

Trabalho de Conclusão de Curso

Curso de Graduação em Geologia

SIMULAÇÃO NUMÉRICA DE FLUXO DE ÁGUAS SUBTERRÂNEAS: PROJETOS
AMBRÓSIA E BONSUCCESSO, PARACATU (MG)

Vitor da Silva Sato

Orientador: Prof. Dr. Chang Hung Kiang

Co-orientador: Msc. Roger Dias Gonçalves

Rio Claro (SP)

2018

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
Instituto de Geociências e Ciências Exatas
Câmpus de Rio Claro

VITOR DA SILVA SATO

SIMULAÇÃO NUMÉRICA DE FLUXO DE ÁGUAS
SUBTERRÂNEAS: PROJETOS AMBRÓSIA E
BONSUCESSO, PARACATU (MG)

Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado ao Instituto de Geociências e
Ciências Exatas - Câmpus de Rio Claro,
da Universidade Estadual Paulista Júlio
de Mesquita Filho, para obtenção do grau
de Geólogo.

Rio Claro - SP

2018

S253s

Sato, Vitor da Silva

Simulação numérica de fluxo de águas subterrâneas: projetos Ambrósia e Bonsucesso, Paracatu (MG) / Vitor da Silva Sato. -- Rio Claro, 2018

112 f. : il., tabs., fotos, mapas + 1 CD-ROM

Trabalho de conclusão de curso (Bacharelado - Geologia) - Universidade Estadual Paulista (Unesp), Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Rio Claro

Orientador: Chang Hung Kiang

Coorientador: Roger Dias Gonçalves

1. Água subterrânea e mineração. 2. Simulação. 3. Aquífero cárstico. 4. FEFLOW. 5. Elementos finitos. I. Título.

Sistema de geração automática de fichas catalográficas da Unesp. Biblioteca do Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Rio Claro. Dados fornecidos pelo autor(a).

Essa ficha não pode ser modificada.

VITOR DA SILVA SATO

SIMULAÇÃO NUMÉRICA DE FLUXO DE ÁGUAS
SUBTERRÂNEAS: PROJETOS AMBRÓSIA E
BONSUCESSO, PARACATU (MG)

Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado ao Instituto de Geociências e
Ciências Exatas - Câmpus de Rio Claro,
da Universidade Estadual Paulista Júlio
de Mesquita Filho, para obtenção do grau
de Geólogo.

Comissão Examinadora

Prof. Dr. Chang Hung Kiang (orientador)

Prof. Dr. Elias Hideo Teramoto

Geól. MSc. Gustavo Catão Silva Nascimento

Rio Claro, 29 de novembro de 2018.

Assinatura do(a) aluno(a)

assinatura do(a) orientador(a)

AGRADECIMENTOS

Primeiramente à minha família, em especial a meus pais e minha irmã, que sempre estiveram presentes me oferecendo todo o suporte necessário para que eu chegasse ao final de mais essa etapa da vida. Aos meus orientadores nesse projeto, prof. Chang e Roger, os quais me ensinaram muito e tiveram de ter muita paciência (e puxões de orelha) para que eu conseguisse concluir este trabalho. A todos do LEBAC, pelo apoio no desenvolvimento da pesquisa, em especial Juan, Elias e Bruno, sempre dispostos a discutir, me aconselhar e a dar boas risadas. Agradeço também a Márcia e ao seu Emílio pela disponibilidade do laboratório para análises de água. A SEG UNESP pela disponibilidade da licença do Leapfrog. Aos professores que me marcaram e me influenciaram na maneira de ver o mundo nesses cinco anos de graduação. Em especial, ao prof. Rafael Rodrigues de Assis que me aconselhou e me deu suporte para avançar com o tema, sem ele este trabalho não teria sido realizado. A empresa Nexa Resources, que não apenas me deu suporte com os dados usados nesse trabalho, como me forneceu uma imensa oportunidade de aprendizado com um estágio. Lá conheci muitas pessoas importantes para o desenvolvimento do projeto e que me orientaram tanto quanto a faculdade. Assim, agradeço imensamente a Catão, Edmar, Alex, Luciano, Vânio, Romero, Fernando, Wesley e toda equipe de hidrogeologia de Vazante e Morro Agudo pelas discussões, ensinamentos e paciência que tanto me auxiliaram no desenvolvimento deste projeto e de minha vida profissional. Aos meus supervisores Basílio, Tiaozito e Cícero que confiaram no meu trabalho e me deram total apoio para desenvolvê-lo. À todas as amigas que reuni ao longo desse trajeto árduo da graduação; sem o apoio de cada um deles nada disso teria valido a pena. À galera do Marrocos, Juan, Ian (Gordão), Henrique, Gamallo e João (Osso). A todos da turma dos Tribolitas Discordantes, em especial PP, Nikity, Leite, Nat, Godô, Meris, Manu, Loló, Isa, Catarro e Raj. A todos amigos em Vazante e Morro Agudo, em especial Filipe, Leitão, Junim, Matheus, Pedro Lincoln, Dandan, Victor, Rodolfin, Jaisson e Luiz.

“Life is a series of natural and spontaneous changes. Don’t resist them – that only creates sorrow. Let reality be reality. Let things flow naturally forward in whatever way they like.”

Lao Tzu

“Let it be.”

Paul McCartney

RESUMO

A região de Vazante-Paracatu, noroeste do estado de Minas Gerais, corresponde ao maior distrito zincífero do país (MONTEIRO, 2002). Os projetos Ambrósia e Bonsucesso da empresa Nexa Resources se localizam à Nordeste do município de Paracatu, noroeste do estado de Minas Gerais, e correspondem a depósitos sulfetados de Zn e Pb hospedados em rochas dolomíticas da Fm. Morro do Calcário, Grupo Vazante. Um dos principais desafios da implantação da mina é o contexto hidrogeológico da área, caracterizado pelo desenvolvimento de aquífero cárstico complexo e heterogêneo. O município de Paracatu passa por uma crise hídrica e a área é marcada por conflitos referentes ao uso da água. O trabalho realizado visa aumentar o conhecimento hidrogeológico da região por meio do desenvolvimento de um modelo conceitual e numérico de fluxo de águas subterrâneas regional. Para isso, foram realizadas análises de variação de nível d'água, vazão de rios e do histórico pluviométrico da região. Também foi realizada estimativa da recarga do aquífero que resultou em 4% da média anual das chuvas dos últimos três anos para o filito das Fms. Serra do Garrote e Lapa. Estudos de testes de bombeamento resultaram na identificação de valores de condutividade hidráulica e de modelos conceituais para as unidades hidrogeológicas presentes: dupla porosidade; confinado drenante; fratura horizontal. Análise isotópica de amostras de água superficial e subterrânea evidencia que a recarga do aquífero mais significativa é via infiltração das chuvas, sem indícios de mistura de água de corpos superficiais com subterrânea. O modelo conceitual define quatro sistemas aquíferos com valores de condutividade hidráulica heterogêneos, limites de não-fluxo e carga especificada a serem empregados no modelo numérico e balanço hídrico definido pela entrada de água pela precipitação e saída pelo fluxo de base dos rios e poços de superficiários. Rico banco de dados geológico foi base para a construção de um modelo geológico regional no *software* Leapfrog. Este foi discretizado em elementos finitos e exportado para o *software* de modelagem hidrogeológica FEFLOW. O modelo numérico foi calibrado em regime permanente obtendo valores de condutividade hidráulica: $3.47E-05$ m/s (zona do epicarste); $2.55E-06$ (morros); $5.79E-08$ (filito pouco alterado das Fms. Serra do Garrote e Lapa); $2.00E-06$ (saprólito metapelítico); e $9.26E-07$ (marga, filito e dolomito pouco alterado da Fm. Morro do Calcário). Os valores de recarga resultantes considerando uma precipitação média anual de 1034 mm/ano são: 269 mm/ano para o epicarste; 207 mm/ano para os morros; e 41 mm/ano para o saprólito metapelítico. O balanço de fluxo da área evidencia que 173,7 mm/ano (16,8% da média de chuva) compõe a recarga da área modelada; 26,17 mm/ano (2,53%) corresponde a quantidade de água retirada por poços; e 147,58 mm/ano (14,27%) é o volume descarregado

nos rios como fluxo de base. Os resultados são representativos da real distribuição de parâmetros hídricos em escala regional, apoiados pelos baixos erros associados à calibração de 52 pontos de observação de nível d'água. Constitui um bom ponto de partida para o desenvolvimento de modelos de mina específicos para a avaliação do impacto do empreendimento mineiro.

Palavras-chave: água subterrânea e mineração, simulação, aquífero cárstico, FEFLOW, elementos finitos.

ABSTRACT

The Vazante-Paracatu region, northwest of Minas Gerais state, corresponds to the largest zinc district in Brazil (MONTEIRO, 2002). The Ambrósia and Bonsucesso projects of the company Nexa Resources are located to the northeast of Paracatu city and correspond to sulfide Zn and Pb deposits hosted in dolomite rocks of Morro do Calcário formation, Vazante group. One of the main challenges for the mine implantation is the hydrogeological context of the area, characterized by a complex and heterogeneous karstic aquifer. In addition, the city of Paracatu is undergoing a water crisis and the project area is marked by conflicts regarding the use of water. This work aims to increase the region's hydrogeological knowledge through a conceptual and numerical model of regional groundwater flow. To that end, water level, river flow and rainfall historical analysis were performed. An aquifer recharge estimation was also developed and resulted in 4% of rainfall average for the past three years for the phyllite of Serra do Garrote and Lapa formations. Pumping tests analysis resulted in the identification of hydraulic conductivity values and conceptual models for the hydrogeological units: double porosity; confined drainage; horizontal fracture. Water isotopic analysis showed that the most significant aquifer recharge source is the rainfall infiltration, with no evidence of surface and underground water mixing. The conceptual model defines four aquifer systems with heterogeneous hydraulic conductivity values, limits of non-flow and specified hydraulic head to be used in the numerical model and water balance characterized by the precipitation as the input of water and by the baseflow and wells as the output. Rich geological database was used for a regional geological model developed in Leapfrog software. It was discretized in finite elements and exported to the hydrogeological modeling software FEFLOW. The numerical model was calibrated in steady state and obtained the follow hydraulic conductivity values: $3.47E-05$ m/s (epikarst zone); $2.55E-06$ (hills); $5.79E-08$ (slightly altered phyllite of Serra do Garrote and Lapa formations); $2.00E-06$ (metapelitic saprolite); and $9.26E-07$ (marl, phyllite and slightly altered dolomite of Morro do Calcário formation). The resulting recharge values considering an average annual precipitation of 1034 mm/year were: 269 mm/year for the epikarst; 207 mm/year for the hills; and 41 mm/year for metapelitic saprolite. The water balance shows that 173.7 mm/year (16.8% of average rainfall) composes the modeled area recharge; 26.17 mm/year (2.53%) corresponds to the amount of water withdrawn by wells; and 147.58 mm/year (14.27%) is the volume discharged into rivers as the baseflow. The results may be assumed as representative for the real distribution of water parameters in a regional scale, supported by the low errors associated

to the calibration of 52 water level observation points. It is a good starting point for specific mining models that could evaluate the enterprise impact.

Keywords: Groundwater and mining, simulation, karstic aquifer, FEFLOW, finite element.

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	7
2. OBJETIVOS E JUSTIFICATIVA	8
3. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	9
3.1. Utilização de Modelos em Hidrogeologia	9
3.2. Modelo Conceitual	12
3.2.1. Aquíferos e classificação	12
3.3. Modelo Matemático	19
3.3.1. Equação governante para o fluxo de água subterrânea.....	20
3.3.2. Condições de Contorno.....	23
3.3.3. Condições Iniciais.....	23
3.3.4. Calibração	23
3.3.5. Análise de sensibilidade	24
3.4. Modelo Numérico	24
3.5. Modelagem aplicada à mineração	25
4. CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA	27
4.1. Localização	27
4.2. Clima	28
4.3. Geomorfologia	29
4.4. Geologia	31
5. METODOLOGIA APLICADA	36
5.1. Revisão Bibliográfica	36
5.2. Aquisição de Dados	36
5.2.1. Dados de fluviometria	36
5.2.2. Testes de bombeamento	37
5.2.3. Levantamento dos poços da área e monitoramento do nível d'água	39
5.2.4. Dados de pluviometria	41
5.2.5. Mapeamento geológico e informações geológicas de subsuperfície	42
5.2.6. Atividades de Campo	42
5.3. Modelo Conceitual	44
5.3.1. Estimativa do fluxo de base	44
5.3.2. Isótopos.....	46
5.3.3. Interpretação de Testes de Bombeamento	47
5.4. Modelo Geológico	48
5.4.1. Topografia.....	49
5.4.2. Geofísica	49

5.4.3.	Descrição Hidrogeológica de testemunhos	50
5.5.	Modelo Matemático	51
5.6.	Calibração.....	52
5.7.	Análise de Sensibilidade	52
5.8.	Análise e Discussão dos Resultados	52
6.	ANÁLISE DE DADOS	53
6.1.	Nível de água	53
6.2.	Pluviometria	56
6.3.	Vazão e estimativa de recarga	57
6.4.	Isótopos	62
6.5.	Testes de bombeamento.....	63
7.	SIMULAÇÃO NUMÉRICA DE FLUXO	69
7.1.	Modelo Conceitual	69
7.1.1.	Discussão dos resultados da análise de dados	69
7.1.2.	Unidades Hidrogeológicas	71
7.1.2.1.	Subdivisões.....	72
7.1.3.	Limites do Modelo.....	74
7.1.4.	Balanço Hídrico	75
7.2.	Modelo Geológico.....	76
7.3.	Modelo Matemático	80
7.3.3.	Condições de contorno	84
7.3.4.	Parâmetros iniciais (Recarga e Condutividade Hidráulica).....	85
7.3.5.	Controles de calibração	87
8.	RESULTADOS.....	89
8.1.	Recarga	89
8.2.	Condutividade hidráulica.....	90
8.3.	Calibração dos pontos de observação e vazão de rios	92
8.4.	Análise de sensibilidade.....	95
8.4.1.	Pré-calibração.....	95
8.4.2.	Pós-calibração.....	96
8.5.	Potenciometria simulada	98
8.6.	Balanço de fluxo	99
8.7.	Discussão.....	100
9.	CONSIDERAÇÕES FINAIS	103
9.1.	Conclusões	104
10.	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	106

LISTA DE FIGURAS

Figura 3.1: Etapas da modelagem de águas subterrâneas, adaptado de Anderson & Woessner, 2015	11
Figura 3.2: Distribuição de rochas cársticas no mundo. Retirado de Gunn, 2000a.....	14
Figura 3.3: Subdivisão dos ambientes cársticos e principais feições associadas. Retirado de Ford & Williams, 1989.	16
Figura 3.4: Ilustração da dinâmica do modelo de tripla porosidade. Quando o nível de água dos condutos é rebaixado, o gradiente com o nível de água da matriz se eleva e ocorre maior drenância da matriz para os condutos. Retirado de Maréchal et al., 2008.	18
Figura 3.5: Gráfico ilustrando a elevação da condutividade hidráulica com o aumento da escala. Retirado de Kiraly, 1975.	19
Figura 3.6: Volume elementar representativo para a derivação da equação da continuidade (WANG & ANDERSON, 1982).	22
Figura 4.1: Localização da área de estudo.....	27
Figura 4.2: Distribuição do clima na bacia do Rio Paracatu. Retirado de Planpar, 1996	28
Figura 4.3: Mapa digital de elevação do terreno do polígono de área a ser modelado.	30
Figura 4.4: Coluna litoestratigráfica do Grupo Vazante, segundo Dardenne et al. (1998), Dardenne & Schobbenhaus (2001) e Dardenne (2001). Retirado de Monteiro (2002).....	32
Figura 4.5: Perfil geológico esquemático do Grupo Vazante (Dardenne et al., 1998a).	33
Figura 4.6: Mapa geológico regional integrado e local da área em estudo. Destaque para a associação das mineralizações à falha de empurrão que marca o contato da Fm. Serra da Garrote e Morro do Calcário e às falhas inversas presentes no interior da Fm. Morro do Calcário.	34
Figura 5.1: Localização dos pontos de medição da vazão utilizados.	37
Figura 5.2: Localização dos poços onde foram realizados os testes de bombeamento	38
Figura 5.3: Distribuição dos instrumentos de monitoramento do nível d'água em Ambrósia Sul, Norte e Bonsucesso.	40
Figura 5.4 Monitoramento de precipitação a partir de pluviômetros Ville de Paris.	41
Figura 5.5: Localização dos pluviômetros utilizados para compor o histórico de chuvas na área.	42
Figura 5.6: Localização dos pontos de amostragem de água para análise isotópica.	43
Figura 5.7: Frascos de vidro de borossilicato com capacidade de 50 mL, utilizados para coleta de amostras de água.	44
Figura 5.8: Típicos diagnostic plots encontrados em hidrogeologia: (a)Modelo de Theis: aquífero confinado bidimensional; (b)Dupla porosidade ou aquífero confinado; (c)Contorno linear infinito de não fluxo; (d)Contorno linear infinito de carga constante; (e)Aquífero drenante; (f)Efeito de armazenamento pela perfuração do poço e revestimento; (g)Fratura vertical de condutividade infinita; (h)Fluxo radial geral – fluxo menor que 2; (i) Fluxo radial geral – fluxo maior que 2; (j)Efeito combinado de armazenamento pela perfuração de poço e contorno linear infinito de carga constante. Modificado de Renard (2005b).	48
Figura 5.9: Seções geofísicas (resistividade e IP) inseridas no Leapfrog junto de furos de sonda para auxiliar na construção do modelo geológico.	50
Figura 5.10: Descrição de testemunhos de sondagem adaptada inserida no Leapfrog como drillholes. As siglas da legenda identificam as unidades do modelo geológico: BH (vermelho) = brecha hidrotermal; CA (vermelho escuro) = cavidades; DI (verde claro) = diamictito; DS(azul) = dolomito são; EP (laranja) = epicarste; MG (verde) = marga; PL (marrom) = rochas pelíticas; SO (amarelo) = solo/material superficial; ZZ (preto) = amostra destruída.....	51

