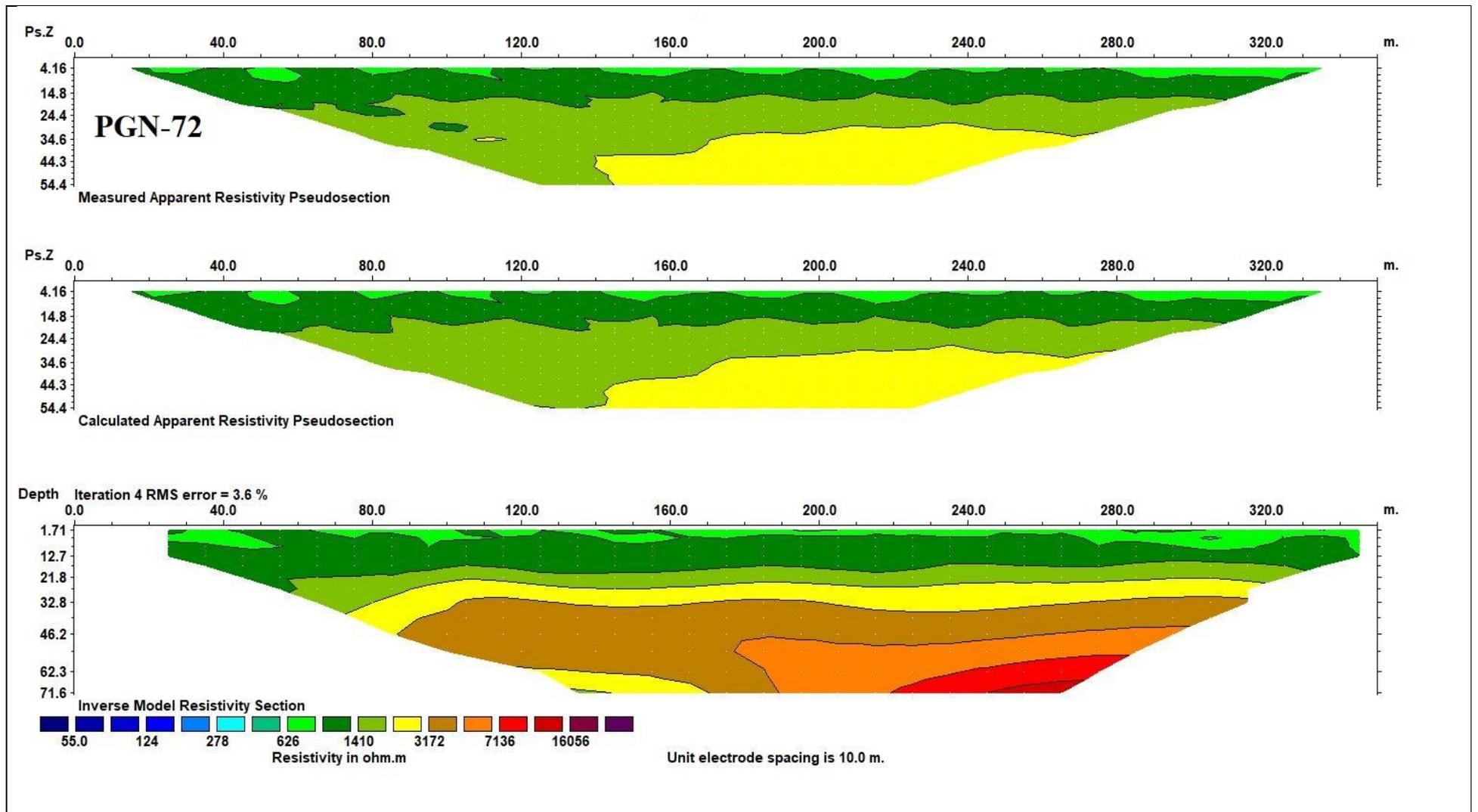


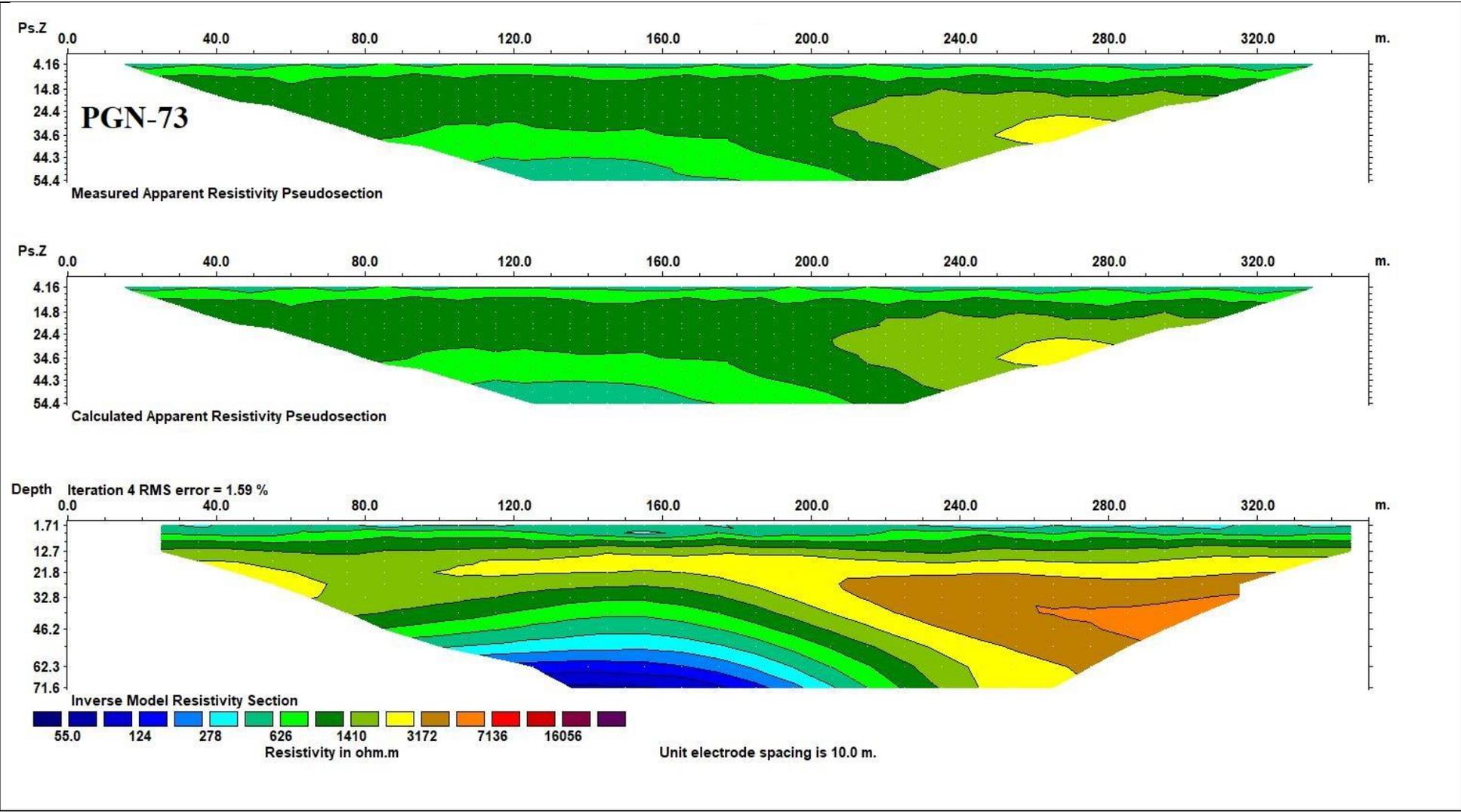


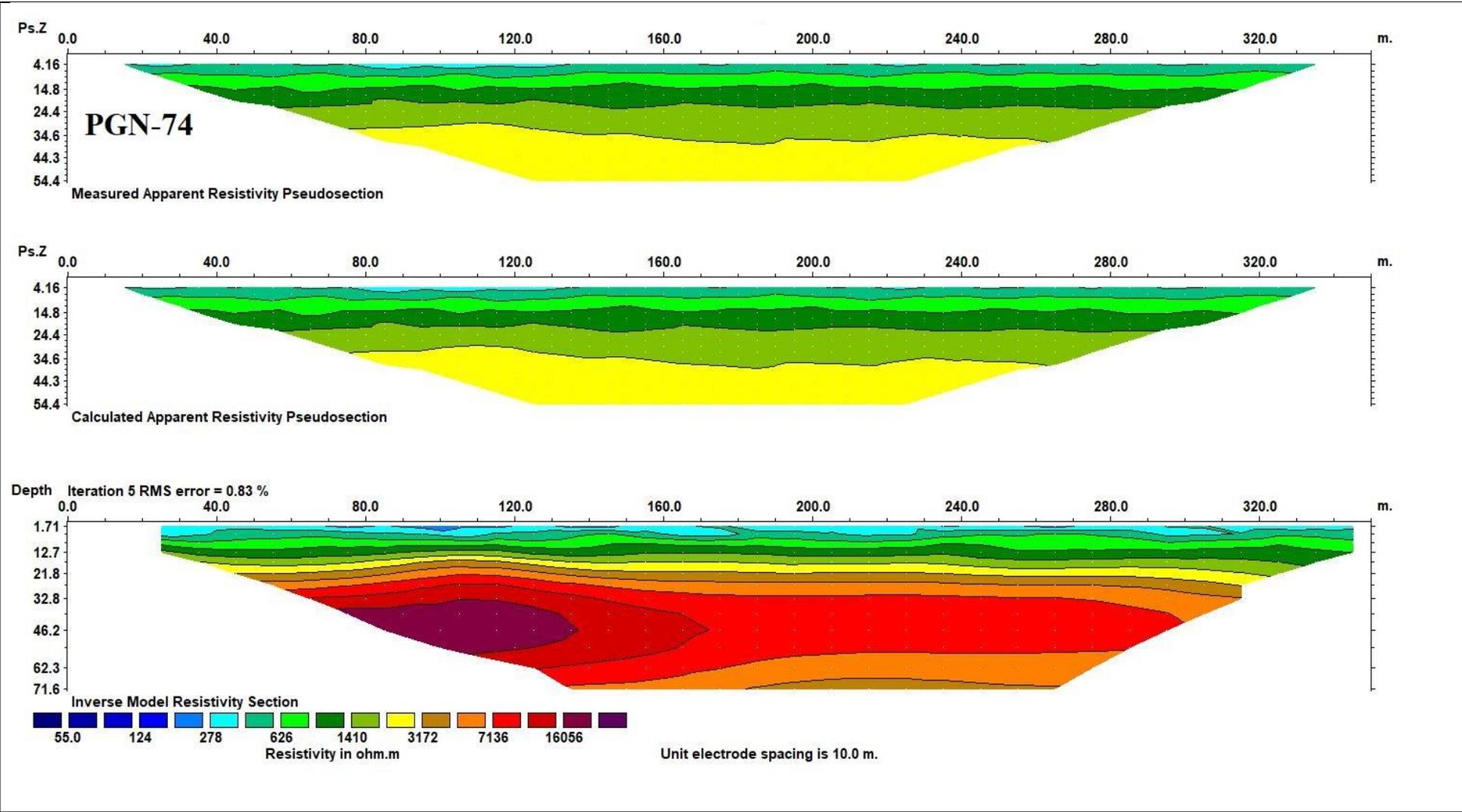


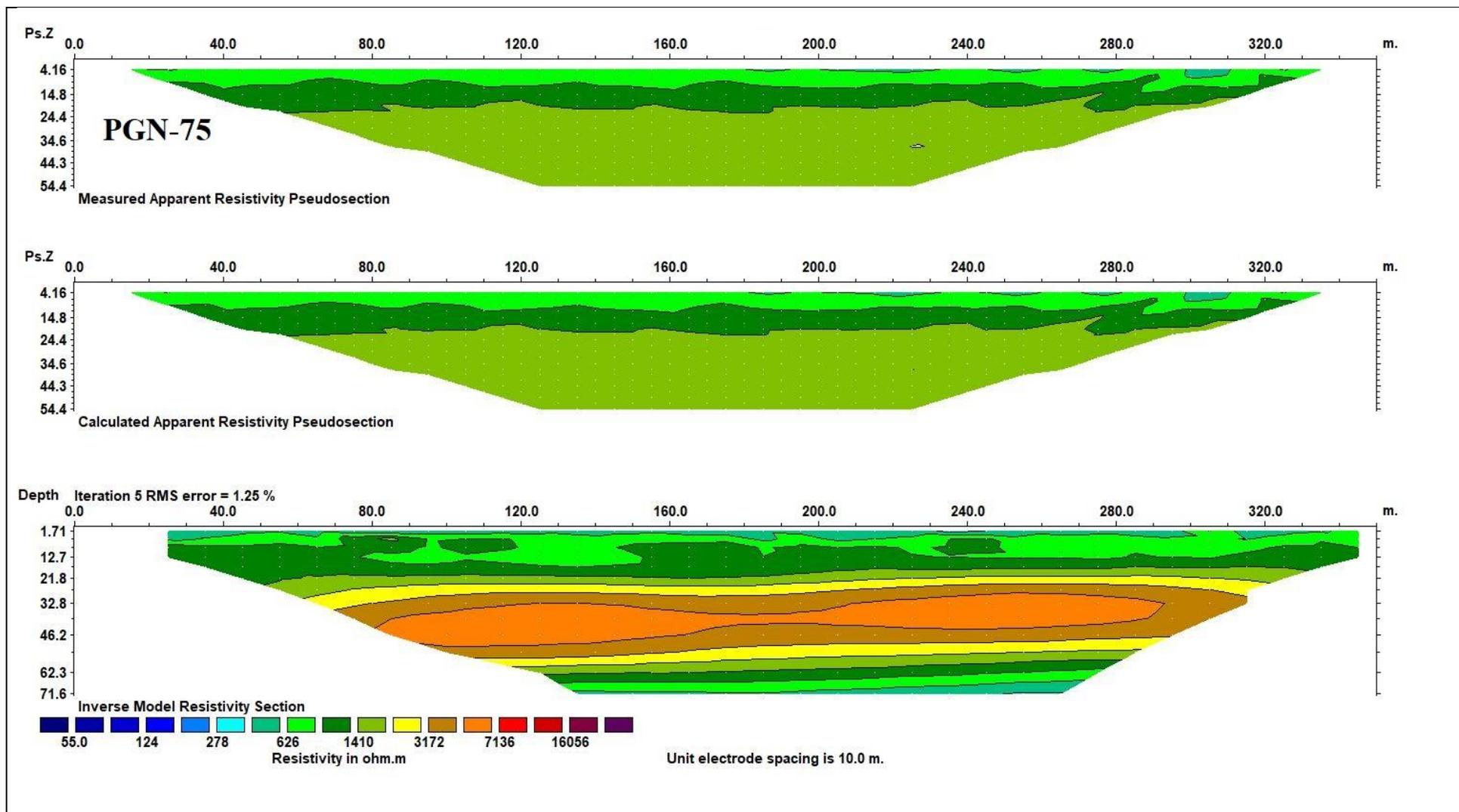


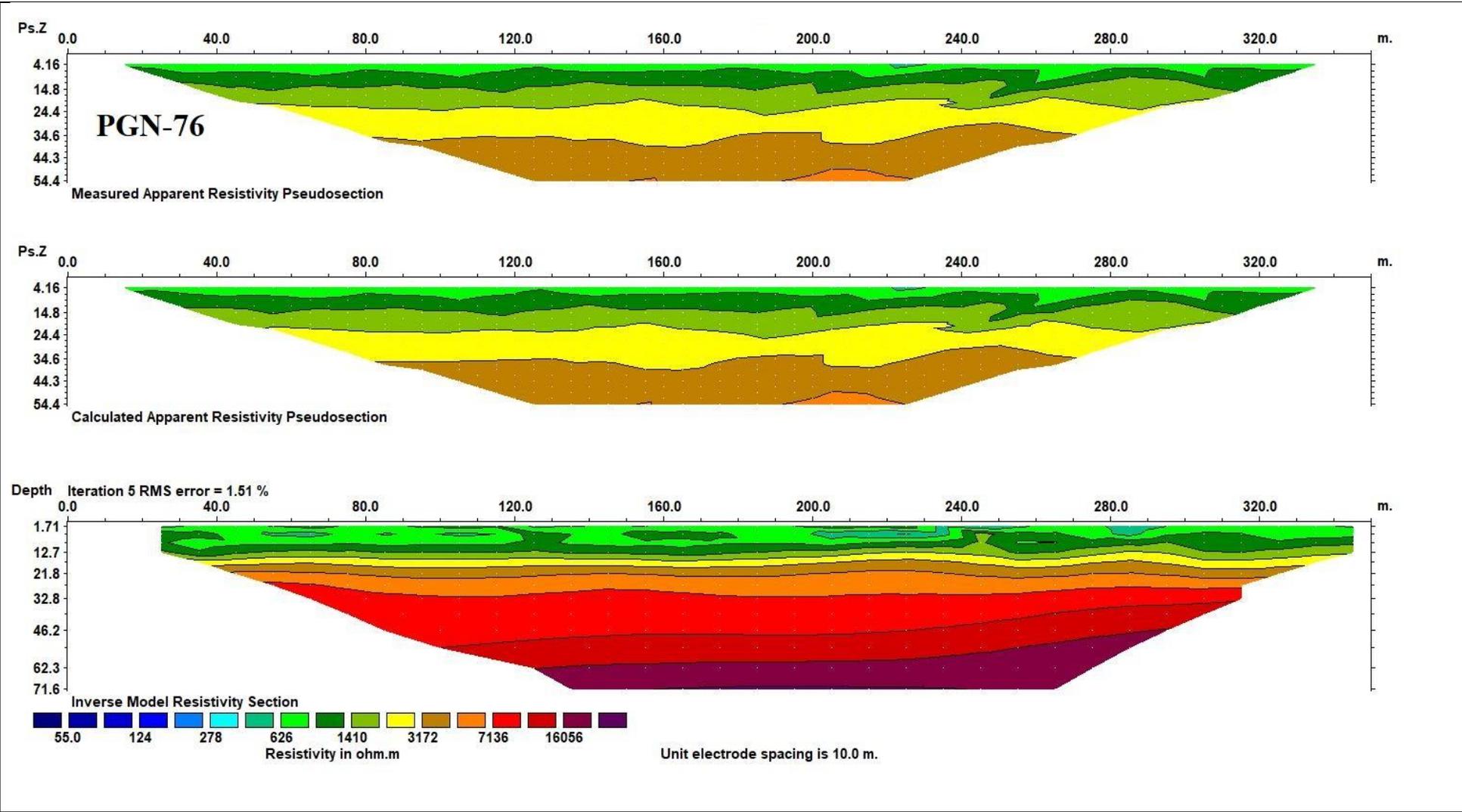


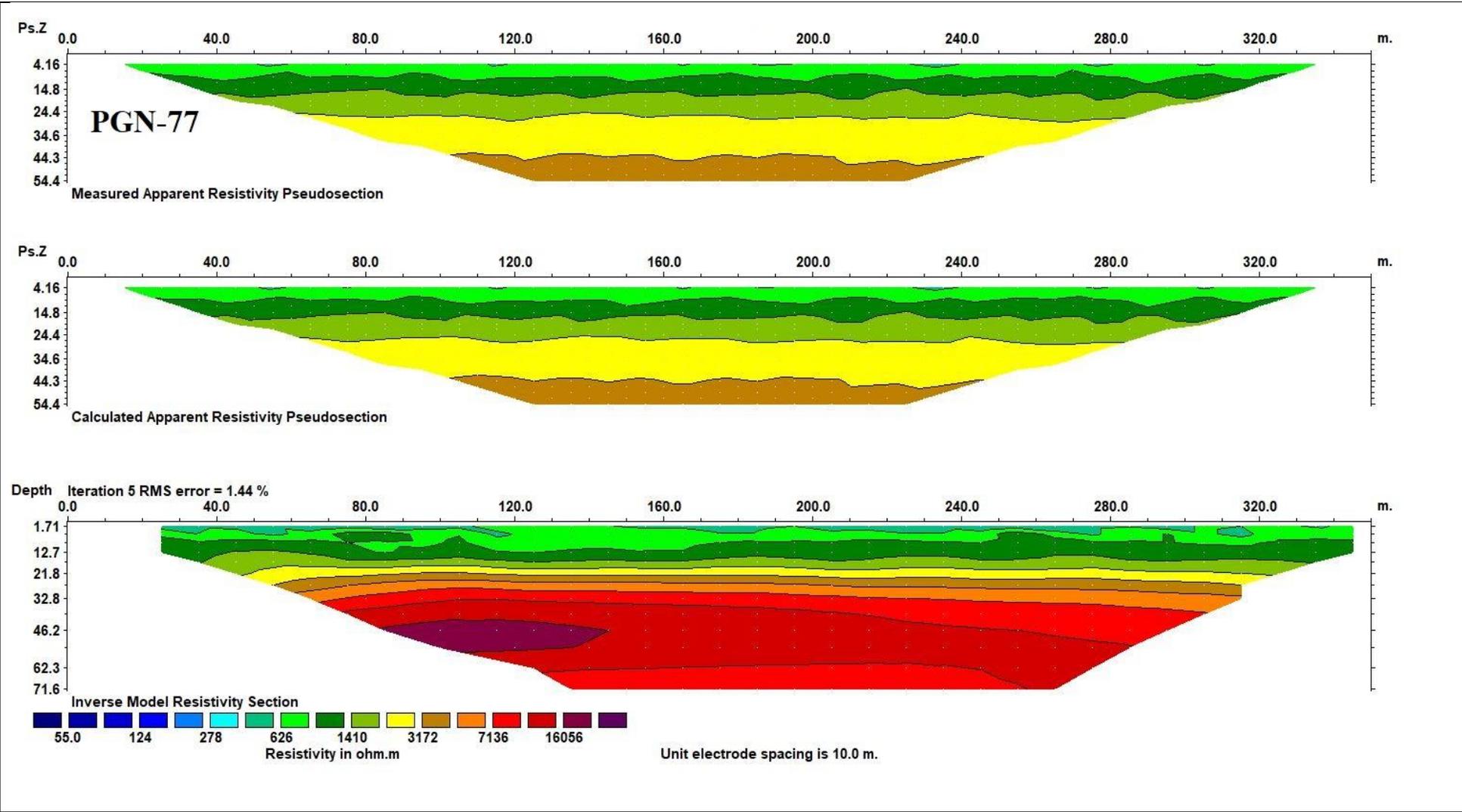


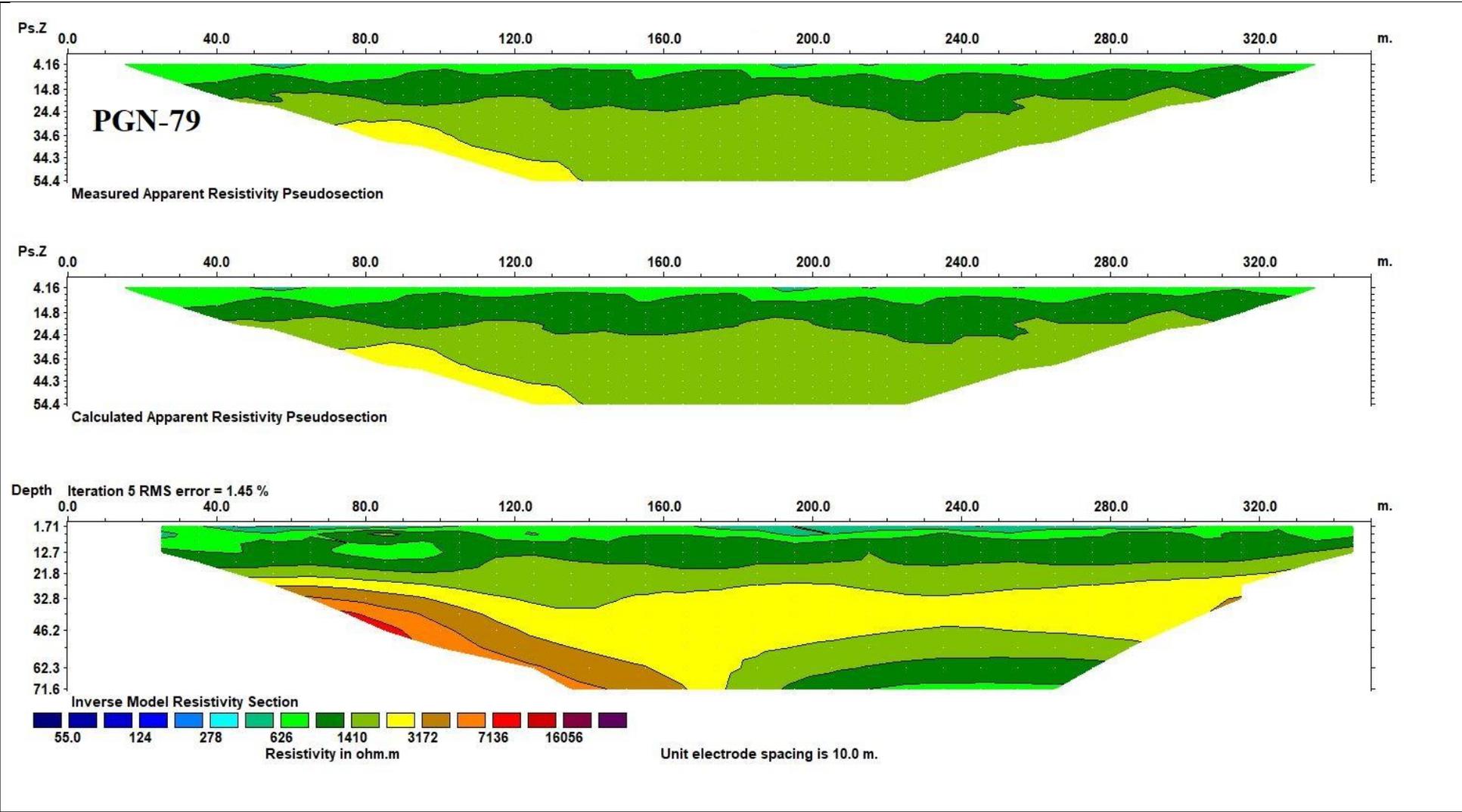


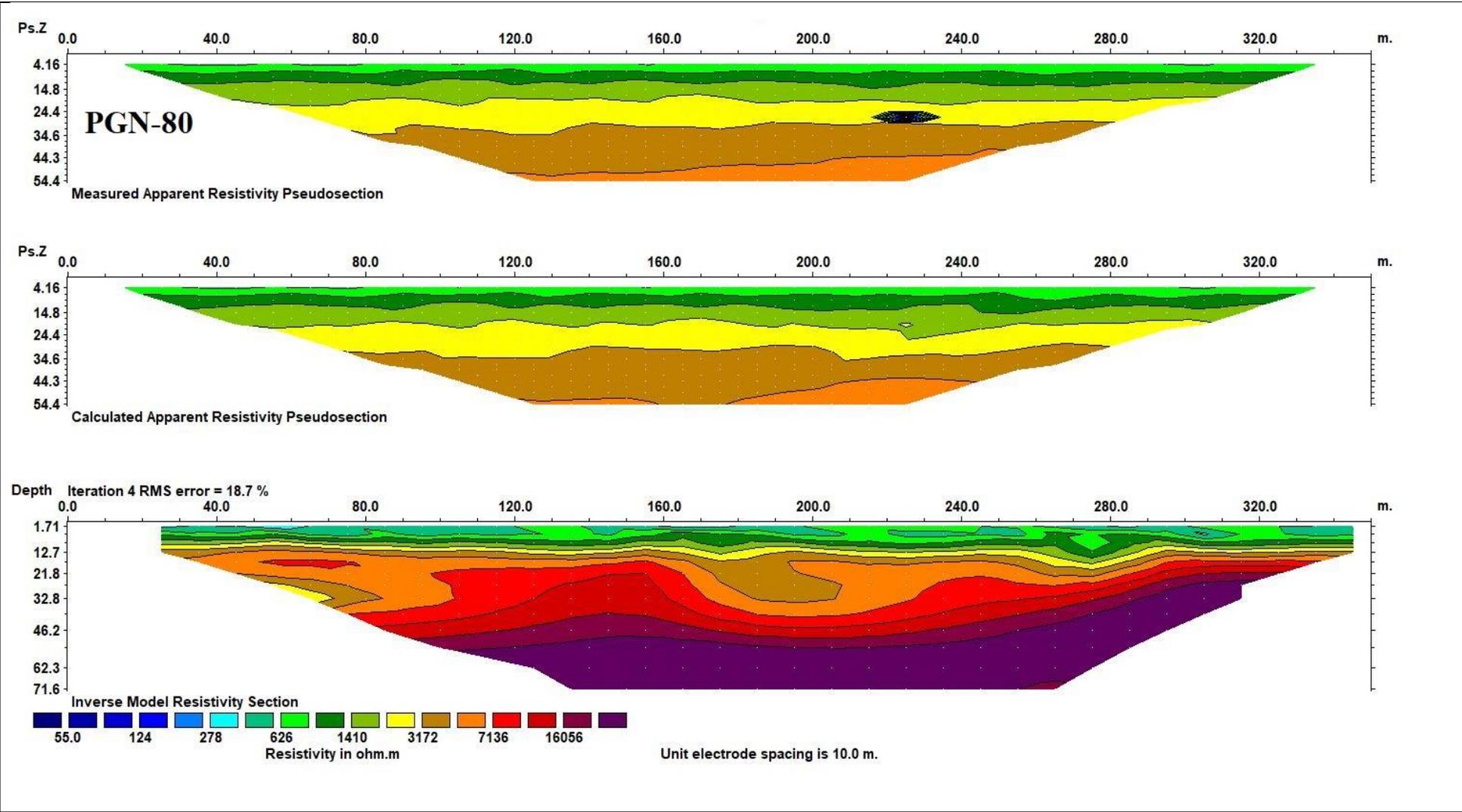


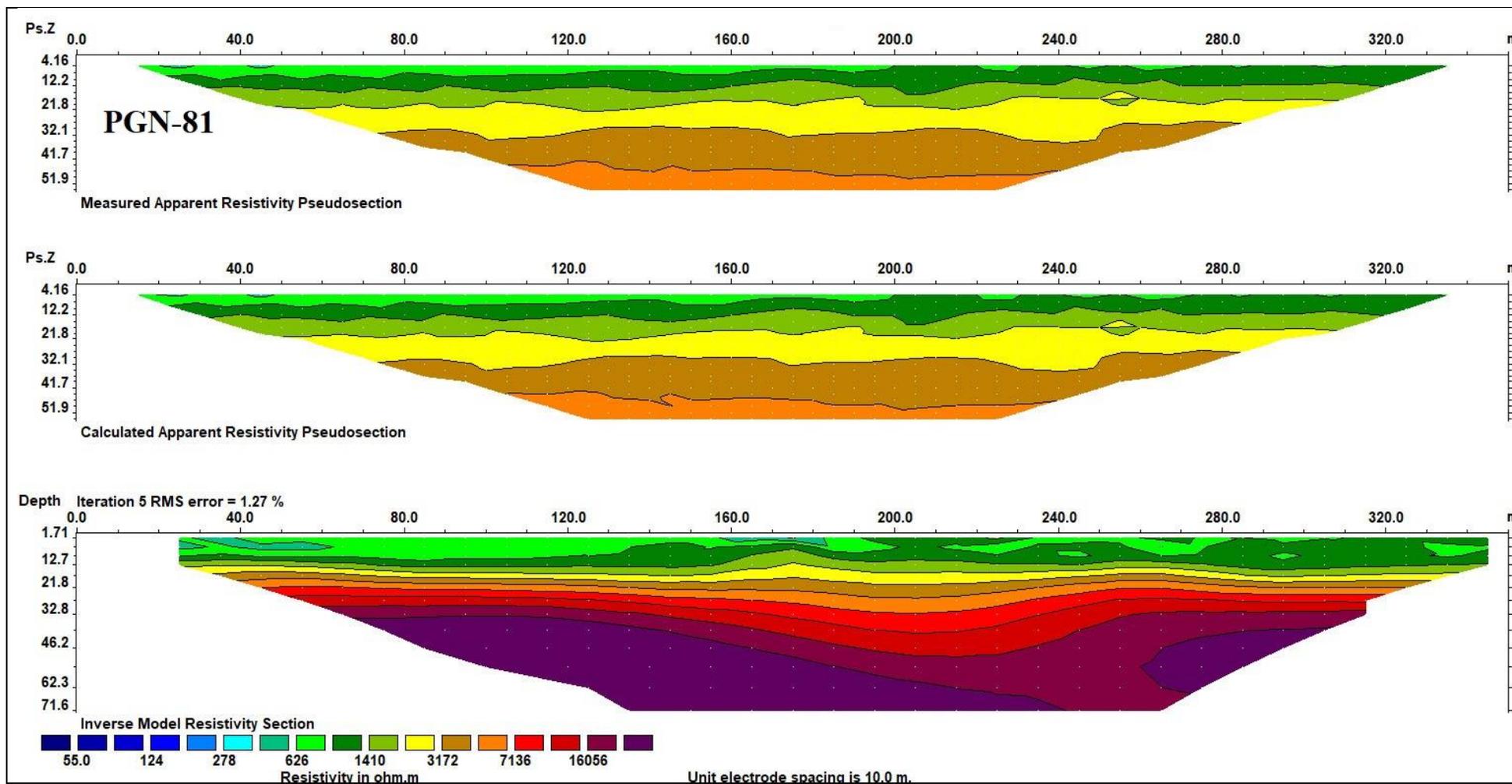




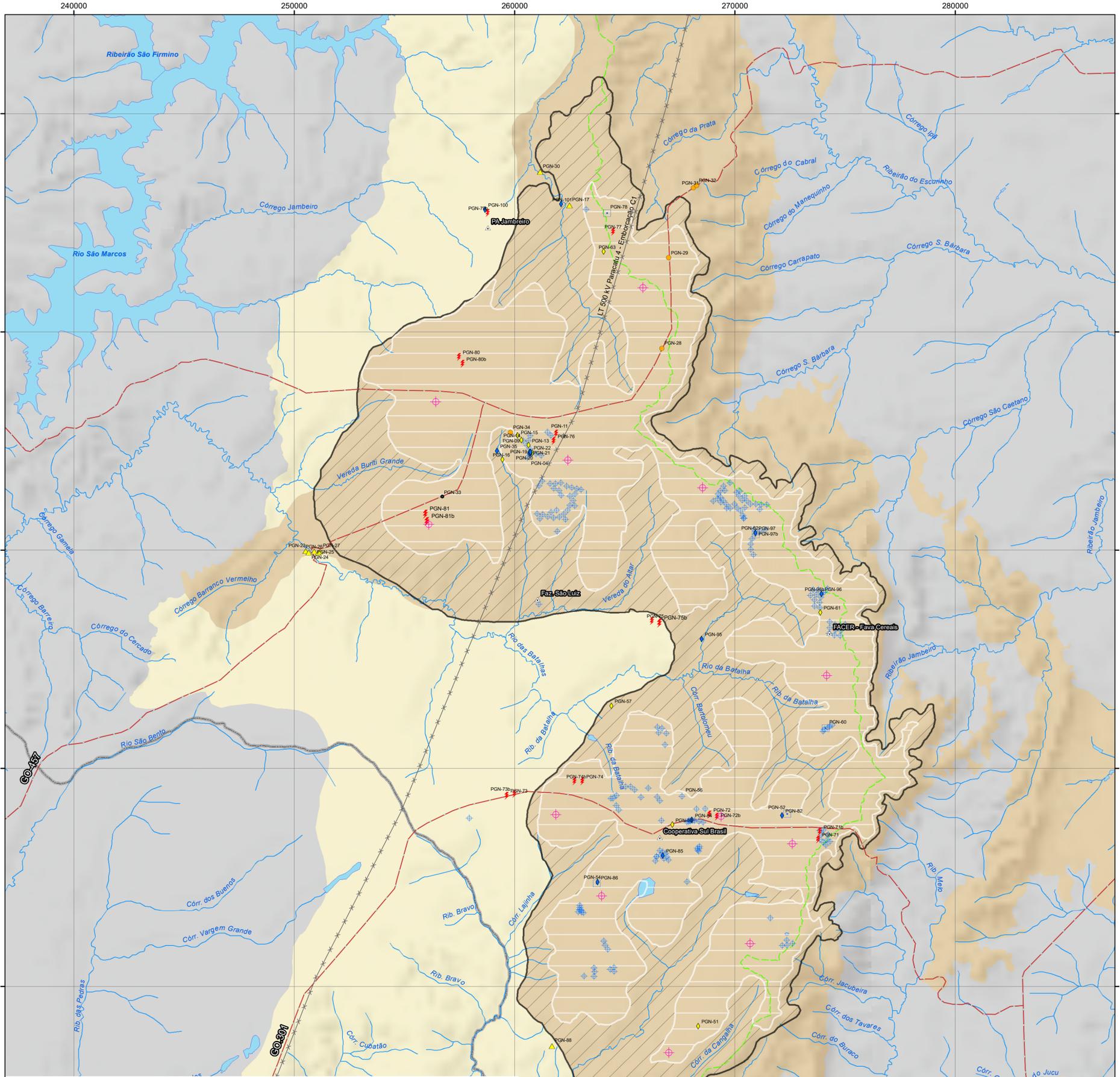








APÊNCIDE III – Mapa de Delimitação do Aquífero Batalha



Legenda

- ⊕ Proposta de Poços de Monitoramento
 - ⊙ Sede Municipal
 - △ Propriedade Rural
 - ▲ Afloramento Rochoso
 - ▲ Amostragem do Aquífero
 - ◆ Análise de Qualidade da Água
 - ◇ Ensaios de Infiltração
 - Nascente
 - Ponto de Controle
 - ⚡ Perfis Geofísicos
 - Perfis de Solo
 - Piscinão
 - ⊕ Poços
 - Divisor Hidrogeológico
 - Rodovias
 - Hidrografia
 - Corpo d'água
 - Limite Estadual
 - Limite Municipal
- Aquífero Batalha**
- Área Total (745 km²)
 - Área de Recarga Local (318,5 km²)
 - Área de Recarga Regional (425,7 km²)
- Unidades Geológicas Grupo Canastra**
- Formação Serra da Batalha
 - Predomínio de Filitos
 - Predomínio de Quartzitos
 - Formação Serra da Urucânia
 - Filitos