Figura 6.1: Evolução do nível d'água monitorado em piezômetros nos projetos Ambrósia Norte (Azul); Ambrósia Sul (Verde); e Bonsucesso (Laranja). Destaque para o nível mais elevado de Ambrósia Sul em relação aos demais empreendimentos que se localizam mais próximos aos rios Santa Rita e São Pedro.....	53
Figura 6.2: Evolução do NA monitorado nos indicadores de nível d'água de Ambrósia Norte.	54
Figura 6.3: Evolução do NA monitorado nos piezômetros de Ambrósia Norte.....	54
Figura 6.4: Evolução do NA monitorado nos piezômetros de Ambrósia Sul.	55
Figura 6.5: Evolução do NA monitorado nos poços de bombeamento de Ambrósia Norte. ...	56
Figura 6.6: Variação da pluviometria com o ano hidrológico. Linha vermelha consiste na linha de tendência linear dos dados. Linha em verde consiste na média móvel.....	57
Figura 6.7: Variação diária da vazão em ponto de monitoramento do rio Santa Rita e comparação com as variações de chuva mensal.	58
Figura 6.8: Sub-bacia delimitada para o ponto de medição de vazão KRS-SR2 que abrange principalmente uma área de afloramento de filito.	59
Figura 6.9: Delimitação da vazão do fluxo de base a partir da separação de hidrograma pelo método dos filtros digitais.	60
Figura 6.10: Gráfico exibindo a composição isotópica das amostras analisadas, a linha meteórica mundial (LMM) e a local.	63
Figura 6.11: Plot diagnóstico do teste de bombeamento no poço PB-AMBN-01 e comparação com comportamento típico de modelos conceituais segundo Renard, et al. (2005b). (A) Modelo de dupla porosidade; (B) Comportamento para condição de contorno de carga constante próxima ao poço.	64
Figura 6.12: Plot diagnóstico do teste de bombeamento no poço PB-AMBN-02 e comparação com comportamento típico de modelo de fratura vertical/horizontal, segundo Renard, et al. (2005b).	65
Figura 6.13: Plot diagnóstico do teste de bombeamento no poço PB-AMBN-03 e comparação com comportamento típico de modelo de aquífero confinado drenante, segundo Renard, et al. (2005b).	65
Figura 6.14: Plot diagnóstico do teste de bombeamento no poço PB-AMBS-01 e comparação com comportamento típico de modelo de aquífero confinado drenante, segundo Renard, et al. (2005b).	66
Figura 6.15: Plot diagnóstico do teste de bombeamento no poço PB-AMBS-04 e comparação com comportamento típico de modelo de dupla porosidade, segundo Renard, et al. (2005b).	67
Figura 7.1: Modelo de White (1977) para a relação entre os condutos cársticos e a matriz e/ou fraturas do maciço rochoso. (A) representação de períodos secos, onde a matriz drena água para os condutos; (B) ilustração para os períodos chuvosos, onde os condutos são preenchidos e drenam fornecem água para a matriz.....	70
Figura 7.2: (A) Seção exibindo os sistemas hidrogeológicos da área de estudo; (B) Subdivisões dos sistemas para representar as variações de condutividade.....	73
Figura 7.3: Limites do modelo numérico.	74
Figura 7.4: Rochas não intemperizadas representantes das Fms. Serra do Garrote e Morro do Calcário. (A) Filito cinza escuro carbonoso da Fm. Serra do Garrote; (B) Dolomito cinza dominante na Fm. Morro do Calcário; (C) Camada de marga da Fm. Morro do Calcário, composta pela intercalação de bandas de composição siliciclástica pelítica (cinza escuro) e carbonática (cinza claro); (D) Camada de filito cinza escuro carbonoso da Fm. Morro do Calcário. Todas as rochas apresentam um K baixo.	77

Figura 7.5: Unidades de maior K individualizadas no modelo geológico. (A) Dolomito com feições de carstificação moderada a intensa pertencente a unidade do epicarste; (B) Marga e brecha dolomítica com carstificação moderada a intensa associado a um trecho de baixa recuperação que caracteriza uma fenda/cavidade de aproximadamente 15 m a uma profundidade de cerca de 130 m da superfície (unidade epicarste); (C) Marga exibindo carstificação intensa da unidade epicarste; (D) Material superficial e filitos alterados e fraturados do topo da Fm. Serra do Garrote, agrupados na unidade saprólito metapelítico do modelo geológico.	78
Figura 7.6: Unidade Silexito/chert do modelo geológico. (A) Dolomitos da Fm. Morro do Calário cimentados por sílex; (B) A cimentação eleva a resistência ao intemperismo da rocha, levando a sustentação de morros na área. A figura ilustra uma pequena porção do terreno mais elevada, sustentada pelo cimento silexítico.	78
Figura 7.7: (A) Delimitação da zona de epicarste pela conjugação de informações de geofísica (resistividade) e testemunhos de sonda. Observar que as zonas úmidas da seção geofísica coincidem com a zona de epicarste dos testemunhos; (B) Delimitação do contato com a Fm. Serra do Garrote utilizando seções de resistividade. O contato é marcado por zonas condutivas (<200 ohm.m – cor vermelha a roxa) subverticais; (C) Superfícies (em cinza) geradas com base no contorno das zonas úmidas delimitadas nas seções de resistividade e locação em relação às minas do empreendimento.	79
Figura 7.8: Design do modelo geológico final.	80
Figura 7.9: Malha bidimensional total, com destaque para a região de desenvolvimento da mina e adensamento dos elementos.	81
Figura 7.10: Modelo numérico tridimensional discretizado e comparação entre perfis SW-NE do (A) modelo geológico e do (B) modelo numérico discretizado.	83
Figura 7.11: Condições de contorno utilizadas no modelo numérico.	84
Figura 7.12: Distribuição dos valores de recarga a partir da precipitação na área do modelo numérico inicial.	85
Figura 7.13: Distribuição dos valores de K inseridos no modelo numérico inicial. Sem exagero vertical.	87
Figura 7.14: Pontos de observação de nível de água adotados no modelo. Como se observa, eles são concentrados nas áreas dos projetos de mina.	88
Figura 8.1: Distribuição dos valores de recarga no modelo numérico calibrado.	90
Figura 8.2: Distribuição das zonas de condutividade hidráulica no modelo calibrado. Destaque para a nova zona de K mais baixo nos morros da área identificada pelas simulações em regime permanente. A figura não apresenta exagero vertical.	91
Figura 8.3: Gráficos de correlação dos valores observados de carga hidráulica versus os computados pelo modelo.	92
Figura 8.4: Trecho do rio Santa Rita utilizado para controle da calibração. Nos extremos desse trecho existem pontos de medição de vazão (PV-01 e PV-03). A diferença da vazão entre esses pontos no período seco é atribuída ao fluxo de base do rio nesse trecho. Compara-se a variação medida com o fluxo de base calculado pelo modelo.	94
Figura 8.5: Gráfico exibindo os resultados da análise de sensibilidade realizada para a variação de 20% nos valores de condutividade hidráulica e recarga obtidas pela calibração do modelo.	97
Figura 8.6: Mapa potenciométrico da área obtido pela simulação em regime permanente.	99
Figura 8.7: Balanço de fluxo obtido por simulação em regime permanente.	100

LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1: Principais feições de relevo cárstico e suas descrições.	15
Tabela 6.1: Valores de média mensal de vazão calculados a partir dos resultados obtidos do software BFI+	60
Tabela 6.2: Tabela de cálculo da porcentagem do fluxo de base em relação à chuva anual.	61
Tabela 6.3: Resultados das análises isotópicas para as diferentes amostras e cálculo dos pontos para a definição da linha meteórica mundial (LMM – azul escuro).	62
Tabela 6.4: Resumo das características dos poços e dos produtos obtidos pela análise dos testes de bombeamento.	68
Tabela 7.1: Principais parâmetros construtivos do modelo numérico.	82
Tabela 7.2: Valores de recarga inseridos inicialmente no modelo numérico.	86
Tabela 7.3: Valores iniciais de K inseridos no modelo numérico e a fonte dos dados.	86
Tabela 8.1: Valores de recarga utilizados para cada zona diferenciada no modelo calibrado.	89
Tabela 8.2: Valores de condutividade hidráulica usados em cada zona do modelo e sua fonte.	91
Tabela 8.3: Carga hidráulica real versus computada pelo modelo nos 52 pontos de observação.	93
Tabela 8.4: Resultado da análise de sensibilidade para os parâmetros de condutividade hidráulica e recarga, com alteração de 20% dos valores obtidos pela calibração do modelo.	97
Tabela 8.5: Comparação dos valores de condutividade hidráulica obtidos pela calibração do modelo do trabalho com os obtidos pelo modelo da empresa MDGEO	102

1. INTRODUÇÃO

Para suprir as necessidades básicas da população e sustentar o atual estilo de vida da humanidade, a mineração é uma atividade imprescindível e o Brasil é um país com grande potencial mineiro. Todavia, a exploração de recursos minerais implica em impactos ambientais diversos, dentre eles problemas associados a recursos hídricos.

A gestão desses recursos é um importante tópico a ser tratado na implementação de um empreendimento mineiro. A água assume um papel de dualidade: ela é absolutamente necessária a muitos processos e operações a serem desenvolvidas, mas também se configura como um elemento que dificulta a lavra e gera custos adicionais (RUBIO, 2006).

O minério frequentemente se encontra abaixo do nível freático, o que gera instabilidade ao maciço rochoso e perigo de inundação da mina a depender do contexto geológico. Daí a necessidade de drenagem de água das áreas de mina, o que implica muitas vezes no bombeamento de elevadas vazões com a geração de cones de rebaixamento de nível d'água. Não obstante, se faz necessária a manutenção desse bombeamento durante o tempo em que a mina permanece ativa. Isso gera custos elevados a longo prazo e impactos na dinâmica hídrica local.

A região de Vazante-Paracatu (noroeste do estado de Minas Gerais) corresponde ao maior distrito zincífero do país (MONTEIRO, 2002). Ela abriga importantes depósitos e ocorrências minerais, como os projetos Vazante, Morro Agudo, Fagundes, Ambrósia, Bonsucesso, entre outros. Atualmente, os depósitos de Vazante e Morro Agudo são responsáveis por toda a produção nacional de concentrados de zinco e chumbo do país.

Geologicamente, todos os depósitos estão inseridos no Grupo Vazante, cujas unidades foram definidas por Dardenne *et al.* (1998) e Dardenne (2000) e consistem em uma espessa pilha de sedimentos pelito-carbonáticos distribuídos em uma faixa N-S ao longo de aproximadamente 250 km desde Coromandel até Unaí. A faixa pode ser dividida em dois setores com aspectos estratigráficos, estruturais e metalogenéticos distintos. Na porção norte ocorrem os depósitos de Zn e Pb sulfetados de Morro Agudo, Ambrósia, Bonsucesso e Fagundes, e no setor sul, encontra-se a mineralização de Zn representada predominantemente por minério willemítico do depósito Vazante.

Os depósitos presentes na área de estudo são Ambrósia (Sul e Norte) e Bonsucesso. Eles se encontram a nordeste de Paracatu, no setor norte da faixa Vazante e correspondem a *greenfields* da empresa *Nexa Resources*. As mineralizações estão inseridas nas formações Serra

do Poço Verde e Morro do Calcário (DARDENNE *et al.*, 1998), compostas essencialmente por dolomitos de cores variadas, dolomitos estromatolíticos e camadas de rochas pelíticas.

Devido a tal contexto geológico, a região em questão encontra-se em um ambiente hidrogeológico complexo. As rochas dolomíticas hospedeiras das mineralizações sofrem com o processo de carstificação. Tal fenômeno dificulta a instalação e avanço de minerações na área, motivando estudos mais aprofundados em relação ao entendimento do fluxo de água subterrânea local. Para o entendimento de cenários hidrogeologicamente complexos é comum o uso de modelos matemáticos. Sua principal função é a representação da realidade por meio de formulações matemáticas. Uma vez alcançado tal objetivo, pode-se empregar o modelo para simular diversos cenários e realizar previsões.

Os modelos matemáticos são baseados em métodos numéricos para a solução de suas equações de fluxo. Os principais deles são o de diferenças finitas e o de elementos finitos. O método das diferenças finitas é utilizado para a representação de geometrias mais simples e é principalmente utilizado por meio do software MODFLOW, desenvolvido pela U.S. Geological Survey. O método dos elementos finitos é mais recente e indicado para representar geometrias mais complexas. Por esse motivo ele foi escolhido para o desenvolvimento do projeto, empregado por meio do software FEFLOW (DIERSCH, 2002).

2. OBJETIVOS E JUSTIFICATIVA

O desenvolvimento de um projeto de instalação/avanço de uma mineração exige que o nível d'água da área seja monitorado e, se necessário, rebaixado. Do contrário, pode ocorrer a inundação da mina, que leva a paralisação da exploração mineral e perigo para os trabalhadores envolvidos no processo. O próprio rebaixamento gera impactos ambientais (dinâmica hidrogeológica e hidrológica) e sociais (possível escassez de água para a população e desenvolvimento de dolinas).

Para o entendimento do comportamento do fluxo em subsuperfície antes e depois da interferência antrópica, a confecção de modelos hidrogeológicos é uma ferramenta importante, que permite previsões e um melhor planejamento das atividades que visam o rebaixamento do nível d'água local. Diante do exposto, este trabalho objetiva elaborar um modelo conceitual e numérico de fluxo de água subterrânea regional pelo método dos elementos finitos para a área dos projetos de mina Ambrósia e Bonsucesso, região de Paracatu (MG) e assim ampliar o conhecimento acerca da dinâmica hídrica regional da área.

3. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

3.1. Utilização de Modelos em Hidrogeologia

Um modelo consiste em uma representação da realidade de maneira simplificada, com destaque a fatores que controlam o problema em análise. Isso permite ao modelador um maior controle de seu caso de estudo e a identificação das melhores estratégias para solucionar seu problema.

A modelagem aplicada a hidrogeologia é um tema que tem se popularizado nos últimos anos. Cada vez mais a população tem buscado nas águas subterrâneas a solução para a escassez hídrica superficial. De fato, mais de 90% da água líquida doce do planeta está disposta no subsolo. Essa reserva é, portanto, estratégica e deve ser gerenciada de forma inteligente, visto que seu uso descontrolado pode ter impactos sociais e ambientais diversos. A modelagem é uma metodologia importante no gerenciamento desses recursos.

Existem dois tipos principais de modelos empregados em hidrogeologia: os *modelos conceituais* e os *modelos dinâmicos*. Os *modelos conceituais* são aqueles utilizados para descrever ou desenvolver um estudo analítico de dados referente a um sistema hidrogeológico. Eles podem ser entendidos como modelos estáticos, que descrevem de maneira simplificada a situação atual do sistema hidrogeológico, sem levar em conta a dimensão temporal (FETTER, 2001). Tal tipo de modelo é importante, pois irá fornecer as características necessárias e delimitará as simplificações que serão a base para a construção de um modelo numérico, por exemplo.

Modelos dinâmicos são aqueles utilizados em predições ou na definição do comportamento pretérito de sistemas hídricos subterrâneos. Existem três tipos principais de modelos dinâmicos empregados em hidrogeologia: *modelos físicos em escala*, *modelos analógicos* e *modelos matemáticos* (FETTER, 2001). Neste trabalho, serão utilizados modelos matemáticos, por isso os outros dois não serão tratados em maior detalhe.