Localização



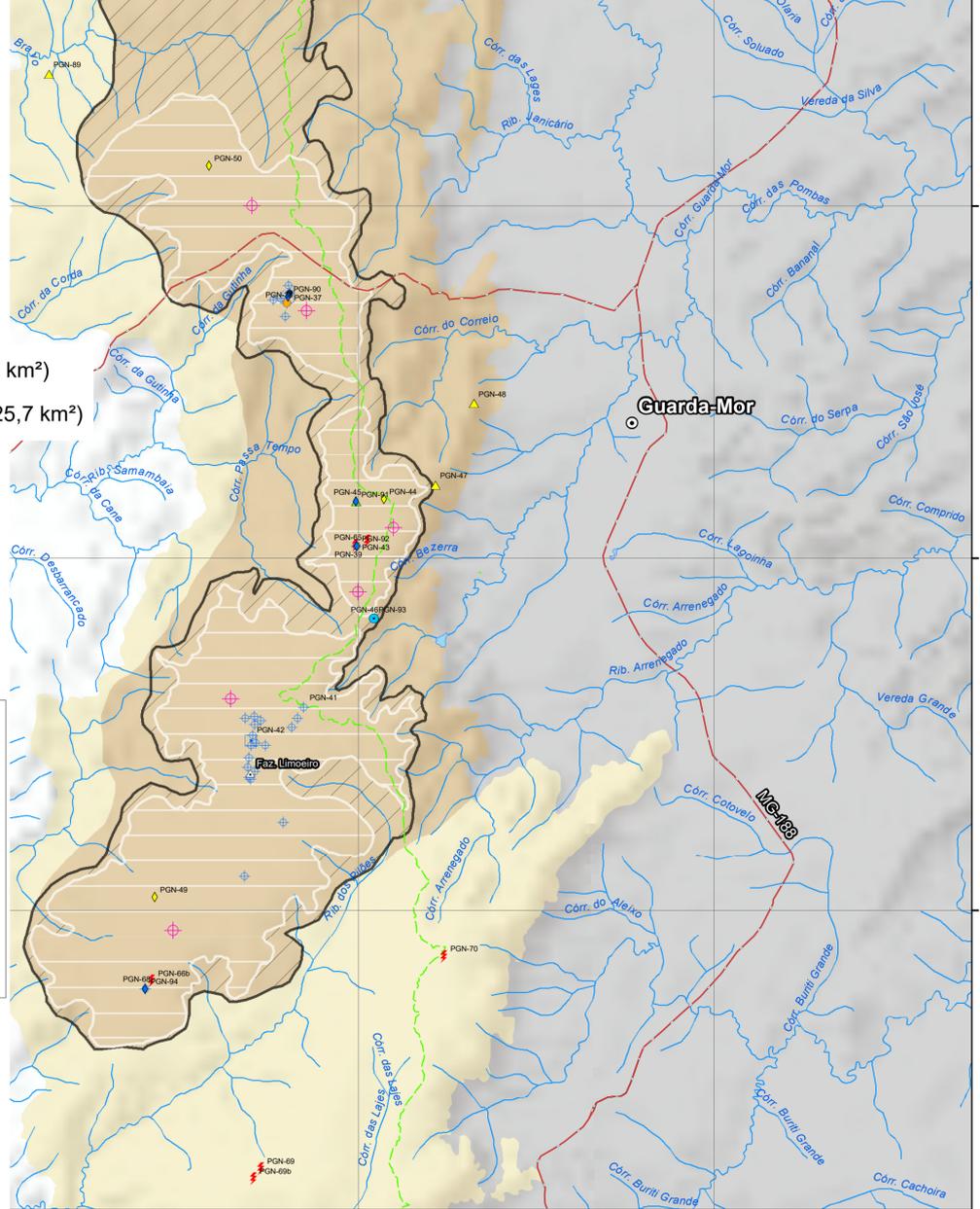
**APÊNDICE III
Mapa de Delimitação do Aquífero Batalha**

Sistema de Coordenadas UTM
SIRGAS 2000 Zona 23 S



Autores:
Guilherme Neiva Rodrigues Oliveira
José Eloi Guimarães Campos

Data:
20/03/2019



**APÊNCIDE IV – Cadastro dos poços utilizados na caracterização e delimitação do
Aquífero Batalha.**

NE = Nível Estático; ND = Nível Dinâmico; SW = Rebaixamento; Cp = Capacidade Específica; P= Profundidade do Poço; Q = Vazão; b = Espessura Saturada.

Fonte: SUPRAM-NOR.

Processo de Outorga	Propriedade	Coordenadas		NE (m)	ND (m)	sw (m)	Cp (m ³ /h/m)	P (m)	Q (m ³ /h)	b (m)
		X	Y							
12973/2013	Faz PCMOR Lote 19	266438	8055952	12,01	22,71	10,7	3,31	49,0	35,40	36,99
1329/2018	Faz Batalha do Bartolomeu, Altar e Boginho - Lote 07	266473	8061884	11,40	17,92	6,52	6,44	40,0	42,00	28,60
1330/2018	Faz Batalha do Bartolomeu, Altar e Boginho - Lote 07	266683	8061837	10,92	18,54	7,62	4,99	40,0	38,00	29,08
1331/2018	Faz Batalha do Bartolomeu, Altar e Boginho - Lote 07	266881	8061602	11,90	18,48	6,58	5,47	40,0	36,00	28,10
13485/2013	Faz Batalha do Bartolomeu, Altar e Boginho - Lote 11	266583	8058505	5,35	14,45	9,10	5,09	40,0	46,30	34,65
16014/2013	Faz PCMOR Lote 19	266770	8055869	6,15	28,75	22,6	2,27	49,0	51,30	42,85
16015/2013	Faz PCMOR Lote 19	266388	8055760	6,30	28,63	22,33	1,73	51,0	38,60	44,70
16016/2013	Faz PCMOR Lote 19	266632	8056027	6,45	30,65	24,20	2,13	52,0	51,60	45,55
16017/2013	Faz PCMOR Lote 19	266977	8055797	6,03	28,43	22,40	2,16	52,0	48,30	45,97
16018/2013	Faz PCMOR Lote 19	266719	8056160	6,85	24,10	17,25	3,54	50,0	61,00	43,65
16019/2013	Faz PCMOR Lote 19	266862	8056106	6,40	30,53	24,13	1,80	51,0	43,40	44,90
16020/2013	Faz PCMOR Lote 19	266911	8055944	6,15	28,33	22,18	1,99	52,0	44,20	45,85
16021/2013	Faz PCMOR Lote 19	266589	8056232	6,60	23,70	17,10	3,23	53,0	55,25	46,40
16022/2013	Faz PCMOR Lote 19	266439	8055954	6,70	24,33	17,63	3,08	49,0	54,32	42,30
17034/2017	Faz Melo	274123	8056484	13,22	26,19	12,97	2,58	40,0	33,44	26,78
17035/2017	Faz Melo	274227	8056962	12,95	26,03	13,08	4,17	40,0	54,57	27,05
17036/2017	Faz Melo	274003	8056606	13,15	27,08	13,93	4,77	40,0	66,50	26,85
17037/2017	Faz Melo	273841	8057142	13,21	25,20	11,99	3,74	40,0	44,90	26,79
17038/2017	Faz Melo	274170	8056716	12,98	26,18	13,20	3,50	40,0	46,20	27,02
17039/2017	Faz Melo	274316	8056650	13,05	26,08	13,03	2,92	40,0	38,00	26,95
17040/2017	Faz Melo	273931	8056990	13,00	22,45	9,45	4,25	40,0	40,18	27,00
17041/2017	Faz Melo	274018	8057175	13,23	23,20	9,97	4,06	40,0	40,50	26,77
17042/2017	Faz Melo	273846	8056743	13,10	23,01	9,91	3,34	40,0	33,10	26,90
17742/2015	Faz Batalha do Bartolomeu e Borginho - Lote 10	265263	8059166	10,00	30,20	20,20	1,58	38,0	32,00	28,00
17743/2015	Faz Batalha do Bartolomeu e Borginho - Lote 10	265441	8059015	9,20	28,98	19,78	3,49	40,0	69,00	30,80
17744/2015	Faz Batalha do Bartolomeu e Borginho - Lote 10	265027	8059164	9,50	29,41	19,91	1,91	37,0	38,00	27,50
17797/2013	Faz Batalha do Bartolomeu, Altar e Boginho- Lote 11	266661	8057608	6,28	19,80	13,52	3,93	40,0	53,10	33,72
17798/2013	Faz Batalha do Bartolomeu, Altar e Boginho- Lote 11	266466	8058688	5,15	24,17	19,02	2,37	40,0	45,00	34,85
19581/2013	Faz Batalha do Bartolomeu, Altar e Boginho - Lote 20	268314	8056262	5,60	23,35	17,75	3,29	50,0	58,38	44,40
19582/2013	Faz Batalha do Bartolomeu, Altar e Boginho - Lote 20	268347	8056200	5,30	21,78	16,48	3,70	50,0	60,93	44,70
19583/2013	Faz Batalha do Bartolomeu, Altar e Boginho - Lote 20	268375	8056342	4,40	14,57	10,17	5,56	51,0	56,52	46,60
19584/2013	Faz Batalha do Bartolomeu, Altar e Boginho - Lote 20	268383	8056419	4,70	18,35	13,65	4,46	49,0	60,89	44,30
19585/2013	Faz Batalha do Bartolomeu, Altar e Boginho - Lote 20	268293	8056344	5,70	12,50	6,80	5,89	48,0	40,05	42,30
19586/2013	Faz Batalha do Bartolomeu, Altar e Boginho - Lote 20	267821	8054798	5,00	22,50	17,50	1,26	47,0	22,00	42,00
21802/2014	Faz Batalha do Bartolomeu, Altar e Borginho - Lote 12	267915	8057604	7,28	27,68	20,40	2,13	45,0	43,54	37,72
21803/2014	Faz Batalha do Bartolomeu, Altar e Borginho - Lote 12	268160	8057610	8,10	29,14	21,04	4,21	46,0	88,52	37,90