Modelos matemáticos são construídos baseados na resolução das equações básicas de fluxo subterrâneo, transporte de calor e transporte de massa. Eles podem se basear em equações de resolução mais simples, sendo conhecidos como *modelos analíticos*. Em caso de problemas que envolvem condições de contorno mais complexas e com maior variabilidade de parâmetros, o uso de computadores é uma necessidade comum, sendo conhecidos como *modelos numéricos computacionais*.

O objetivo deste trabalho é a construção de um modelo numérico computacional, porém, para isso é necessário seguir uma série de procedimentos que são as etapas da modelagem. Estas

podem variar a depender do modelador, no entanto, existe uma base que deve ser respeitada para se alcançar um bom modelo. Os Protocolos para Aplicação em Modelos Matemáticos (PAMMs) são fluxogramas de modelagem elaborados por diversos autores e sugerem a melhor estratégia para o desenvolvimento de modelos matemáticos. De maneira geral, as etapas consistem na definição de objetivos, elaboração de modelo conceitual, matemático e analítico/numérico, a depender do produto que se planeja obter (Figura 3.1).

A primeira etapa da modelagem deve ser a definição do seu propósito. Um modelo é construído para responder questões ou mesmo para definir perguntas corretas. Reilly and Harbaugh (2004) definem cinco principais objetivos no desenvolvimento de um modelo: (1) entendimento de sistemas de água subterrânea; (2) estimativa das propriedades do aquífero; (3) entendimento da situação atual; (4) entendimento da situação pretérita; (5) previsão da situação futura. No caso dos três primeiros objetivos, trata-se de um *modelo interpretativo*; no caso dos dois últimos, o modelo é classificado como *de previsão*.

Modelos interpretativos podem ser usados de formas variadas. Podem, por exemplo, ser construídos modelos simplificados para o cálculo de variáveis em um problema de engenharia. Outro importante uso é seu desenvolvimento nas fases iniciais de um projeto. O próprio exercício de construção de um modelo leva o modelador a identificar erros interpretativos e processos não considerados no modelo conceitual desenvolvido previamente. Bredehoeft & Hall (1995) consideram necessário o desenvolvimento de um modelo matemático no início de qualquer estudo hidrogeológico não trivial. Existem ainda os modelos genéricos, cuja função é idealizar um cenário hidrogeológico genérico para seu entendimento teórico.

Os modelos de previsão têm como função simular a distribuição de cargas e transporte de plumas de contaminantes através do tempo. Após calibrado e condizente com as informações de campo coletadas, é possível realizar simulações diversas para a previsão de resposta dos reservatórios frente a ações antrópicas, como captação de água por poços de bombeamento, injeção, comportamento de plumas de contaminação, etc. Além de prever um cenário futuro, pode-se também simular o retrocesso das variáveis, muito usado para identificação da fonte de contaminação em estudos ambientais.

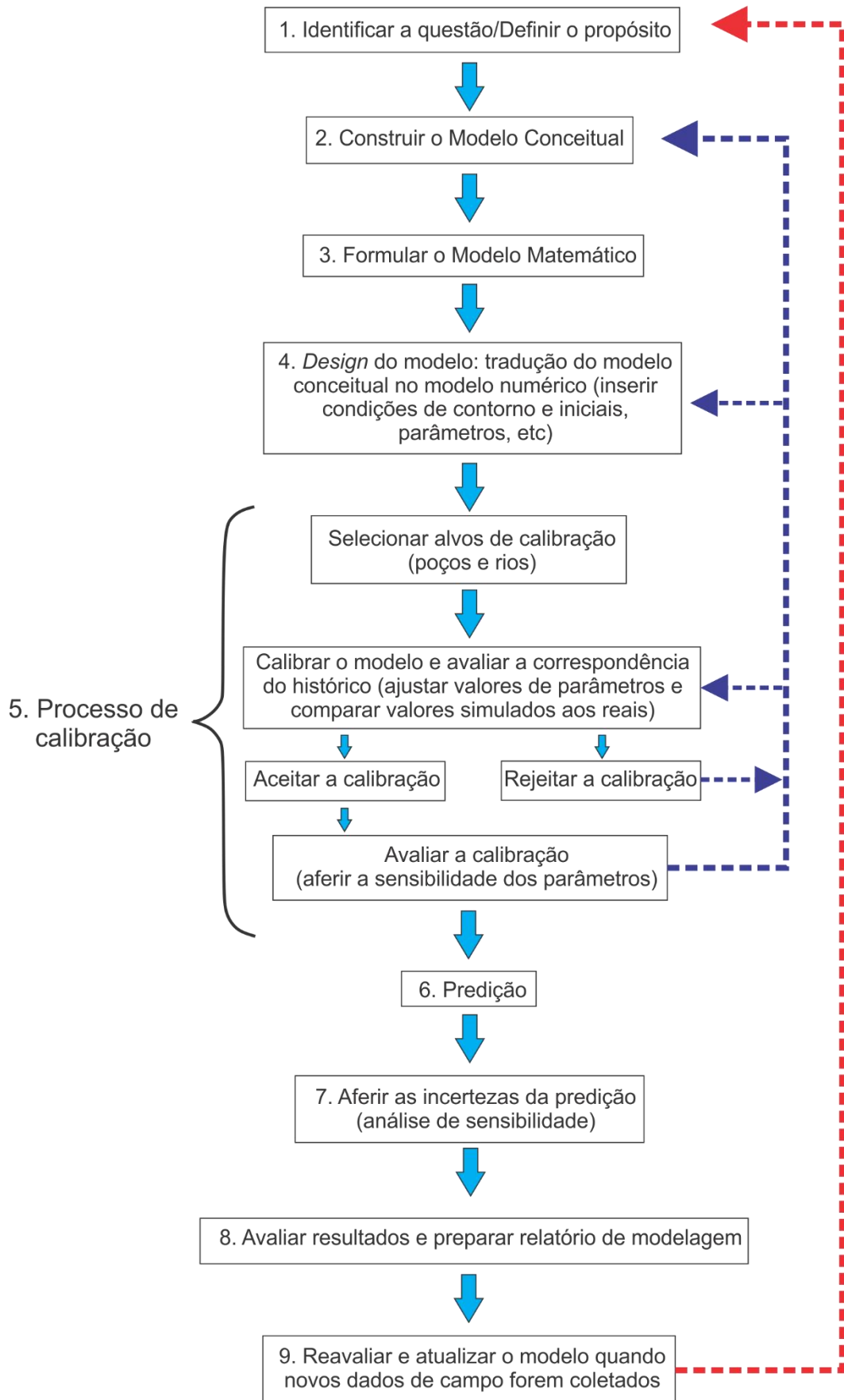


Figura 3.1: Etapas da modelagem de águas subterrâneas, adaptado de Anderson & Woessner, 2015

3.2. Modelo Conceitual

Definido como uma representação qualitativa de um sistema hídrico que dá destaque para os parâmetros que o controlam. Essa caracterização pode ser apresentada sob a forma de gráficos, tabelas, diagramas, seções, mapas ou esquemas ilustrativos. De acordo com Kolm (1996), o modelo conceitual deve se apoiar em nove bases teóricas: hidrologia, geomorfologia, geologia, geofísica, clima, vegetação, pedologia, hidro/geoquímica e aspectos antrópicos.

O modelo conceitual de uma área deve reunir algumas informações mínimas. São elas: (1) os limites do modelo; (2) definição das unidades hidroestratigráficas ou sistemas aquíferos; (3) mapa potenciométrico; (4) direções de fluxo; (5) levantamento de descarga e recarga dos aquíferos; (6) estimativa dos componentes de balanço hídrico e das propriedades hidrodinâmicas das unidades. Adicionalmente, outras informações podem ser apresentadas no refinamento do modelo, como isótopos, química e qualidade da água.

O modelo conceitual é uma etapa muito importante da modelagem pois é ele quem define as premissas a serem utilizadas no modelo numérico de fluxo. Um modelo numérico baseado em um conceitual bem fundamentado tem maiores chances de fornecer predições mais precisas e corretas. Conforme se avança nas etapas da modelagem, o modelo pode e deve ser revisitado de acordo com a necessidade, para o detalhamento ou reavaliação das premissas pré-determinadas.

3.2.1. Aquíferos e classificação

Os diversos litotipos existentes apresentam condutividades hidráulicas (K) e porosidade (n) variadas. Porosidade primária (deposicional e diagenática), secundária (faturamento) e terciária (dissolução) compõem o espaço onde a água pode ser armazenada nos maciços rochosos e são produto da história da rocha desde a sua consolidação até os processos de alteração a que são submetidas.

As camadas de rocha podem ser classificadas de acordo com sua capacidade de armazenamento e de transmissão de água. É uma classificação qualitativa, que não envolve a quantificação de parâmetros específicos, possibilitando que um mesmo litotipo possa ser classificado de modos diferentes de acordo com as camadas associadas a ele.

Aquífero pode ser definido como uma unidade geológica permeável e saturada, com capacidade para transmitir quantidades de água significativas (econômicas), sob gradientes hidráulicos naturais (FREEZE & CHERRY, 1979). Sistemas aquíferos são um conjunto de

aquíferos pertencentes a uma mesma unidade geológica de abrangência regional, interdependentes hidráulica ou fisicamente (GASPAR, 2006).

Camadas confinantes são compostas por rochas com condutividade hidráulica relativamente pequena em relação aos aquíferos, correspondendo a barreiras para o fluxo subterrâneo. Elas podem ser classificadas em aquífugos, aquíferos e aquícludes. Aquífugos são unidades impermeáveis que não transmitem água alguma. Aquíferos são camadas com baixa permeabilidade que podem transmitir água de maneira lenta para outras camadas. Aquícludes são camadas que apresentam porosidade para armazenar água, porém são pouco permeáveis e por isso transmitem quantidades insignificantes de água (FETTER, 2001).

Pode-se classificar os aquíferos em livre (não-confinado), confinado, misto ou suspenso. Aquíferos livres são aqueles cujo limite superior consiste na superfície freática, na qual todos os pontos se encontram sob pressão atmosférica. Aquíferos confinados são limitados no topo por camadas confinantes. No seu limite superior, a água se encontra sob uma pressão maior que a atmosférica. Os aquíferos confinados podem ser subdivididos em aquíferos confinados drenantes (semi-confinados) ou não drenantes. Aquíferos mistos consistem na combinação dos tipos descritos anteriormente. Aquíferos suspensos são unidades saturadas em água situadas acima do nível freático.

Os aquíferos também podem ser caracterizados quanto ao tipo de porosidade. A porosidade primária corresponde aos interstícios entre os grãos da rocha, sejam eles formados no momento da deposição ou na diagênese. Arenitos, conglomerados, siltitos, sedimentos inconsolidados podem ser classificados nessa categoria como aquíferos granulares. A porosidade secundária consiste em fraturas na rocha e definem os aquíferos fraturados. Alguns exemplos são basaltos, granitos, filitos, entre outras. A porosidade terciária é formada pela dissolução da rocha com a percolação de água através de fraturas em rochas solúveis. Esses são os aquíferos cársticos, principal unidade do presente trabalho.

3.2.1.1. Aquíferos cársticos

Carste (ou *Karst*) é o termo usado para descrever um estilo especial de terreno com relevo e dinâmica hídrica distinta, que se forma pela combinação de rochas com elevada susceptibilidade a dissolução e uma porosidade secundária (fraturas) bem desenvolvida (FORD & WILLIAMS, 2007). A denominação é originária da região carbonática de Carso (*Kars*), no sudoeste da Eslovênia até o nordeste da Itália. Cerca de 20% da superfície da Terra livre de camadas de gelo é composta por rochas onde os terrenos cársticos tipicamente se desenvolvem,

isto é, rochas carbonáticas e evaporíticas, como se observa na Figura 3.2. Próximo de 20 a 25% da população mundial depende inteiramente ou predominantemente de águas subterrâneas associadas a ambientes cársticos (FORD & WILLIAMS, 2007).

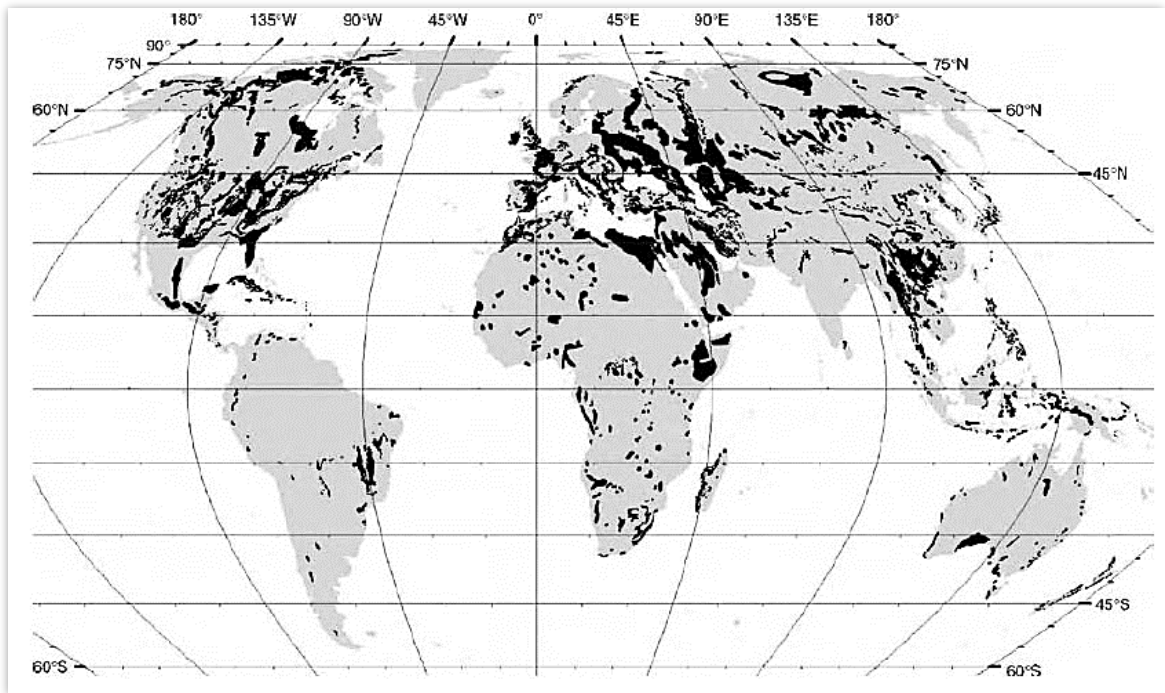


Figura 3.2: Distribuição de rochas cársticas no mundo. Retirado de Gunn, 2000a.

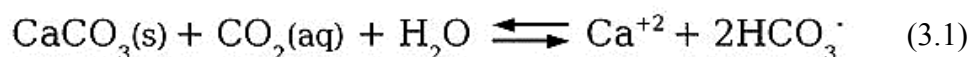
O terreno cárstico é um sistema em constante evolução e que abrange como processos principais a dissolução, erosão química e incremento da chamada porosidade terciária com o tempo (KARMANN, 1994). É possível afirmar que a evolução de terrenos cársticos ocorre em função da relação da dinâmica hídrica da área e da composição e geologia estrutural do substrato rochoso.

Do ponto de vista geomorfológico, o sistema cárstico é caracterizado por apresentar feições de relevo típicas, produtos de um processo em constante evolução que consiste na transição para um sistema de drenagem centrípeta. Este processo evolui gerando drenagens secas e descontínuas com presença de sumidouros, fruto do incremento da capacidade de armazenamento e transmissão do maciço rochoso. Neste cenário, surgem feições típicas como vales cegos, dolinas, uvalas, *poljes*, lapiás e outras formas de relevo (KARMANN, 1994). Algumas dessas feições típicas são resumidas na tabela 3.1.

Tabela 3.1: Principais feições de relevo cárstico e suas descrições.

Feição de relevo	Descrição
Dolinas (CVIJIC, 1893)	Depressões fechadas circulares ou elípticas de comprimento variado (até centena de metros em profundidade e de diâmetro). Apresentam gênese associada a dissolução das rochas cársticas, podendo ser classificadas em dolinas de dissolução; de colapso; de colapso associado ao carste subjacente; e dolinas aluviais. Constituem zonas de infiltração de água.
Uvalas	Caracterizadas como dolinas compostas. Interpretadas como produto da coalescência e crescimento de dolinas (WHITE, 1988).
<i>Poljes</i>	Largas depressões fechadas, com comprimentos e larguras que chegam a dezenas de quilômetros, com paredes abruptas, fundo plano rochoso ou recoberto por argilas de cescalcificação, aluviões ou depósitos lacustres. Sua evolução é interpretada como sendo horizontal, depois que sua componente de evolução vertical cessa com a impermeabilização da sua base com pelitos.
Vales cegos	Interrupção abrupta da drenagem pela presença de sumidouro.
Vales secos	Antigos vales fluviais cuja drenagem foi capturada para o meio subterrâneo devido ao rebaixamento do aquífero.
<i>Canyons</i>	Paredões abruptos gerados pelo abatimento de sistemas subterrâneos.
Formas residuais de relevo cárstico	Maciço rochoso aflorante na forma de cones de blocos, torres, paredões, etc, resultante da dissolução diferencial da rocha.
Lapiás (<i>Karren</i>)	Microformas presentes em formas residuais cársticas na forma de sulcos, furos ou saliências irregulares.

O sistema cárstico é controlado pela interação água-rocha e pela dissolução resultante desse processo, de forma que a geoquímica assume papel importante nesse contexto. As rochas que constituem os principais terrenos cársticos são caracterizadas pela sua suscetibilidade a dissolução, como carbonatos e evaporitos. Em contato com esses litotipos, a presença de água seja ela meteórica (predominante), bacinal ou associada a corpos ígneos, leva a dissolução dos minerais segundo a equação 3.1, ampliando a porosidade natural da rocha e gerando depósitos secundários (espeleotemas).



Segundo Lamouroux (1972) o mecanismo fundamental da dissolução em meios muito lixiviados é a alteração pelicular. O resultado dessa alteração é a acumulação de resíduo insolúvel da rocha, compondo normalmente menos de 10% dos calcários. Essa fração é composta por SiO_2 , Al_2O_3 e Fe_2O_3 . Esse material compõe parte dos sedimentos que recobrem o maciço rochoso ou mesmo que preenche cavidades e condutos. A sílica pode aparecer como

chert, grãos de areia ou detritos, ou como componente de silicatos. O alumínio e o ferro são representados por argilominerais e óxidos hidratados.

A classificação mais simples de sistemas cársticos é a sua subdivisão em zonas de erosão e deposição. Nas zonas de erosão, rochas cársticas são removidas pelo processo de dissolução descrito acima. Existem pequenas áreas de redeposição nessa zona, principalmente na forma de precipitação química ou em áreas rebaixadas de *poljes*. As zonas de deposição correspondem normalmente a regiões litorâneas de supra a intermaré ou regiões *offshore*, onde novas rochas cársticas são geradas. A área de estudo desse projeto está inserida no contexto da zona de erosão. A figura 3.3 expõe a compartimentação do sistema cárstico e alguma de suas principais feições.

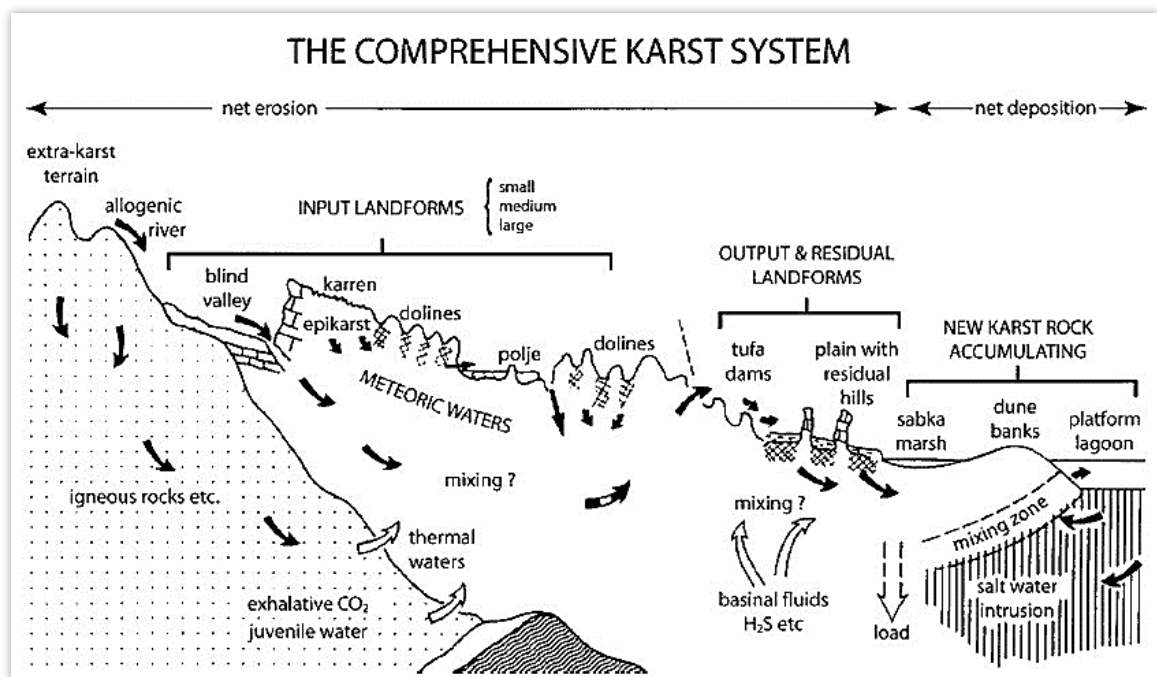


Figura 3.3: Subdivisão dos ambientes cársticos e principais feições associadas. Retirado de Ford & Williams, 1989.

O sistema cárstico é frequentemente classificado em *endocarste*, *epicarste* e *exocarste*.

- Exocarste (BÖGLI, 1980): constitui o relevo superficial do carste;
- Epicarste: zona de interface rocha-solo. Constituída pela porção superior da rocha subjacente coberta por material inconsolidado, contendo uma rede de fissuras alargadas por processos cársticos (WILLIAMS, 1985; FORD & WILLIAMS, 1989; PALMER, 1991);

- Endocarste (BÖGLI, 1980): zona onde estão presentes os condutos subterrâneos e seus depósitos químicos, clásticos e orgânicos.

O endocarste ainda é subdividido em subzona vadosa, onde a água circula pela ação da gravidade; subzona de oscilação, controlada pela oscilação do nível de água; e subzona freática, onde os condutos estão totalmente saturados. A dissolução ocorre de maneira mais intensa na porção superior da zona freática.

Do ponto de vista hidrogeológico, as unidades cársticas compõe importantes aquíferos muito produtivos. São, porém, muito heterogêneos, de maneira que sua condutividade hidráulica varia em questão de metros. Worthington et al. (2000) e Worthington (2007) consideram um *modelo de tripla porosidade*:

- (1) Porosidade primária da matriz (maciço rochoso);
- (2) Porosidade secundária da matriz (fissuras e fraturas);
- (3) Porosidade terciária representada por estruturas aumentadas pela dissolução, no caso condutos altamente permeáveis.

Entende-se que na matriz ocorre fluxo laminar (darciano). Sua recarga provém das precipitações sobre o epicarste ou pela infiltração de água através de fraturas ou fissuras. A água da matriz é drenada pelos condutos. Estes são caracterizados por altas velocidades de fluxo e maior transmissividade em relação a matriz, mas baixa capacidade de armazenamento. Tanto fluxo laminar quanto turbulento podem ocorrer nos condutos.

Em caso de bombeamento, a água dos condutos é a primeira a ser transmitida. O rebaixamento se dá de forma independente entre matriz e condutos. Quando a carga da matriz se torna mais elevada que a das estruturas, ocorre drenância da água da matriz para os condutos, em um processo muito similar aos modelos de dupla porosidade de aquífero fraturados (Figura 3.4).

A modelagem em aquíferos cársticos enfrenta a dificuldade de tentar retratar essa dinâmica de interação entre matriz, fraturas e condutos. O primeiro obstáculo é detalhar a localização de cavidades e fraturas e inserir esse cenário em um modelo numérico. Outro problema é como representar essa interação. Diversos artigos buscam soluções para a problemática, à exemplo de Reinman (2014) e Shoemaker et al. (2008) que desenvolvem modelos específicos para o ambiente cárstico.

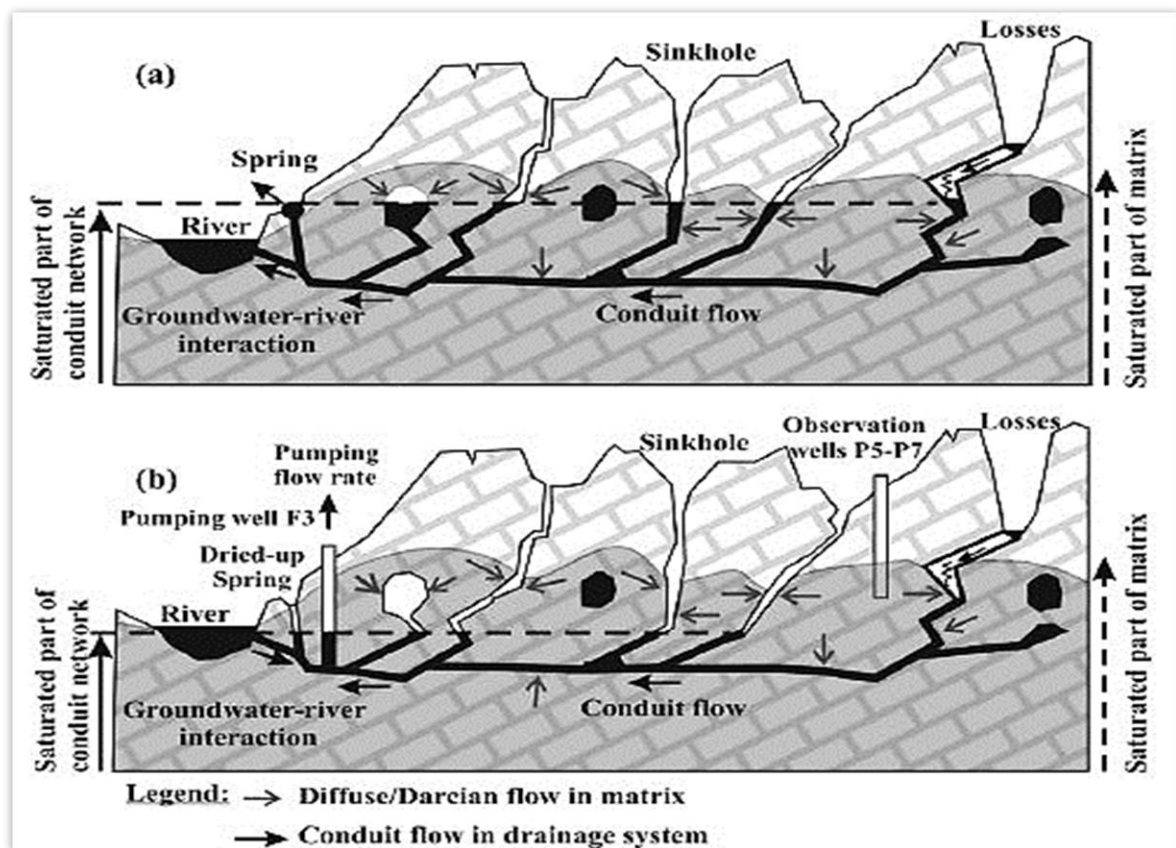


Figura 3.4: Ilustração da dinâmica do modelo de tripla porosidade. Quando o nível de água dos condutos é rebaixado, o gradiente com o nível de água da matriz se eleva e ocorre maior drenância da matriz para os condutos. Retirado de Maréchal *et al.*, 2008.

Deve-se lembrar, porém, que a porosidade é proporcional ao volume de rocha considerada, variando da escala regional, para a mediana de testes de bombeamento e para a de mão (FORD & WILLIAMS, 2007). São vários os artigos que discutem o impacto da escala no valor da condutividade hidráulica de meios fraturados/cársticos: Butler and Healey, 1998a,b; Clauser, 1992; Hsieh, 1998; Illman, 2006; Kiraly, 1978; Le Borgne et al., 2006a,b; Maréchal et al., 2004; Martinez-Landa and Carrera, 2005; Neuman, 2003; Neuman and Di Federico, 2003; Renshaw, 1998; Zlotnik et al., 2000.

Martinez-Landa & Carrera (2005) e Le Borgne et al. (2006) mostraram que a condutividade hidráulica (K) se eleva com a escala porque zonas de maior permeabilidade se tornam melhor conectadas em uma escala maior. Clauser (1992) estudou aquíferos fraturados em granitos e observou que o K aumenta até um certo volume de rocha. Esse volume, a partir do qual o K permanece constante é conhecido como *Volume Elementar Representativo* (VER).

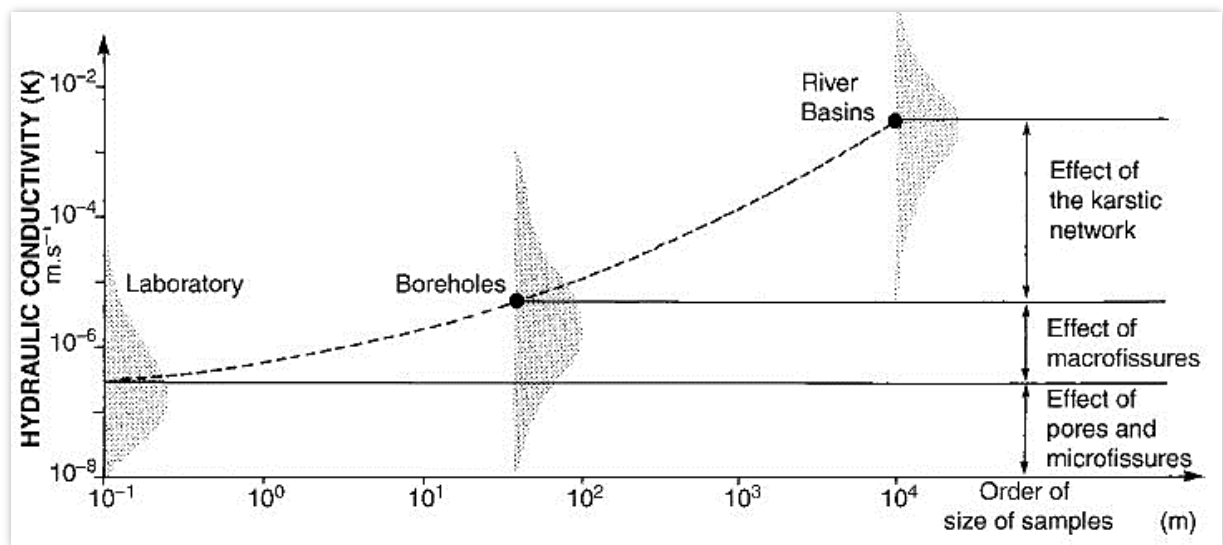


Figura 3.5: Gráfico ilustrando a elevação da condutividade hidráulica com o aumento da escala. Retirado de Kiraly, 1975.

Uma série de autores, porém, discordam da influência da escala na permeabilidade, afirmando que essas diferenças de K se devem a diferentes métodos de medida (BUTLER & HEALEY, 1998a) e erros de coleta de amostras (HSIEH, 1998; RENSHAW, 1998; ZLOTNIK et al., 2000).

Discute-se que a depender do objetivo da modelagem se pode fazer considerações para aproximar o meio cárstico a um *meio poroso equivalente* (MPE), com a perda de algumas informações e produtos do modelo (PANKOW ET AL., 1986; NEUMAN, 1987). Apesar de a simulação acurada de processos de transporte ainda ser problemática, pode-se inferir de maneira satisfatória a distribuição de cargas hidráulicas, volume de fluxo e direções de fluxo gerais do aquífero mesmo com essas aproximações.

3.3. Modelo Matemático

Um modelo matemático para fluxo de águas subterrâneas consiste em três elementos básicos: (1) *equação governante* (derivada do princípio de conservação de massa e da lei de Darcy), que representa os processos ocorrentes no interior do domínio do problema; (2) *condições de contorno*, que representa processos ocorrentes nas bordas do modelo; e (3) *condições iniciais*, usada para o caso de modelos transientes, representando o cenário de partida da simulação (ANDERSON & WOESSNER, 2015).

3.3.1. Equação governante para o fluxo de água subterrânea

A representação matemática de um processo complexo como o fluxo de águas subterrâneas deve assumir uma série de premissas para sua simplificação. Essas premissas são traduzidas na forma da equação governante de fluxo. Ela representa o fluxo de uma única fase fluida (água) a uma densidade constante em um meio poroso (ou MPE) controlado pela lei de Darcy. Para entender as simplificações, se faz necessário retomar alguns conceitos básicos de fluxo.

3.3.1.1. Abordagem física de fluxo de águas subterrâneas

Em 1856, Henry Darcy definiu experimentalmente os principais fatores que governam o fluxo de água em meios porosos, ao analisar a passagem de água através de um filtro de areia. Ele estabeleceu que, para um dado tipo de areia, a vazão de água (Q) é diretamente proporcional à diferença de carga hidráulica e a área da seção (A), mas é inversamente proporcional à distância entre os piezômetros (L). A equação 3.2 define a lei de Darcy.

$$Q = -K \cdot A \frac{h_1 - h_2}{L} \quad (3.2)$$

A constante K (L/T) é chamada de condutividade hidráulica e seu sinal negativo significa que o fluxo de água tende a ir da maior carga para a menor.