Processo de Outorga	Propriedade	Coordenadas		NE (m)	ND (m)	sw (m)	Cp (m³/h/m)	P (m)	Q (m³/h)	b (m)
		X	Y							
21804/2014	Faz Batalha do Bartolomeu, Altar e Borginho - Lote 12	268072	8057606	8,05	24,37	16,32	3,26	47,0	53,18	38,95
21805/2014	Faz Batalha do Bartolomeu, Altar e Borginho - Lote 12	267980	8057577	7,94	20,80	12,86	3,98	48,0	51,24	40,06
21806/2014	Faz Batalha do Bartolomeu, Altar e Borginho - Lote 12	267906	8057561	7,00	22,87	15,87	3,19	48,0	50,64	41,00
21807/2014	Faz Batalha do Bartolomeu, Altar e Borginho - Lote 12	267822	8057541	6,90	21,76	14,86	3,56	46,0	52,88	39,10
23926/2014	Faz Bradante (Pilões)	-37007	8008112	11,15	28,00	16,85	3,10	40,0	52,30	28,85
23927/2014	Faz Bradante (Pilões)	-36967	8008975	9,10	28,00	18,90	1,85	40,0	35,00	30,90
23928/2014	Faz Bradante (Pilões)	-37028	8008205	11,00	28,00	17,00	2,06	40,0	35,10	29,00
23929/2014	Faz Bradante (Pilões)	-37003	8008766	10,07	28,00	17,93	1,95	40,0	35,00	29,93
23930/2014	Faz Bradante (Pilões)	-36986	8009056	10,05	28,00	17,95	1,96	40,0	35,10	29,95
23931/2014	Faz Bradante (Pilões)	-37020	8008396	11,03	28,00	16,97	2,06	40,0	35,00	28,97
23932/2014	Faz Bradante (Pilões)	-37132	8008743	9,10	28,00	18,90	1,85	40,0	35,00	30,90
23933/2014	Faz Bradante (Pilões)	-36950	8007865	12,05	28,20	16,15	2,17	40,0	35,00	27,95
23934/2014	Faz Bradante (Pilões)	-36970	8007951	11,08	28,00	16,92	2,08	40,0	35,20	28,92
23935/2014	Faz Bradante (Pilões)	-36989	8008033	11,12	28,00	16,88	2,08	40,0	35,05	28,88
23936/2014	Faz Bradante (Pilões)	-36986	8009056	11,02	28,00	16,98	2,07	40,0	35,20	28,98
23937/2014	Faz Bradante (Pilões)	-36984	8008857	10,05	28,00	17,95	2,80	40,0	50,30	29,95
25796/2017	Faz Batalha do Bartolomeu, Altar e Borginho - Lote 32	263599	8050855	10,04	23,17	13,13	3,21	40,0	42,20	29,96
25797/2017	Faz Batalha do Bartolomeu, Altar e Borginho - Lote 32	264337	8050790	10,01	19,55	9,54	4,26	43,0	40,60	32,99
25798/2017	Faz Batalha do Bartolomeu, Altar e Borginho - Lote 32	264501	8050878	10,01	19,55	9,54	4,30	43,0	41,00	32,99
25799/2017	Faz Batalha do Bartolomeu, Altar e Borginho - Lote 32	264509	8050694	8,76	22,18	13,42	3,07	42,0	41,20	33,24
25803/2017	Faz Batalha do Bartolomeu, Altar e Borginho - Lote 30	264103	8051893	13,17	33,05	19,88	1,89	54,0	37,60	40,83
25804/2017	Faz Batalha do Bartolomeu, Altar e Borginho - Lote 30	264220	8051708	13,43	24,02	10,59	3,65	58,0	38,70	44,57
25805/2017	Faz Batalha do Bartolomeu, Altar e Borginho - Lote 30	264044	8052088	12,95	27,56	14,61	2,22	54,0	32,40	41,05
25809/2017	Faz Batalha do Bartolomeu, Altar e Borginho - Lote 13	268364	8057566	12,81	22,20	9,39	4,27	40,0	40,10	27,19
25810/2017	Faz Batalha do Bartolomeu, Altar e Borginho - Lote 13	268550	8057522	12,25	21,45	9,20	4,46	40,0	41,00	27,75
25811/2017	Faz Batalha do Bartolomeu, Altar e Borginho - Lote 13	268644	8058141	11,26	24,41	13,15	2,78	40,0	36,60	28,74
25812/2017	Faz Batalha do Bartolomeu, Altar e Borginho - Lote 13	268251	8058125	10,44	24,40	13,96	2,61	40,0	36,50	29,56
28177/2015	Faz Batalha do Bartolomeu e Borginho - Lote 10	265736	8058673	9,80	30,00	20,20	3,27	39,0	66,00	29,20
28503/2013	Faz Batalha do Bartolomeu	270837	8069779	4,13	22,00	17,87	5,04	60,0	90,00	55,87
28507/2013	Faz Batalha do Bartolomeu	273777	8068182	14,16	29,00	14,84	4,55	60,0	67,50	45,84
29328/2013	Fazenda Esperança	274014	8068061	13,10	25,00	11,90	5,04	60,0	60,00	46,90
29812/2013	Faz Lagoa	272361	8051898	15,32	20,30	4,98	13,05	40,0	65,00	24,68
29813/2013	Faz Lagoa	272139	8051886	15,32	20,30	4,98	13,05	40,0	65,00	24,68
30168/2013	Faz Córrego dos Bravos e Faz do Bartolomeu, Altar e Borginho - Lotes 5, 8/9, 14/15	264372	8058615	1,00	7,00	6,00	8,25	37,0	49,50	36,00
30169/2013	Faz Córrego dos Bravos e Faz do Bartolomeu, Altar e Borginho - Lotes 5, 8/9, 14/15	264461	8058616	1,00	8,00	7,00	12,57	39,0	88,00	38,00