A vazão por unidade de área $q = Q/A$ é conhecida como descarga específica, velocidade aparente ou mesmo velocidade de Darcy. Nesse sentido, pode-se reescrever a lei de Darcy como na equação 3.3.

$$q = -K \frac{\Delta h}{L} \quad (3.3)$$

Para a generalização da lei de Darcy em três dimensões, deve-se tomar ela como verdade para as componentes x , y e z do fluxo (Equação 3.4).

$$q_x = -K \frac{\partial h}{\partial x}; \quad q_y = -K \frac{\partial h}{\partial y}; \quad q_z = -K \frac{\partial h}{\partial z} \quad (3.4)$$

Podendo ser escrita em notação vetorial como na equação 3.5.

$$\mathbf{q} = -K \text{ grad } h \quad (3.5)$$

O vetor velocidade q tem componentes nos três eixos x , y e z , e o vetor gradiente de carga hidráulica $grad\ h$ define como varia a carga hidráulica em cada uma das direções. Como cada componente de q corresponde a multiplicação do escalar K com a componente $-grad\ h$, os vetores q e $-grad\ h$ apontam para a mesma direção, o que leva a assumir uma isotropia (WANG & ANDERSON, 1982).

No caso de um meio anisotrópico, as propriedades físicas do meio variam com a direção. Nesse caso K não é um escalar, mas composta por uma matriz de coeficientes conhecido como tensor de condutividade hidráulica (GONÇALVES, 2013).

3.3.1.2. *Derivação da equação governante*

Outro importante princípio do fluxo subterrâneo é a lei de conservação de massa traduzida na equação da continuidade ou da conservação. A equação governante é tradicionalmente derivada a partir de um fluxo que passa através de um cubo de material poroso, grande o suficiente para representar as propriedades de um meio poroso, porém, pequeno para que a mudança de carga com o volume seja relativamente pequena. Esse cubo é conhecido como Volume Elementar Representativo (VER), com volume igual a $\Delta x \Delta y \Delta z$ (ANDERSON & WOESSNER, 2015).

Para condições permanentes, a lei da conservação exige que a quantidade de água que flui para fora de um VER seja igual ao que entra. Essa consideração implica na principal característica de modelos permanentes, isto é, não existe variação da carga hidráulica com o tempo.

Algumas simplificações devem ser feitas. Primeiro, devemos considerar a água como um fluido incompressível. Segundo, deve-se assumir que no volume elementar não existe recarga nem descarga da água que o atravessa (não ocorre adição nem redução de água). O balanço de massa é calculado pela soma dos resultados da componente em cada direção (Figura 3.6).

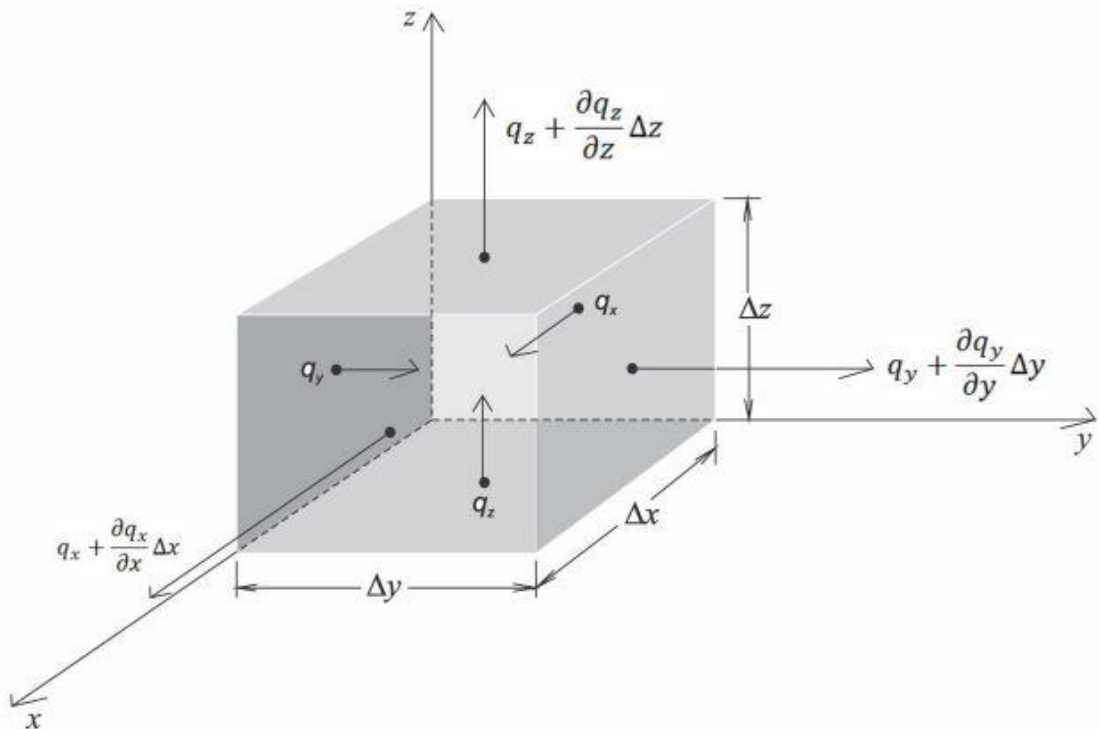


Figura 3.6: Volume elementar representativo para a derivação da equação da continuidade (WANG & ANDERSON, 1982).

A equação da continuidade pode então ser representada tal como se mostra na equação 3.6.

$$\frac{\partial q_x}{\partial x} + \frac{\partial q_y}{\partial y} + \frac{\partial q_z}{\partial z} = 0 \quad (3.6)$$

A equação de Laplace combina a equação da continuidade com a lei de Darcy, em uma equação diferencial parcial de segunda ordem (Equação 3.7).

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(-K \frac{\partial h}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(-K \frac{\partial h}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(-K \frac{\partial h}{\partial z} \right) = 0 \quad (3.7)$$

Onde $K = K(x, y, z)$. Se o material for considerado homogêneo e isotrópico, a equação 3.7 se torna a equação 3.8 abaixo. Esta é a equação governante para fluxo de águas subterrâneas em aquífero homogêneo, isotrópico em regime permanente (WANG & ANDERSON, 1982).

$$\frac{\partial^2 h}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 h}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 h}{\partial z^2} = 0 \quad (3.8)$$

3.3.2. Condições de Contorno

Somente com a equação governante, um modelo poderia convergir para infinitas soluções. As condições de contorno especificam valores de parâmetros a nós do modelo, limitando a quantidade de soluções possíveis. As condições de contorno podem ser classificadas em três tipos diferentes:

- Tipo 1 (Dirichlet - Carga hidráulica especificada): valores de carga hidráulica conhecidos. Muitas vezes utilizada ao longo de rios interligados ao aquífero, de maneira que a cota do rio corresponde a um contorno de carga hidráulica conhecida;
- Tipo 2 (Neumann – Fluxo especificado): caso em que não se conhece o h , porém se tem informações do gradiente (normal ou tangencial). Normalmente é utilizada como uma condição de não fluxo (fluxo conhecido igual a zero), presente em divisores de água ou no contato com unidades impermeáveis.
- Tipo 3 (Cauchy – fluxo dependente da carga): consiste em uma combinação linear da carga hidráulica e do fluxo, empregado em situações de contorno semipermeável.

3.3.3. Condições Iniciais

Modelos transientes, nos quais os valores de carga hidráulica apresentam dependência em relação ao tempo, requerem uma distribuição inicial de cargas. Ao contrário de modelos em regime permanente, onde a simulação das cargas independe da configuração inicial de h , simulações iniciais em regime transiente são extremamente influenciadas pela sua distribuição inicial de cargas. Nesse sentido, é possível afirmar que as condições iniciais de comportam como condições de contorno para a simulação em regime transiente. É usual que seja desenvolvido um modelo em regime permanente para a obtenção da distribuição das cargas como condições iniciais para uma posterior simulação em regime transiente. O projeto em questão não desenvolveu um modelo em regime transiente, por isso não será detalhado esse aspecto teórico (ANDERSON & WOESSNER, 2015).

3.3.4. Calibração

Para desenvolver as simulações, se faz necessária a escolha dos parâmetros iniciais a serem inseridos no modelo numérico. Esses parâmetros derivam do modelo conceitual e podem

ser obtidos na literatura ou por meio de tratamento de dados de monitoramento. É muito difícil que na primeira simulação os dados computados pelo modelo correspondam aos valores reais de campo. A etapa de calibração consiste no ajuste dos parâmetros de entrada com o objetivo de se equiparar os valores computados aos reais (WANG & ANDERSON, 1982). Essa etapa pode ser realizada de forma manual, porém existem softwares que procuram pela melhor configuração de parâmetros, dentro de intervalos especificados pelo modelador, para o menor erro possível, tal como o PEST.

3.3.5. Análise de sensibilidade

A análise de sensibilidade visa avaliar a confiabilidade do modelo calibrado, associada a incerteza dos parâmetros inseridos no modelo (condições de contorno, propriedades dos materiais, geometria, etc) (ANDERSON & WOESSNER, 2002). Essa análise monitora a variabilidade dos valores de saída do modelo (distribuição de cargas hidráulicas, por exemplo) com a variação dos parâmetros de entrada. Dessa forma, quanto maior a variabilidade de saída, maior a sensibilidade a determinado parâmetro de entrada e maior a incerteza do modelo.

3.4. Modelo Numérico

Para o cálculo dos valores de saída, deve-se resolver as equações governantes do modelo matemático, utilizando-se as condições de contorno e condições iniciais (no caso de regime transiente) para restringir as soluções possíveis. Para a resolução das equações, pode-se utilizar dois métodos matemáticos principais: o método *analítico* e o *numérico*. O projeto em questão desenvolve um modelo numérico de fluxo, por isso o analítico não será explorado (ANDERSON & WOESSNER, 2002).

Modelos numéricos não são contínuos no tempo e no espaço. A carga é calculada em pontos discretos (nós) e para determinados períodos no tempo. Todavia, eles podem resolver equações governantes em modelos 3D, heterogêneos e anisotrópicos, utilizando as mais complexas condições iniciais e de contorno. Como já citado, os principais métodos são o das *diferenças finitas* (MDF) e o dos *elementos finitos* (MEF).

Estes métodos são praticamente equivalentes na sua acurácia, porém a aproximação do MEF é mais versátil e sua discretização mais flexível. O MEF aproxima a equação de fluxo por integração, enquanto que o MDF aproxima por diferenciação (SPITZ & MORENO, 1996).

A principal premissa do MEF consiste na substituição da solução exata de uma equação diferencial parcial por uma solução aproximada contínua por partes. Esse conceito é uma das principais diferenças em relação ao método do MDF (WANG & ANDERSON, 1982).

O modelo que utiliza a solução MEF é segmentado em elementos poligonais comumente triangulares, porém, não necessariamente. Esses elementos apresentam nós em cada um de seus vértices, para os quais serão calculados os valores de carga hidráulica desconhecidos. No interior dos elementos a carga é calculada por meio de interpolação a partir dos valores computados para os nós.

O algoritmo computacional (código) escolhido para a aplicação dos métodos de elementos finitos foi o FEFLOW - *Finite Element Subsurface Flow and Transport Simulation System* (DIERSCH, 2002). O FEFLOW é um sistema interativo de modelagem de fluxo de águas subterrâneas e transporte de massa e calor em zona saturada e não saturada. Ele foi escolhido devido a sua maior versatilidade em representar contornos irregulares, condições de contorno internas ao domínio, níveis d'água dinâmicos e geometrias mais complexas (ANDERSON & WOESSNER, 2002), ideal para aquíferos heterogêneos, como o cárstico da área de estudo.

3.5. Modelagem aplicada à mineração

No contexto da mineração, a água assume um papel dual. Apesar de ser imprescindível ao desenvolvimento de uma série de operações mineiras, sua presença em subsuperfície associada ao corpo mineralizado é um obstáculo a ser superado que atrasa o avanço do empreendimento (RUBIO, 2006).

As mineralizações comumente ocorrem abaixo do nível freático. Nesse sentido, a hidrogeologia em contexto de mineração pode ser caracterizada quanto a dois aspectos: um operacional e outro de carácter ambiental/social. Na questão operacional, para a lavra do minério é necessário o rebaixamento do nível d'água de maneira que a exploração do insumo ocorra em meio seco. Isso é um fator limitante na operação de certos empreendimentos, pois permite o acesso de pessoas e maquinário à mina. Do contrário podem ocorrer inundações com danos materiais ou sociais que impactam no lucro e licenciamento do projeto.

No aspecto ambiental e sócio-econômico, segundo Younger & Wolkersdofer (2004) o rebaixamento do nível d'água pode acarretar: (1) Decaimento de volume que verte para rios, áreas úmidas e lagos; (2) Abatimento do nível freático com impacto em mananciais e em poços utilizados para irrigação, que em primeira instância, pode contribuir para a elevação do custo

de bombeamento; (3) Subsistência do terreno; (4) Poluição de águas superficiais e subterrâneas em caso de descarte e bombeamento de água de baixa qualidade.

Além disso, é necessário definir o destino da água bombeada. A depender da qualidade da água, parte do volume retirado pode ser aproveitado para irrigação, abastecimento público ou para os processos da mineração (maquinário, beneficiamento, etc). O descarte da água em drenagens deve ser muito bem estudado, mantendo um controle químico e garantindo que a quantidade de água não aumente excessivamente a velocidade do fluxo, o que leva a erosão e assoreamento dos rios (NASCIMENTO, 2015).

Nesse contexto, a modelagem é uma ferramenta que oferece resultados importantes para os dois aspectos tratados. Sua principal função é a de permitir ao hidrogeólogo uma maior previsibilidade do comportamento do aquífero frente ao seu desaguamento.

Essa característica é importante na operação, pois possibilita a otimização do bombeamento, evitando desperdícios com o superdimensionamento do sistema e surpresas desagradáveis, como a entrada súbita de água nas escavações. Aryafar & Ardejani (2009) pontuam que a antecipação dos mecanismos de afluxo de água para a mina e a concepção de um sistema de rebaixamento são os desafios mais urgentes em hidrogeologia aplicadas à mineração. Constitui uma ferramenta importante no planejamento do descomissionamento da mina.

No contexto ambiental e sócio-econômico, a modelagem permite determinar e prever os impactos nos recursos hídricos superficiais e subterrâneos que poderiam ocorrer na área de influência do empreendimento a ser implantado.

Importante citar, porém, alguns cuidados que se deve ter ao aplicar modelagem à mineração. Primeiramente é preciso esclarecer o objetivo da modelagem. Para a quantificação dos impactos ambientais do desaguamento do aquífero é necessária a construção de um modelo regional. Para um uso operacional, de determinação de estratégias de desaguamento de mina, normalmente são desenvolvidos modelos em menor escala. Nesse contexto, por vezes é preferível a utilização de modelos analíticos em lugar dos numéricos (BROWN & TROTT, 2014).

Alguns erros comuns associados a modelagem em minerações são enumerados por Brown & Trott (2014): (1) investigação hidrogeológica insuficiente; (2) modelo conceitual insuficiente e/ou falta de conceituação alternativa do problema abordado; (3) crença de que o modelo dará todas as respostas às questões específicas da mina; (4) uso de modelo excessivamente complexo.

km² de área. Ela se situa num raio de 20 km a nordeste do município de Paracatu. A área abriga dois afluentes do rio Paracatu, o Ribeirão Santa Rita e o São Pedro.

4.2. Clima

As informações acerca do clima de Paracatu foram baseadas no Plano Diretor de Recursos Hídricos da Bacia do Rio Paracatu (2006). A bacia hidrográfica do rio Paracatu apresenta um clima tropical chuvoso típico, com temperaturas elevadas e chuvas concentradas no período de outubro a abril, quando chove cerca de 93% do total anual. No período seco, a ocorrência de chuvas é mínima e a temperatura mínima média mensal gira em torno de 18°C.

As temperaturas médias anuais da bacia variam de 21 a 24°C, sendo que os valores mais elevados ocorrem na parte leste da bacia, nas regiões de depressões de relevo. As temperaturas máximas ocorrem no mês de setembro, com valor médio entre 28,3 e 31,7°C. As mínimas ocorrem no mês de julho, com média variando de 11,8 a 13,4°C. A umidade relativa do ar costuma variar entre 80 a 50%.

O regime pluviométrico da bacia é resultado do anticiclone semifixo do Atlântico Sul, da massa de ar tropical continental e das correntes perturbadas de oeste. Estas últimas influenciam na distribuição espacial dos totais anuais de chuva, que decrescem de 1600 mm para 1000 mm no sentido de oeste para leste. A média das chuvas na bacia é de 1340 mm/a. A figura 4.2 exhibe a distribuição do clima ao longo da bacia.



Figura 4.2: Distribuição do clima na bacia do Rio Paracatu. Retirado de Planpar, 1996

4.3. Geomorfologia

A região pode ser compartimentada em três domínios geomorfológicos:

- **Cristas estruturais:** Este compartimento apresenta orientação predominante NNW-SSE e atinge cotas acima de 900 metros. As cristas estruturais são conhecidas localmente como serras, representadas pela Serra da Aldeia, do Canto e da Anta, e são constituídas em geral por topos desnudos onde ocorrem afloramentos rochosos de quartzito fino, metassiltito e filito da Formação Paracatu;
- **Morros residuais pelíticos e dolomíticos:** A unidade dos morros pelíticos apresenta alinhamento paralelo ao das cristas estruturais, ou seja, NNW – SSE, com cotas inferiores a 800 metros. Nas proximidades das cristas estruturais são predominantes os morros pelíticos de feição, na maioria das vezes, convexas;
- **Superfícies aplainadas e suavemente onduladas:** Caracterizam-se por áreas deprimidas e superfícies fracamente onduladas em altitudes inferiores a 650 metros, onde está inserida a Bacia Hidrográfica do Rio São Pedro e Santa Rita. É formado basicamente por pelitos carbonosos da Serra do Garrote.

A figura 4.3 exibe um mapa digital de elevação do polígono do projeto. A área em estudo apresenta uma amplitude topográfica de 310 m, entre as cotas de 535 até 845 m. Ela é caracterizada por um relevo plano na área de drenagem dos rios São Pedro e Santa Rita, desenvolvida pelo processo erosivo intenso sobre o dolomito das Fms. Morro do Calcário e Serra do Poço Verde. Nessas porções, a densidade de drenagem é baixa e podem ser identificadas uma série de depressões de forma ovalada que consistem em dolinas. Algumas delas estão preenchidas por água e constituem lagos.

Nas áreas de afloramento das Fms. Serra do Garrote (leste) e Serra da Lapa (oeste), de composição pelítica, ocorrem pequenos morros de baixa inclinação e amplitude de aproximadamente 60 m. Essas áreas são marcadas por elevada rugosidade de terreno e alta densidade de drenagens.

Chamam atenção alguns morros de maior amplitude topográfica. Eles se apresentam alongados e orientados segundo NNW-SSE, com uma altura de aproximadamente 180 m. Tais feições de relevo ocorrem tanto na área de afloramento de dolomito como na de filito. Quando associados ao dolomito, sua presença é associada a cimentação por sílex dos litotipos, tornando-os mais resistentes ao intemperismo.

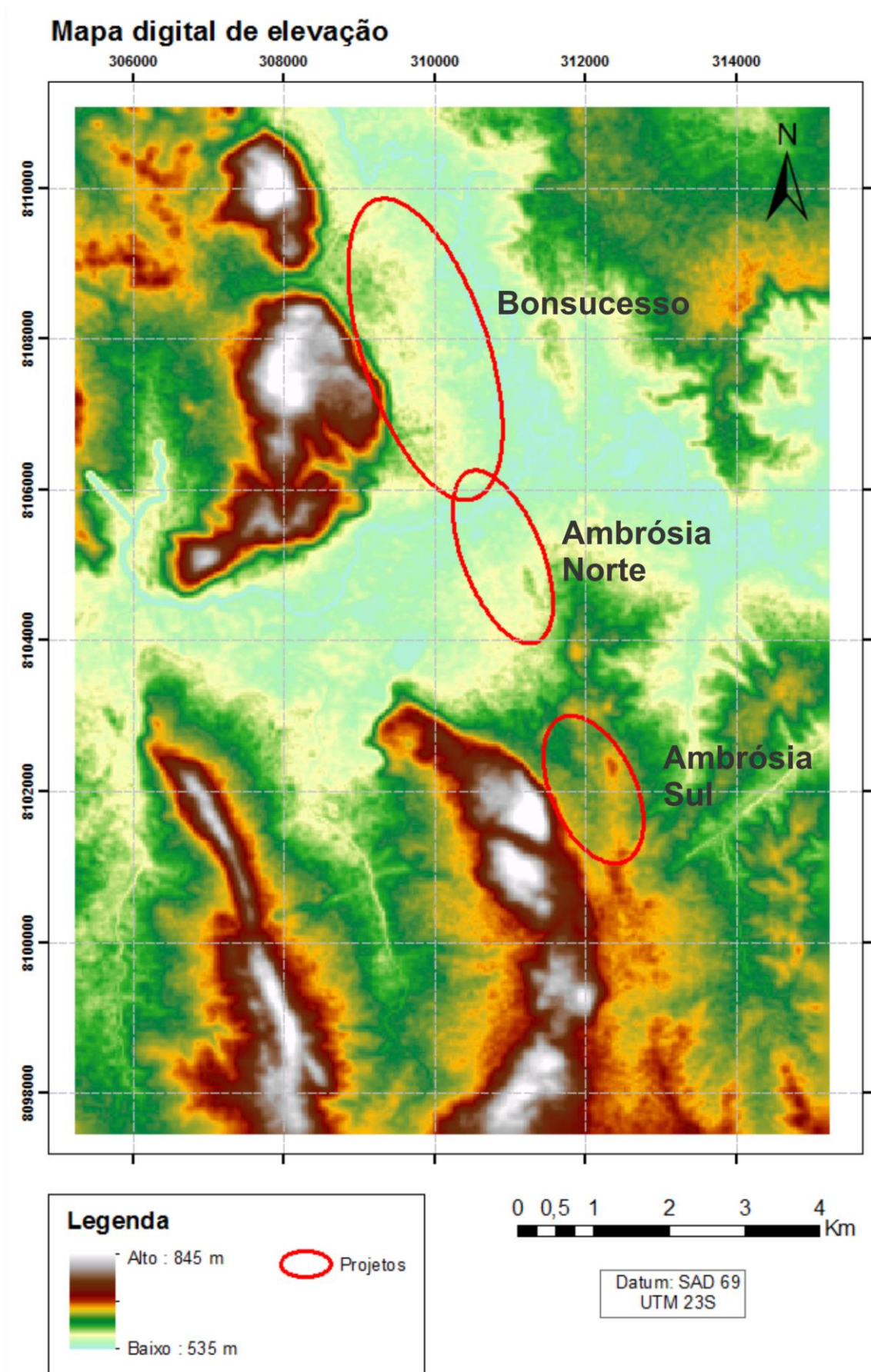


Figura 4.3: Mapa digital de elevação do terreno do polígono de área a ser modelado.

4.4. Geologia

A região se localiza no interior da Faixa de dobramentos Brasília, composta, em geral, por sequências arqueanas do Arco Magmático de Goiás; intrusões ígneas e sequências vulcanossedimentares de idades variadas; e sequências sedimentares e metassedimentares dos grupos Araí e Serra da Mesa (Paleo-Mesoproterozoico), Paranoá e Canastra (Mesoproterozoico), Araxá, Ibiá e Vazante (Meso-Neoproterozoico) e Bambuí (Neoproterozoico) (DARDENNE, 2000). As mineralizações de interesse neste projeto estão inseridas no Grupo Vazante.

Segundo Dardenne *et al.* (1998), o Grupo Vazante é constituído por uma espessa sequência marinha pelítico-carbonática aflorante em uma faixa N-S de aproximadamente 200 km, limitado a leste e a oeste por contatos tectônicos com os grupos Bambuí e Canastra, respectivamente. O contexto geotectônico do Grupo Vazante ainda não é bem definido. Alguns autores o consideram como uma sequência típica de margem continental passiva (CAMPOS NETO, 1984; ALMEIDA, 1993; FUCK, 1994), devido à grande espessura dos sedimentos da Faixa Vazante-Paracatu (>2500 m).

Outros autores, porém, a definem como uma bacia de antepaís (foreland) (DARDENNE *et al.*, 1998; THOMAZ FILHO *et al.*, 1998), que teria sido afetada por subsidência rápida, com elevada taxa de sedimentação, que se instalou nos primeiros *fronts* de cavalgamento da Faixa Brasília. A idade do grupo também não é consenso, porém, estudos quimioestratigráficos com base em Sr^{87}/Sr^{86} realizados nas formações Lagamar (fosforitos) e Rocinha (calcários) indicam idades entre 680 e 600 Ma (MISI *et al.*, 1997b); enquanto Azmy *et al.* (2001) data o grupo pelo mesmo método entre 800 e 700 Ma.

A base do grupo é composta por conglomerado, quartzito e diamictito (Formação Retiro, posteriormente chamada de Santo Antônio do Bonito) depositados em ambiente glacio-marinho de águas relativamente profundas. Estes gradam para ritmito e pelito, que incluem folhelho carbonático com pirita e importantes concentrações de fosfatos da Formação Rocinha e unidades psamopelíticas e dolomíticas da Formação Lagamar. Sobrepostas a essas unidades, ocorrem pacotes de ardósias intercaladas por quartzitos da Formação Serra do Garrote. Acima, as formações Serra do Poço Verde e Morro do Calcário são caracterizadas por rochas dolomíticas, enquanto a Formação Serra da Lapa é constituída por filito, metassilito carbonático e lentes de dolomito e ardósia carbonosa (DARDENNE *et al.*, 1998; DARDENNE, 2000). As mineralizações de Zn e Pb de interesse econômico, ocorrem nas formações Serra do Poço Verde e Morro do Calcário. A figura 4.4 exibe uma coluna litoestratigráfica do grupo,

detalhando suas características, enquanto que a figura 4.5 expõe uma seção esquemática do Grupo Vazante.

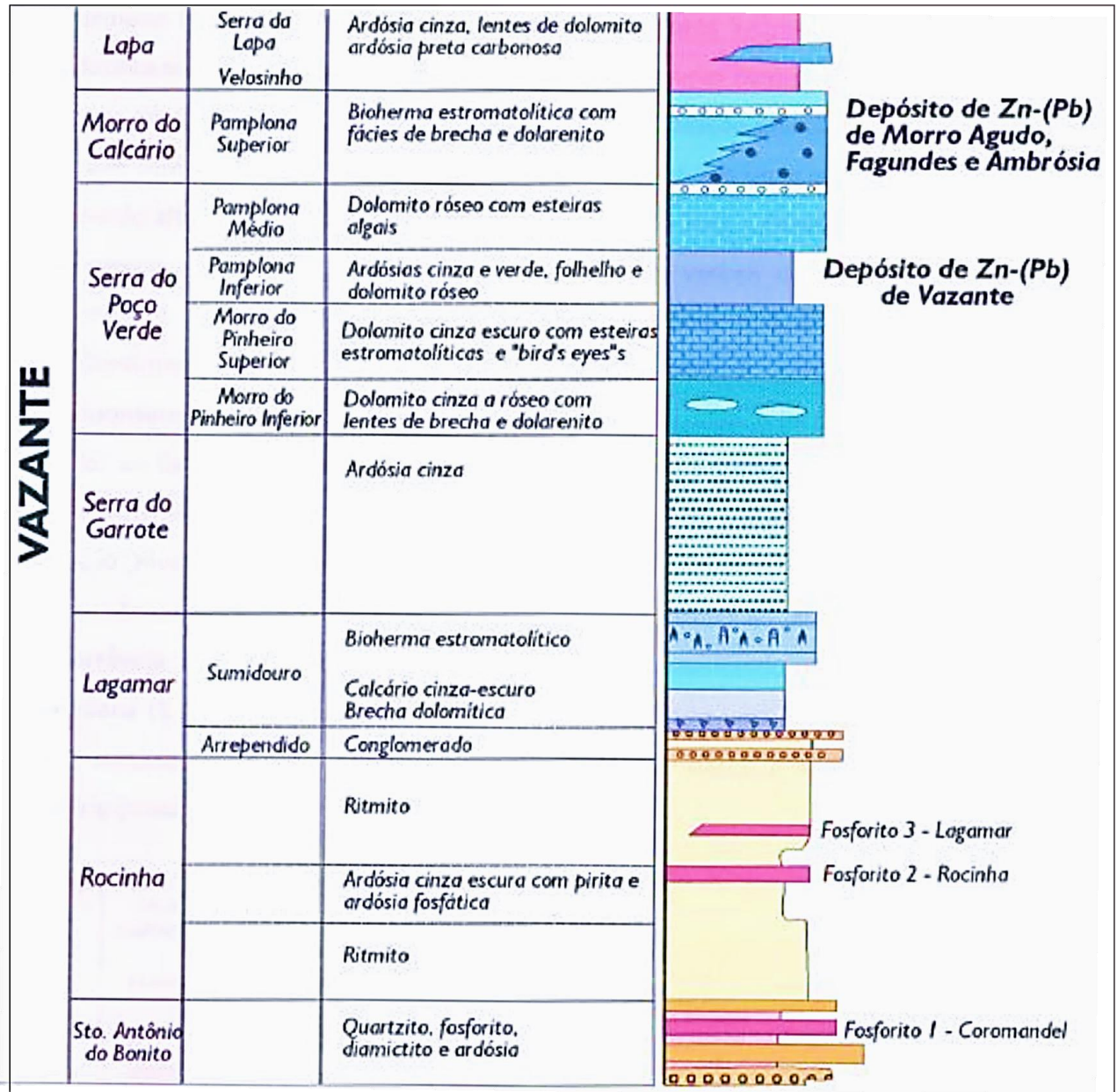


Figura 4.4: Coluna litoestratigráfica do Grupo Vazante, segundo Dardenne et al. (1998), Dardenne & Schobbenhaus (2001) e Dardenne (2001). Retirado de Monteiro (2002).



Figura 4.5: Perfil geológico esquemático do Grupo Vazante (Dardenne et al., 1998a).

A Formação Serra do Poço Verde é constituída pelas rochas hospedeiras do depósito zincífero de Vazante e é subdividida em quatro membros (DARDENNE, 2000):

- Membro Morro do Pinheiro inferior: dolomito cinza claro e rosa maciço ou com laminações algais planas e onduladas e leitos subordinados de dolarenito, brecha lamelar e lentes de estromatólito colunar. Espessura ~ 500m.
- Membro Morro do Pinheiro superior: dolomito cinza escuro com *bird's eyes* e laminações planas e convolutas, provavelmente de origem algal. Leitos subordinados de dolarenito, brecha lamelar, folhelho carbonoso com pirita e marga. Espessura ~ 300 m.
- Membro Pamplona inferior: filito carbonático, ardósia carbonosa com intercalações com leito dolomítico com laminações algais planas e convolutas, localmente com *bird's eyes* e *mudcracks*. Espessura ~ 500 m.
- Membro Pamplona médio: dolomitos cinza-claro a rosa com estromatólito colunar, raras lentes de folhelho preto. Espessura ~ 200 m.

A Formação Morro do Calcário (DARDENNE, 2000) corresponde ao antigo membro Pamplona superior (RIGOBELLO *et al.*, 1988) e define um complexo de recifes, com fácies de pós-recife e ante-recife. Ela é composta por dolomito estromatolítico róseo a cinza-claro, dolomito cinza-escuro com laminação algal e níveis de dolarenito fino a grosso, cinza-claro, oolítico e oncolítico, dolorudito e brecha lenticular constituída por fragmentos centimétricos de dolomito estromatolítico em matriz dolomítica. Sua espessura é cerca de 900 m (DARDENNE, 2001). Tal formação hospeda as mineralizações de Zn e Pb dos depósitos de Morro Agudo, Fagundes, tal como Ambrósia e Bonsucesso. A figura 4.6 exhibe o mapa geológico regional da faixa Vazante e o geológico local da área de estudo.