Processo de Outorga	Propriedade	Coordenadas		NE (m)	ND (m)	sw (m)	Cp (m³/h/m)	P (m)	Q (m³/h)	b (m)
		X	Y							
30170/2013	Faz Córrego dos Bravos e Faz do Bartolomeu, Altar e Borginho - Lotes 5, 8/9, 14/15	264624	8058756	1,00	9,00	8,00	11,00	40,0	88,00	39,00
30171/2013	Faz Córrego dos Bravos e Faz do Bartolomeu, Altar e Borginho - Lotes 5, 8/9, 14/15	264606	8058291	1,00	13,00	12,00	7,33	34,0	88,00	33,00
30172/2013	Faz Córrego dos Bravos e Faz do Bartolomeu, Altar e Borginho - Lotes 5, 8/9, 14/15	264729	8058099	1,00	16,00	15,00	5,87	36,0	88,00	35,00
30173/2013	Faz Córrego dos Bravos e Faz do Bartolomeu, Altar e Borginho - Lotes 5, 8/9, 14/15	257939	8057711	1,50	6,00	4,50	0,78	50,0	3,50	48,50
3089/2018	Faz Teixeira ou Moreira	263247	8085615	12,00	24,00	12,00	1,83	32,0	22,00	20,00
3132/2018	Faz São Luís - FACER-FAVA Cereais Exportação e Importação Ltda,	261097	8067515	18,00	36,00	18,00	0,56	40,0	10,00	22,00
493/2018	Faz, Fortaleza	270395	8071465	10,82	16,44	5,62	5,23	28,0	29,40	17,18
4942/018	Faz, Fortaleza	269232	8072571	12,95	21,84	8,89	2,64	32,0	23,50	19,05
495/2018	Faz, Fortaleza	269336	8072723	14,20	21,58	7,38	3,04	37,0	22,40	22,80
496/2018	Faz, Fortaleza	269481	8072937	15,88	21,20	5,32	2,74	33,0	14,60	17,12
497/2018	Faz, Fortaleza	270395	8071465	17,40	20,58	3,18	4,12	31,0	13,10	13,60
498/2018	Faz, Fortaleza	269342	8072428	12,35	20,38	8,03	2,98	34,0	23,90	21,65
499/2018	Faz, Fortaleza	270395	8071465	13,45	21,40	7,95	3,04	33,0	24,20	19,55
500/2018	Faz, Fortaleza	269534	8072735	14,70	21,50	6,80	3,35	32,0	22,80	17,30
501/2018	Faz, Fortaleza	269775	8073085	16,80	20,69	3,89	3,57	32,0	13,90	15,20
502/2018	Faz, Fortaleza	270066	8072652	14,70	18,98	4,28	6,96	32,0	29,80	17,30
503/2018	Faz, Fortaleza	270216	8072706	15,00	18,97	3,97	7,28	29,0	28,90	14,00
504/2018	Faz, Fortaleza	270180	8072478	13,80	18,64	4,84	6,28	31,0	30,40	17,20
505/2018	Faz, Fortaleza	269474	8072257	12,10	20,89	8,79	3,29	37,0	28,90	24,90
506/2018	Faz, Fortaleza	269621	8072087	11,20	16,04	4,84	6,98	37,0	33,80	25,80
507/2018	Faz, Fortaleza	269623	8071915	10,70	16,18	5,48	6,28	35,0	34,40	24,30
508/2018	Faz, Fortaleza	269777	8071915	10,45	16,10	5,65	6,04	31,0	34,10	20,55
509/2018	Faz, Fortaleza	269969	8072117	11,70	16,00	4,30	9,00	35,0	38,70	23,30
510/2018	Faz, Fortaleza	270080	8071929	11,10	16,19	5,09	6,23	31,0	31,70	19,90
511/2018	Faz, Fortaleza	270324	8072292	12,80	17,64	4,84	6,74	31,0	32,60	18,20
512/2018	Faz, Fortaleza	270537	8072263	12,90	17,89	4,99	5,97	40,0	29,80	27,10
513/2018	Faz, Fortaleza	270428	8072496	14,60	18,18	3,58	8,69	30,0	31,10	15,40
5379/2017	Faz Junar e Del Rey	268024	8037744	4,40	27,00	22,60	2,48	40,0	56,00	35,60
5380/2017	Faz Junar e Del Rey	267934	8036861	5,15	47,00	41,85	0,96	40,0	40,00	34,85
5381/2017	Faz Junar e Del Rey	268059	8037523	4,70	27,00	22,30	2,96	40,0	66,00	35,30
5382/2017	Faz Junar e Del Rey	267604	8037330	3,50	27,00	23,50	1,70	40,0	40,00	36,50
5383/2017	Faz Junar e Del Rey	267977	8037245	3,50	27,00	23,50	2,13	40,0	50,00	36,50
5384/2017	Faz Junar e Del Rey	267804	8037373	4,15	27,00	22,85	2,01	40,0	46,00	35,85
6437/2015	Faz Batalha do Bartolomeu, Altar e Boginho - Lote 31	263600	8050471	6,15	28,10	21,95	1,82	32,0	40,00	25,85
6438/2015	Faz Batalha do Bartolomeu, Altar e Boginho- Lote 31	263146	8050484	6,20	28,18	21,98	1,46	36,0	32,00	29,80
6439/2015	Faz Batalha do Bartolomeu, Altar e Boginho- Lote 31	263630	8050674	6,00	28,00	22,00	1,73	32,0	38,00	26,00

Processo de Outorga	Propriedade	Coordenadas		NE (m)	ND (m)	sw (m)	Cp (m³/h/m)	P (m)	Q (m³/h)	b (m)
		X	Y							
6558/2016	Faz Batalha do Bartolomeu (Lavrinha)	273997	8061696	5,50	26,00	20,50	2,39	42,0	49,00	36,50
6559/2016	Faz Batalha do Bartolomeu (Lavrinha)	274055	8061788	5,20	26,00	20,80	2,13	40,0	44,20	34,80
6560/2016	Faz Batalha do Bartolomeu (Lavrinha)	274201	8061852	5,00	26,00	21,00	2,57	40,0	54,00	35,00
6561/2016	Faz Batalha do Bartolomeu (Lavrinha)	274289	8061914	5,00	26,45	21,45	2,80	40,0	60,00	35,00
6562/2016	Faz Batalha do Bartolomeu (Lavrinha)	274407	8061977	5,30	26,00	20,70	2,95	40,0	61,00	34,70
6883/2016	Fazenda Escuro	271191	8072089	10,35	28,13	17,78	1,58	36,0	28,13	25,65
6884/2016	Fazenda Escuro	270695	8072114	11,10	27,44	16,34	1,35	35,0	22,00	23,90
6885/2016	Fazenda Escuro	270446	8071945	9,80	27,78	17,98	1,60	32,0	28,80	22,20
6886/2016	Fazenda Escuro	270250	8071796	10,20	27,74	17,54	1,43	36,0	25,00	25,80
6887/2016	Fazenda Escuro	270356	8071585	10,15	27,08	16,93	1,80	34,0	30,50	23,85
6888/2016	Fazenda Escuro	271439	8072083	10,27	26,70	16,43	1,44	36,0	23,70	25,73
6889/2016	Fazenda Escuro	270949	8072117	11,40	26,73	15,33	1,64	34,0	25,20	22,60
6890/2016	Fazenda Escuro	271123	8071861	11,20	26,54	15,34	1,43	35,0	22,00	23,80
6896/2016	Faz Instância do Éden	269216	8072365	10,00	28,75	18,75	1,39	40,0	26,00	30,00
6897/2016	Faz Instância do Éden	269354	8072198	10,10	29,35	19,25	1,66	36,0	32,00	25,90
6898/2016	Faz Instância do Éden	269014	8072246	10,23	28,14	17,91	1,61	35,0	28,80	24,77
6989/2015	Faz Pilões, Limoeiro e Limoeiro Samambaia	268114	8025194	12,00	17,00	5,00	9,83	52,0	49,15	40,00
6990/2015	Faz Pilões, Limoeiro e Limoeiro Samambaia	267065	8025271	9,60	26,00	16,40	2,74	62,0	45,00	52,40
6991/2015	Faz Pilões, Limoeiro e Limoeiro Samambaia	267016	8024969	13,00	23,00	10,00	4,87	62,0	48,65	49,00
6992/2015	Faz Pilões, Limoeiro e Limoeiro Samambaia	266972	8024677	11,50	25,80	14,30	3,76	56,0	53,70	44,50
6993/2015	Faz Pilões, Limoeiro e Limoeiro Samambaia	266914	8024331	9,60	19,60	10,00	5,22	58,0 0	52,20	48,40
6994/2015	Faz Pilões, Limoeiro e Limoeiro Samambaia	266873	8024057	8,80	24,10	15,30	3,14	54,0 0	48,00	45,20
6995/2015	Faz Pilões, Limoeiro e Limoeiro Samambaia	266783	8020974	12,40	20,80	8,40	6,49	44,0 0	54,50	31,60
6996/2015	Faz Pilões, Limoeiro e Limoeiro Samambaia	266922	8023776	7,60	19,80	12,20	4,41	52,0	53,75	44,40
6997/2015	Faz Pilões, Limoeiro e Limoeiro Samambaia	267068	8023941	10,65	28,40	17,75	2,77	54,0	49,15	43,35
6998/2015	Faz Pilões, Limoeiro e Limoeiro Samambaia	267105	8024752	11,65	25,10	13,45	3,65	52,0	49,11	40,35
6999/2015	Faz Pilões, Limoeiro e Limoeiro Samambaia	267375	8024675	12,30	22,30	10,00	8,45	54,0	84,50	41,70
7000/2015	Faz Pilões, Limoeiro e Limoeiro Samambaia	267249	8025384	9,45	28,40	18,95	3,01	50,0	57,10	40,55
7001/2015	Faz Pilões, Limoeiro e Limoeiro Samambaia	267056	8025507	11,30	24,60	13,30	4,44	55,0	59,01	43,70
7002/2015	Faz Pilões, Limoeiro e Limoeiro Samambaia	266805	8025459	12,20	25,40	13,20	4,21	52,0	55,60	39,80
7003/2015	Faz Pilões, Limoeiro e Limoeiro Samambaia	267878	8022499	6,50	14,30	7,80	9,04	50,0 0	70,50	43,50
7004/2015	Faz Pilões, Limoeiro e Limoeiro Samambaia	268278	8025450	12,00	27,00	15,00	3,08	52,0 0	46,20	40,00
7005/2015	Faz Pilões, Limoeiro e Limoeiro Samambaia	266957	8023731	4,50	15,80	11,30	0,31	28,0 0	3,50	23,50
7702/2016	Faz São Luís	261023	8071668	7,00	26,90	19,90	2,27	35,0	45,15	28,00
7703/2016	Faz São Luís	262504	8072482	8,10	25,34	17,24	2,67	32,0	46,08	23,90
7704/2016	Faz São Luís	261105	8072942	7,10	24,24	17,14	2,25	30,0	38,62	22,90