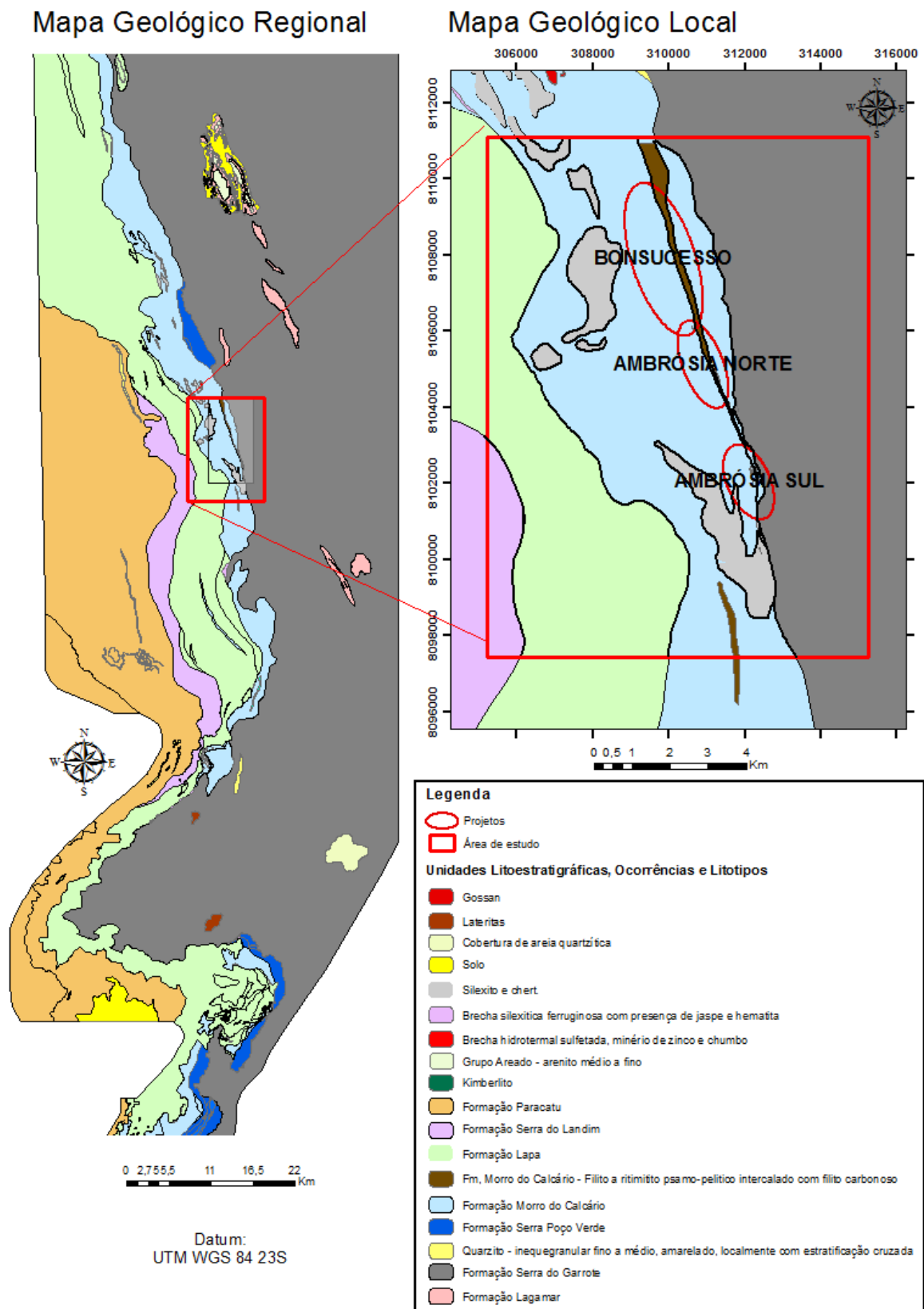


Figura 4.6: Mapa geológico regional integrado e local da área em estudo. Destaque para a associação das mineralizações à falha de empurrão que marca o contato da Fm. Serra da Garrote e Morro do Calcário e às falhas inversas presentes no interior da Fm. Morro do Calcário.

As mineralizações sulfetadas da porção norte foram comparadas a diferentes tipos de modelos genéticos, como do tipo Mississippi Valley (MVT) (AMARAL, 1968; RIGOBELLO et al., 1988; IYER et al., 1992) ou Depósitos Sedimentares Exalativos (SEDEX) (MISI, 1996; FREITAS SILVA & DARDENNE, 1997), porém Monteiro (2002) considera suas características mais condizentes com o modelo IRISH (CUNHA, 1999; CUNHA et al., 2017; MISI et al., 1999; DARDENNE, 2000; DARDENNE & SCHOBENHAUS, 2000).

5. METODOLOGIA APLICADA

O desenvolvimento do trabalho ocorreu em etapas pautadas nos PAMMs, descritos na seção 3.1 deste relatório. A seguir são descritas cada fase do projeto.

5.1.Revisão Bibliográfica

Essa etapa consiste na consulta a bibliografia e se estende do início ao fim do projeto. São consultados artigos, relatórios, apostilas, livros, mestrados e doutorados que darão suporte teórico e técnico ao projeto, no que diz respeito a:

- Métodos de aquisição de dados;
- Contexto geológico, hidrogeológico e econômico da área de estudo;
- Conceitos e técnicas de modelagem aplicada à hidrogeologia;
- Parâmetros hidráulicos a serem considerados.

5.2.Aquisição de Dados

Para a modelagem hidrogeológica é essencial a aquisição da maior quantidade de dados possível, o que fornece robustez e confiabilidade ao modelo. A maior parte dos dados foram adquiridos junto a empresa Nexa Resources que atualmente pesquisa e explora metais de Zn e Pb na região de Vazante e Paracatu. São eles:

5.2.1. Dados de fluviometria

A vazão de drenagens na área de estudo é monitorada pela equipe de hidrogeologia do complexo Morro Agudo da Nexa Resources. Foram utilizados dados de três pontos de monitoramento distribuídos no rio Santa Rita. A figura 5.1 exibe a localização dos pontos de medição de vazão na área.

As vazões são obtidas através de duas metodologias. Podem ser coletadas a partir do equipamento *Flowtracker I*. Este é um medidor de vazão ADV® (Acoustic Doppler Velocimeter). O equipamento faz um cálculo automático de vazão, utilizando uma variedade de métodos analíticos internacionais, incluindo as normas ISO e USGS. (CLEAN, 2017).

Outra forma de medição se dá através da leitura de réguas linimétricas. São instaladas réguas nos rios e monitorados os níveis de água paralelamente à medição da vazão com o *Flowtracker*. Após certo período de monitoramento, podem ser comparados os dados de nível de água com os de vazão. Gera-se assim a chamada curva chave que relaciona os valores lidos

na régua com a vazão esperada para esse nível. Essa metodologia economiza tempo, mas deve ser calibrada com novas medições de vazão de tempos em tempos.

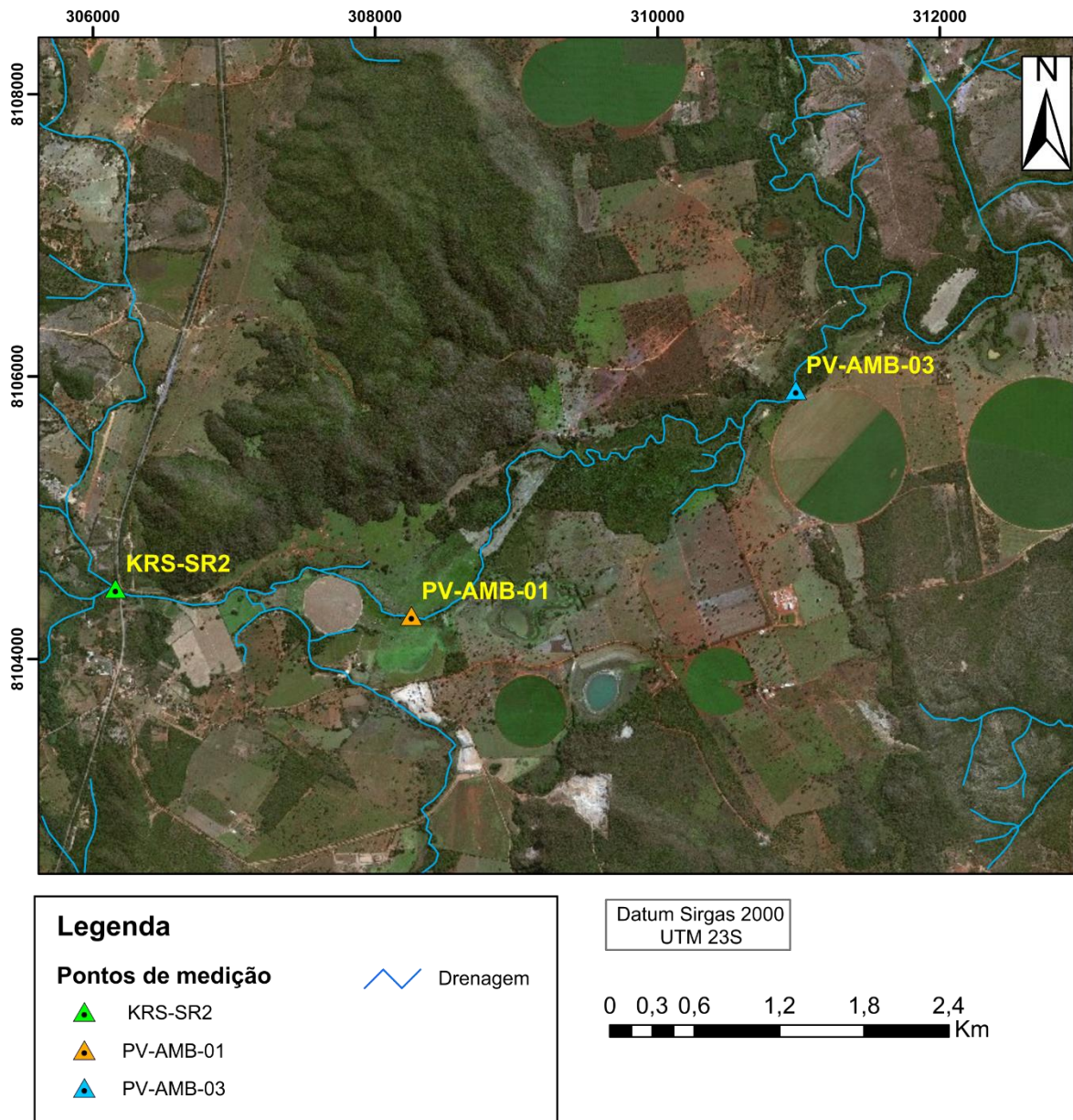


Figura 5.1: Localização dos pontos de medição da vazão utilizados.

5.2.2. Testes de bombeamento

Consiste no bombeamento de um poço durante um determinado intervalo de tempo e no registro da evolução dos rebaixamentos do nível d'água em função do tempo do poço bombeando e de poços de monitoramento ao seu redor. O procedimento é usado para a determinação dos parâmetros hidrodinâmicos dos aquíferos (transmissividade, permeabilidade, influência de barreiras, raio de influência, condições de contorno), para a verificação da

qualidade da construção das obras de captação de água subterrânea e como uma ferramenta indispensável para a determinação de vazões de exploração de poços (FEITOSA *et al.*, 1998).

Foram fornecidos dados de onze testes de bombeamento. Seis foram realizados no contexto do projeto Ambrósia Sul, dos quais três foram testes de 24 horas e outros três de 15 dias de duração; e quatro em Ambrósia Norte, todos de 15 dias. A figura 5.2 exibe a localização dos poços onde foram realizados os testes de bombeamento.

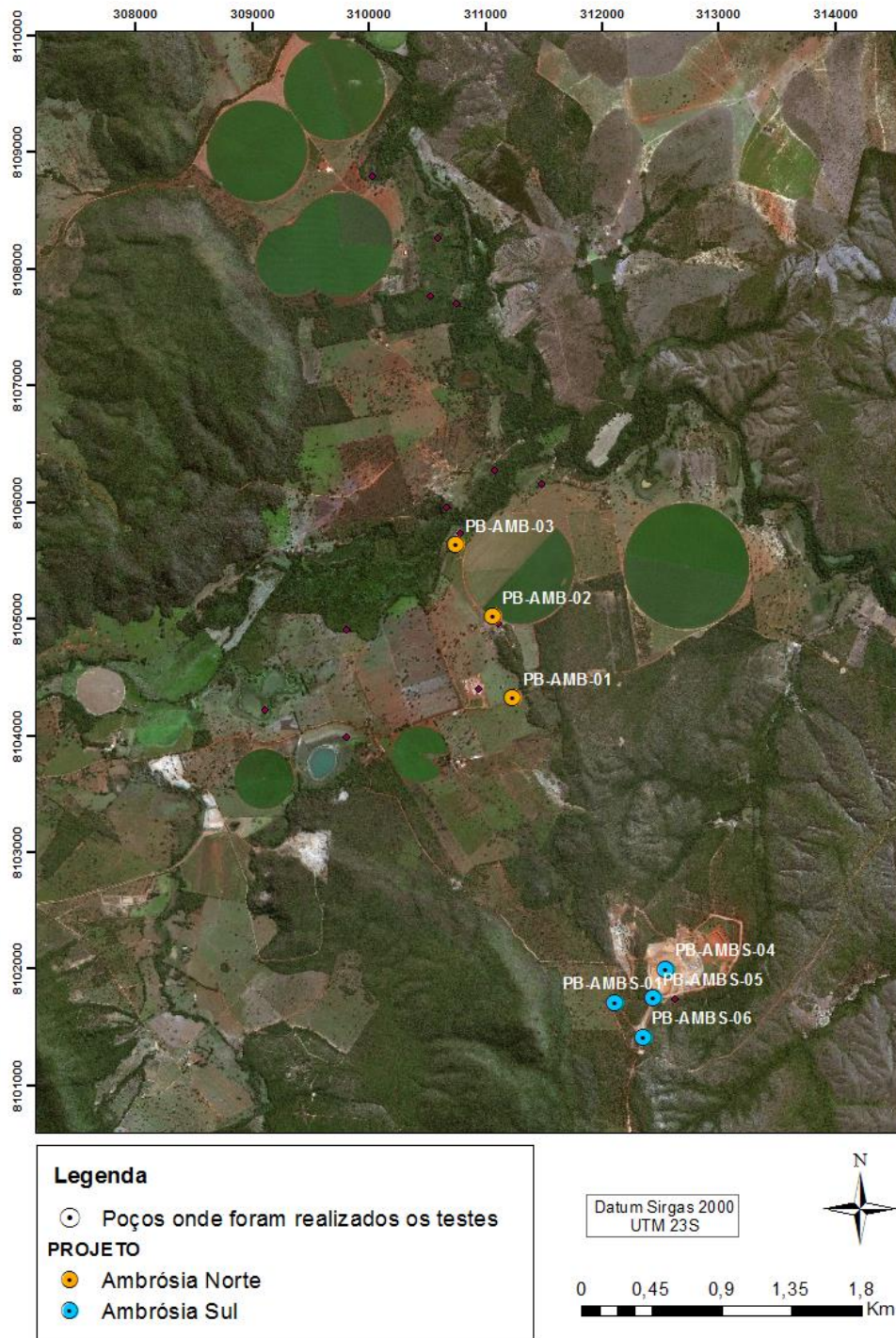


Figura 5.2: Localização dos poços onde foram realizados os testes de bombeamento

5.2.3. Levantamento dos poços da área e monitoramento do nível d'água

A empresa consultora MDGEO realizou um trabalho de levantamento dos pontos de água na área do empreendimento. Foram cadastrados:

- Pontos de interesse relacionados aos recursos hídricos e/ou geológicos/estrutural (lagoas, dolinas, cavidades e drenos);
- Nascentes e drenagens secas;
- Medições de parâmetros físico-químicos quando possível: temperatura, condutividade elétrica, pH e Eh nos principais pontos de água de interesse;
- Principais usuários de água na área;
- Estruturas de captação de água como cisternas (poços escavados) e poços tubulares.

Também foram fornecidos pela Nexa Resources dados de profundidade de nível d'água em um total de 84 instrumentos de monitoramento semanal, como piezômetros (PZs - medidor de NA de aquífero profundo), indicadores de nível de água (INAs – medidor de NA do aquífero raso), poços escavados (PEs), poços aproveitados de furos de sondagem para pesquisa geológica (PMs) e poços de bombeamento (PBs), estejam eles bombeando ou não. A figura 5.3 exibe a localização dos instrumentos de monitoramento de nível de água nos três projetos do trabalho.