Processo de Outorga	Propriedade	Coordenadas		NE (m)	ND (m)	sw (m)	Cp (m³/h/m)	P (m)	Q (m³/h)	b (m)
		X	Y							
7705/2016	Faz São Luís	262020	8071519	7,26	27,07	19,81	2,83	34,0	56,00	26,74
7706/2016	Faz São Luís	261606	8073049	6,40	25,65	19,25	1,49	32,0	28,75	25,60
7707/2016	Faz São Luís	261851	8073040	6,38	25,43	19,05	1,47	32,0	28,07	25,62
7708/2016	Faz São Luís	262725	8072032	7,50	22,93	15,43	2,05	28,5	31,70	21,00
7709/2016	Faz São Luís	262096	8073080	7,25	25,90	18,65	1,34	30,0	24,90	22,75
7710/2016	Faz São Luís	261497	8071529	7,12	26,18	19,06	2,31	32,0	44,00	24,88
7711/2016	Faz São Luís	261760	8071473	7,18	26,96	19,78	2,08	36,0	41,10	28,82
7712/2016	Faz São Luís	262357	8072929	7,65	21,94	14,29	2,12	28,0	30,30	20,35
7713/2016	Faz São Luís	261930	8070848	7,50	25,00	17,50	1,82	32,0	31,91	24,50
7714/2016	Faz São Luís	262591	8072864	7,07	24,15	17,08	2,34	30,0	40,00	22,93
7715/2016	Faz São Luís	262304	8071403	8,00	21,00	13,00	2,23	25,5	29,00	17,50
7716/2016	Faz São Luís	261648	8071733	5,00	24,40	19,40	1,55	31,5	30,00	26,50
7717/2016	Faz São Luís	261901	8071835	4,04	24,33	20,29	1,39	30,0	28,30	25,96
7718/2016	Faz São Luís	262111	8072517	7,05	25,26	18,21	1,66	30,0	30,30	22,95
7719/2016	Faz São Luís	262014	8072740	8,15	25,51	17,36	1,75	32,0	30,30	23,85
7720/2016	Faz São Luís	261253	8073165	7,90	23,95	16,05	2,20	30,5	35,30	22,60
7721/2016	Faz São Luís	261780	8072824	8,03	24,50	16,47	1,71	31,3	28,20	23,27
7722/2016	Faz São Luís	262825	8072814	8,05	25,07	17,02	1,42	32,0	24,20	23,95
7723/2016	Faz São Luís	263006	8072767	8,23	26,68	18,45	2,78	32,0	51,20	23,77
7724/2016	Faz São Luís	261274	8071643	7,15	26,36	19,21	1,29	36,0 0	24,85	28,85
7725/2016	Faz São Luís	262654	8072268	8,00	25,50	17,50	2,29	32,0	40,00	24,00
7726/2016	Faz São Luís	262737	8072567	7,00	25,68	18,68	0,97	32,0	18,20	25,00
7727/2016	Faz São Luís	262509	8072057	8,00	23,25	15,25	2,37	28,5	36,20	20,50
7728/2016	Faz São Luís	262403	8071838	7,30	22,95	15,65	1,10	29,0	17,20	21,70
7729/2016	Faz São Luís	262231	8071648	8,20	22,11	13,91	2,08	28,0	29,00	19,80
7730/2016	Faz São Luís	261138	8071444	7,20	26,00	18,80	2,35	34,0	44,25	26,80
8368/2017	Faz Batalha do Bartolomeu, Altar e Boginho - Lote 07	266532	8061634	8,87	22,98	14,11	2,13	41,0	30,00	32,13
8369/2017	Faz Batalha do Bartolomeu, Altar e Boginho - Lote 07	266826	8061080	8,10	23,41	15,31	2,74	42,0	42,00	33,90
ñ informado	Faz Batalha do Bartolomeu	260704	8074634	10,77	18,68	7,91	1,84	37,0	14,58	26,23
ñ informado	Faz Lagoa	272610	8051977	13,40	20,41	7,01	3,28	40,0	23,00	26,60
ñ informado	Faz Batalha do Bartolomeu	260396	8075000	9,76	16,82	7,06	3,91	29,0	27,60	19,24
ñ informado	Faz Batalha do Bartolomeu	260555	8074803	11,45	17,58	6,13	6,46	28,0	39,60	16,55
ñ informado	Faz Batalha do Bartolomeu, Altar e Boginho - Lote 11	266056	8059102	6,20	19,20	13,00	3,08	50,0	40,00	43,80
ñ informado	Faz Batalha do Bartolomeu	260577	8074250	11,23	18,40	7,17	5,92	37,0	42,48	25,77
ñ informado	Faz PCMOR Lote 19	262943	8053525	7,14	16,28	9,14	4,81	47,0	44,00	39,86
ñ informado	Faz PCMOR Lote 19	262954	8053711	5,90	16,03	10,13	4,34	47,0	44,00	41,10
ñ informado	Faz Batalha do Bartolomeu	261203	8074348	10,29	21,33	11,04	4,01	42,0	44,22	31,71
ñ informado	Faz Batalha do Bartolomeu	270713	8070269	5,14	24,00	18,86	2,39	60,0	45,00	54,86
ñ informado	Faz Batalha do Bartolomeu	270716	8070023	4,40	24,00	19,60	2,30	60,0	45,00	55,60
ñ informado	Faz Esperança	274508	8066099	7,42	26,00	18,58	2,42	60,0	45,00	52,58
ñ informado	Faz Esperança	274271	8066188	7,42	22,10	14,68	3,07	60,0	45,00	52,58
ñ informado	Faz PCMOR Lote 19	263033	8053398	7,19	14,88	7,69	5,98	34,0	46,00	26,81
ñ informado	Faz Esperança	274564	8066345	8,60	28,12	19,52	2,38	60,0	46,50	51,40
ñ informado	Faz PCMOR Lote 19	263119	8053379	7,17	21,94	14,77	3,18	44,0	47,00	36,83

Processo de Outorga	Propriedade	Coordenadas		NE (m)	ND (m)	sw (m)	Cp (m³/h/m)	P (m)	Q (m³/h)	b (m)
		X	Y							
ñ informado	Faz Batalha do Bartolomeu	260967	8074411	12,15	21,74	9,59	4,91	29,0	47,09	16,85
ñ informado	Faz Lagoa	271603	8053135	15,03	24,48	9,45	5,24	40,0	49,50	24,97
ñ informado	Faz PCMOR Lote 19	262964	8053620	6,48	14,81	8,33	6,06	36,5	50,50	30,02
ñ informado	Faz Batalha do Bartolomeu	260614	8075019	11,21	19,80	8,59	6,17	32,0	53,04	20,79
ñ informado	Faz Batalha do Bartolomeu	273845	8067352	4,90	24,00	19,10	2,83	60,0	54,00	55,10
ñ informado	Faz PCMOR Lote 19	262888	8053422	7,04	16,64	9,60	5,65	45,0	54,20	37,96
ñ informado	Faz PCMOR Lote 19	263008	8053503	6,34	17,61	11,27	4,97	43,0	56,00	36,66
ñ informado	Faz Batalha do Bartolomeu	273605	8067719	4,15	28,00	23,85	2,52	60,0	60,00	55,85
ñ informado	Faz Esperança	274014	8068061	13,10	25,00	11,90	5,04	60,0	60,00	46,90
ñ informado	Faz Batalha do Bartolomeu	260749	8074409	11,40	19,70	8,30	7,34	34,0	60,90	22,60
ñ informado	Faz Batalha do Bartolomeu	261643	8075254	10,17	11,77	1,60	39,23	33,0	62,76	22,83
ñ informado	Faz Esperança	274295	8066712	9,50	26,10	16,60	3,81	60,0	63,30	50,50
ñ informado	Faz Esperança	274298	8066435	8,60	28,00	19,40	3,26	60,0	63,30	51,40
ñ informado	Faz Esperança	274191	8068238	12,75	27,00	14,25	4,53	60,0	64,50	47,25
ñ informado	Faz Lagoa	272349	8052128	15,30	20,35	5,05	12,83	40,0	64,80	24,70
ñ informado	Faz Batalha do Bartolomeu	260702	8075242	10,02	15,01	4,99	13,19	28,0	65,82	17,98
ñ informado	Faz Batalha do Bartolomeu	273541	8068179	10,12	26,00	15,88	4,25	60,0	67,50	49,88
ñ informado	Faz Batalha do Bartolomeu	270914	8070733	6,12	26,00	19,88	3,40	60,0	67,50	53,88
ñ informado	Faz Esperança	273898	8067845	14,35	27,00	12,65	5,34	60,0	67,50	45,65
ñ informado	Faz Esperança	274769	8066563	4,75	32,00	27,25	2,48	60,0	67,50	55,25
ñ informado	Faz Esperança	274532	8066591	4,62	26,00	21,38	3,16	60,0	67,50	55,38
ñ informado	Faz Batalha do Bartolomeu	271120	8070858	6,07	22,00	15,93	4,52	60,0	72,00	53,93
ñ informado	Faz Batalha do Bartolomeu	270769	8070516	6,07	22,00	15,93	4,52	60,0	72,00	53,93
ñ informado	Faz Esperança	274774	8066071	7,35	28,00	20,65	3,50	60,0	72,22	52,65
ñ informado	Faz Batalha do Bartolomeu	273608	8067442	9,60	24,00	14,40	5,31	60,0	76,50	50,40
ñ informado	Faz Batalha do Bartolomeu	270853	8070948	6,15	26,00	19,85	3,85	60,0	76,50	53,85
ñ informado	Faz Esperança	273842	8067598	9,70	25,00	15,30	5,00	60,0	76,50	50,30
ñ informado	Faz Batalha do Bartolomeu	261491	8075403	10,23	17,42	7,19	10,65	31,0	76,56	20,77
ñ informado	Faz Esperança	274801	8066317	8,60	26,00	17,40	4,41	60,0	76,80	51,40
ñ informado	Faz Esperança	275004	8066596	9,70	28,30	18,60	4,16	60,0	77,40	50,30
ñ informado	Faz Batalha do Bartolomeu	273691	8067966	11,15	25,00	13,85	5,96	60,0	82,50	48,85
ñ informado	Faz Batalha do Bartolomeu	273425	8067932	8,19	26,00	17,81	4,63	60,0	82,50	51,81
ñ informado	Faz Batalha do Bartolomeu	271355	8070922	6,70	28,00	21,30	4,23	60,0	90,00	53,30