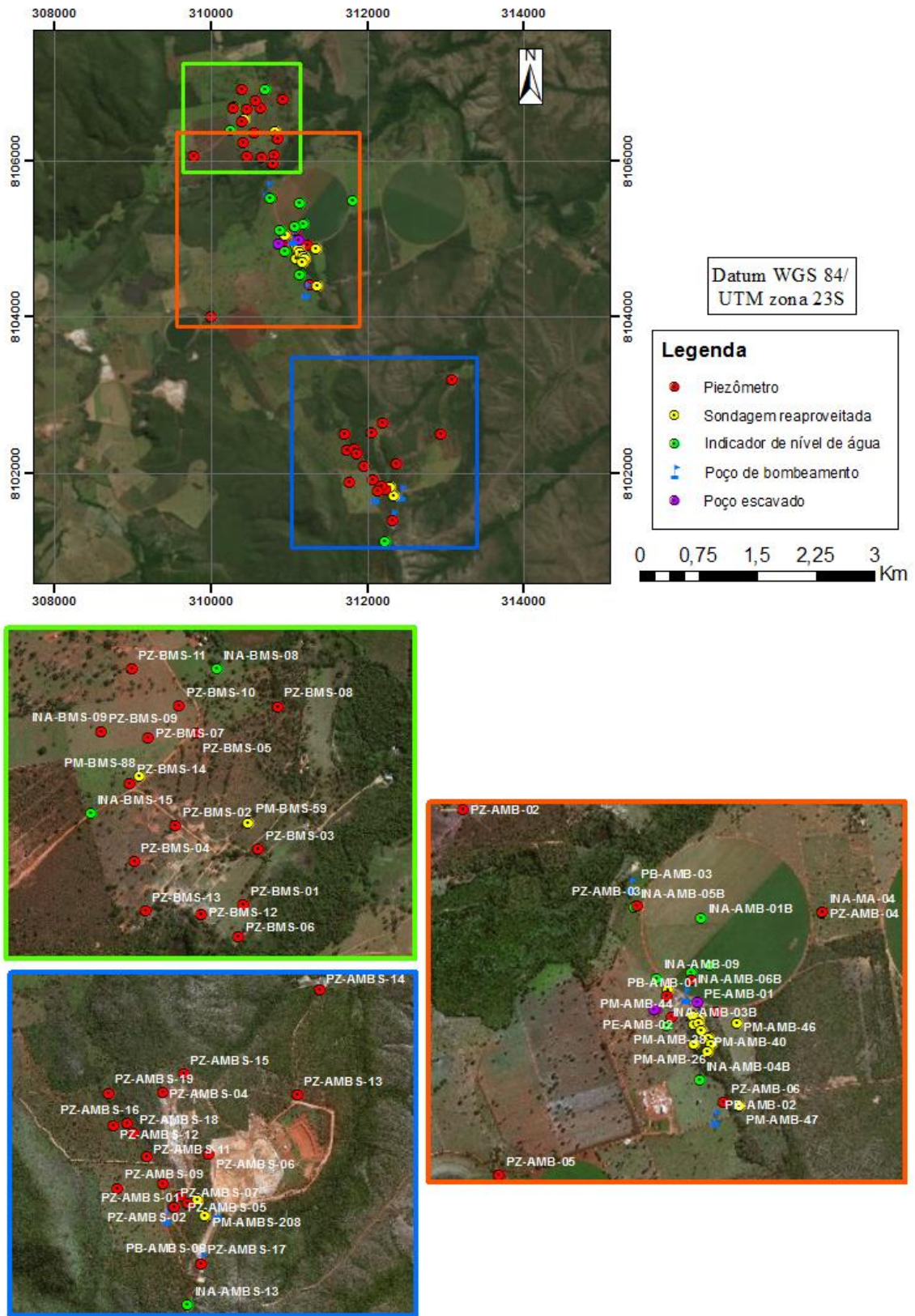


Figura 5.3: Distribuição dos instrumentos de monitoramento do nível d'água em Ambrósia Sul, Norte e Bonsucesso.

5.2.4. Dados de pluviometria

O monitoramento da precipitação na área foi realizado por meio de pluviômetros do tipo Ville de Paris. Eles informam a quantidade de chuva precipitada em uma determinada região. O volume precipitado é medido pela altura em milímetros da água acumulada em uma proveta graduada para esse fim (Figura 5.4).



Figura 5.4 Monitoramento de precipitação a partir de pluviômetros Ville de Paris.

São três os instrumentos monitorados na área: um no entorno do projeto Ambrósia Sul, iniciou a captação em setembro de 2013; outro em Ambrósia Norte, com início em setembro de 2010; e um pluviômetro mais a norte da área do projeto sob responsabilidade da Agência Nacional das Águas (ANA), monitorando as chuvas da região desde outubro de 1983. A figura 5.5 exhibe a localização dos pluviômetros que compõem o histórico das chuvas na área.

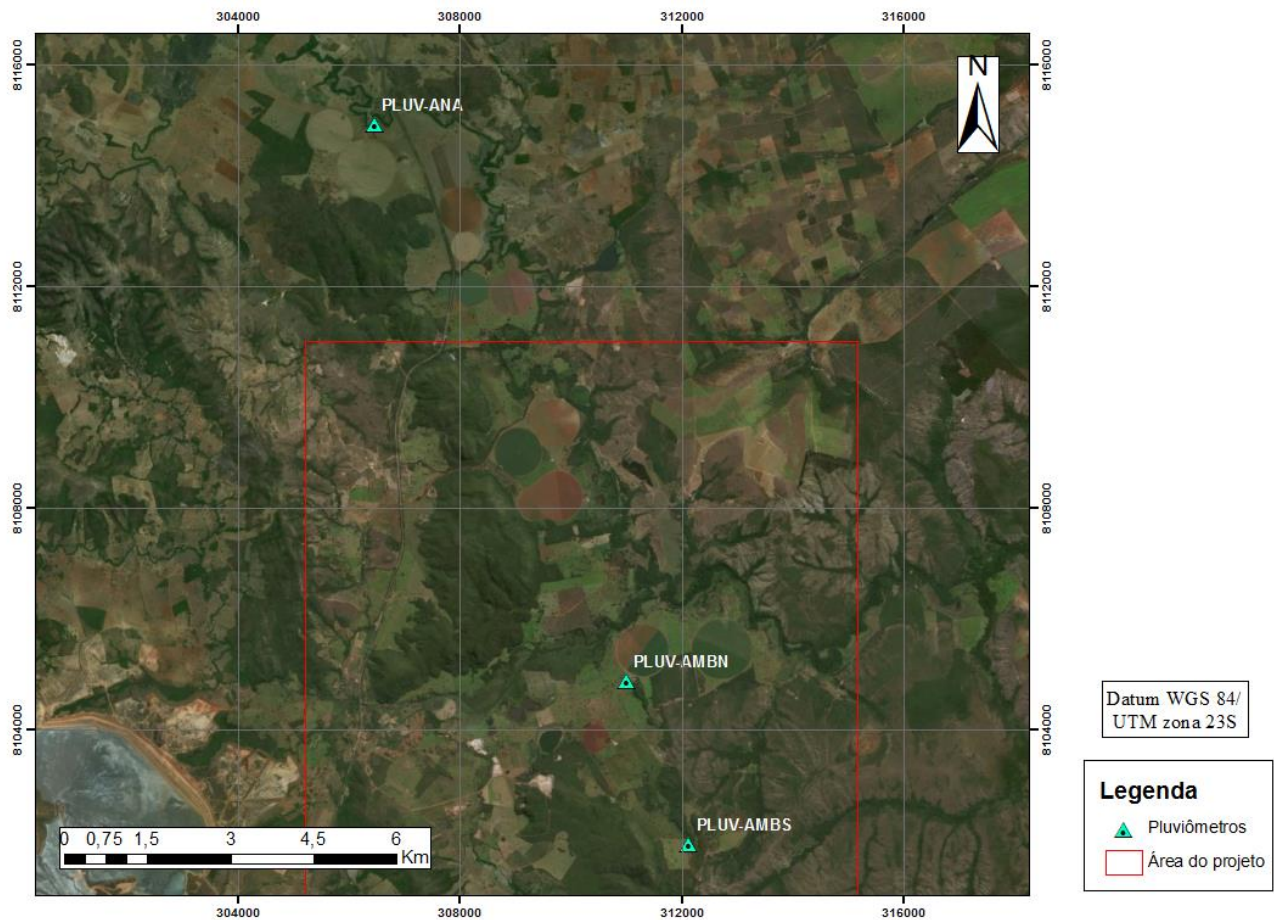


Figura 5.5: Localização dos pluviômetros utilizados para compor o histórico de chuvas na área.

5.2.5. Mapeamento geológico e informações geológicas de subsuperfície

Para melhor caracterização da geologia da área foram obtidos alguns dados junto ao setor da exploração mineral da Nexa Resources. São eles:

- Mapa geológico e estrutural regional e da área em detalhe;
- Perfis geofísicos tratados;
- Fotos de testemunhos de furos de sondagem realizados no local com respectiva descrição litológica e geomecânica;
- Modelos geológicos dos projetos isolados.

5.2.6. Atividades de Campo

Foram realizados trabalhos de campo na área de estudo visando o reconhecimento, caracterização e amostragem dos litotipos a serem trabalhados. Acompanhou-se ainda o monitoramento de piezômetros, pluviômetros e vazões de rios e leitura de régua em lagoas e

drenagens. A visita a campo permitiu o reconhecimento dos empreendimentos ali em desenvolvimento e avaliação do uso de água por superficiários.

Realizaram-se coletas de amostras de água para análise química e isotópica no Laboratório de Hidrogeologia e Hidroquímica, do Departamento de Geologia Aplicada (DGA) da UNESP. A figura 5.6 exibe a localização dos pontos de coleta. As amostras foram coletadas em frascos de vidro de borossilicato com capacidade de 50 mL, conforme recomendação da Agência de Energia Atômica Internacional (AEAI) (Fig. 5.7). Tomou-se o cuidado de não deixar bolhas de ar no interior dos frascos, que foram vedados com tampões de plástico e tampas rosqueáveis vedadas com fitas adesivas para evitar a evaporação da água e comprometimento da amostra.

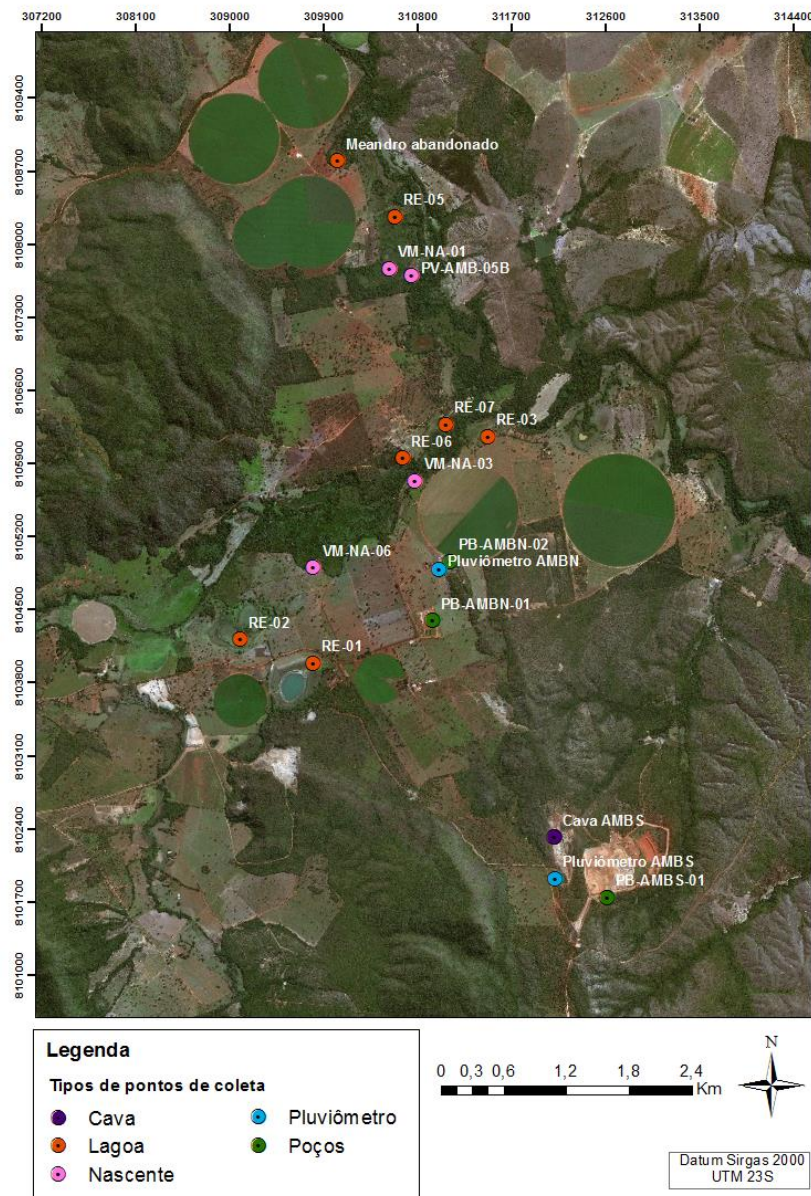


Figura 5.6: Localização dos pontos de amostragem de água para análise isotópica.

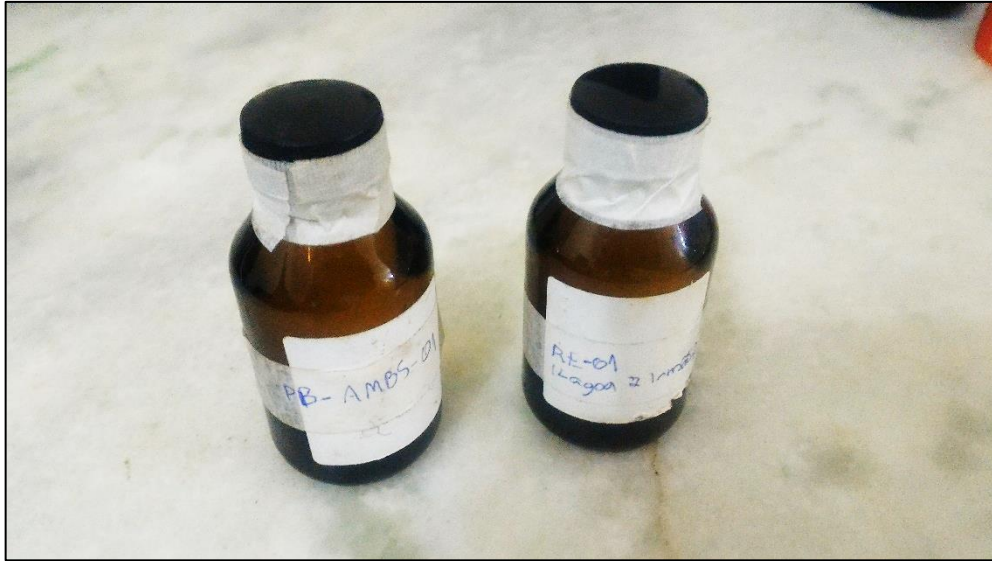


Figura 5.7: Frascos de vidro de borossilicato com capacidade de 50 mL, utilizados para coleta de amostras de água.

5.3. Modelo Conceitual

Um modelo conceitual preliminar foi desenvolvido a partir de conceitos adquiridos com a pesquisa bibliográfica e através da aquisição e interpretação de dados adquiridos. Suas premissas são a base do modelo matemático. Envolve caracterização geológica e hidrogeológica (definição dos sistemas aquíferos presentes), definição dos limites do modelo, condições de contorno e destaque dos principais elementos que atuam na dinâmica hídrica da área.

Para o desenvolvimento do modelo conceitual, foram usadas ferramentas como análise de dados de pluviometria, vazão e potenciométrica, análise de isótopos estáveis de águas de poços e superficiais e análise de testes de bombeamento. A metodologia de análise e interpretação está disposta a seguir.

5.3.1. Estimativa do fluxo de base

A análise e compreensão temporal do escoamento subterrâneo permite realizar inferências a respeito de ciclos hidrológicos naturais, variações climáticas e efeitos de exploração de águas subterrâneas. No que diz respeito a modelagem hidrogeológica, a quantificação do volume do escoamento subterrâneo fornece um importante parâmetro para a calibração do modelo (GONÇALVES, *et al.*, 2016). O cálculo/estimativa do fluxo de base é comumente realizado a partir de hidrogramas.

5.3.1.1. Hidrogramas

Um hidrograma é um gráfico que exhibe a variação de vazão de um rio em função do tempo. A água que flui em uma drenagem apresenta duas principais origens: fruto do escoamento superficial direto da água da chuva e do escoamento de base (descarga do aquífero no rio).

Durante um período seco (no excess precipitation), o hidrograma se torna decrescente, seguindo uma curva exponencial. Esse intervalo de tempo em que a vazão é composta essencialmente pelo escoamento de base é conhecido como período de recessão. A medida que o fluxo subterrâneo vai drenando água do aquífero, o nível de água vai decaindo e tende a zero. A duração desse período depende de características geológicas, pedológicas, topográficas e do padrão de drenagem da área. O período de recessão é similar de ano para ano e pode ser expresso pela equação 5.1, proposta por Linsley et al. (1975).

$$N = 0,827 * A^{0,2} \quad (5.1)$$

Onde:

N= Duração em dias do período de recessão;

A = área da bacia drenada (km²)

5.3.1.2. Separação de Hidrogramas

Existem uma série de métodos usados para o cálculo do fluxo de base a partir de hidrogramas. O método dos filtros digitais foi desenvolvido por Pettyjonh & Henning (1979). Os filtros digitais baseiam-se em equações matemáticas que realizam a análise gráfica do hidrograma a partir de um intervalo de tempo pré-definido, obtendo-se os pontos de menor vazão em cada intervalo; a curva do fluxo de base é dada pela união entre esses pontos. O intervalo de tempo para a análise do hidrograma depende do tempo de recessão (N), cuja fórmula é ilustrada pela equação 5.1.

Existem diversos *softwares* que utilizam a técnica dos filtros digitais para a quantificação do fluxo de base. Neste projeto, foi utilizado o BFI+ versão 3.0, da *HydroOffice*. Ele conta com 11 métodos diferentes de separação por filtros digitais.

O método utilizado no trabalho foi o dos mínimos locais. Ele verifica se o dia D(i), que representa a mediana do intervalo 2N*, apresenta a menor vazão observada ao longo do intervalo. Se confirmado, o valor é atribuído ao ponto; caso contrário, o valor não é considerado. O intervalo 2N* é movimentado dia a dia, analisando todo o hidrograma. Finalmente, une-se uma reta que passe

por todos os pontos de mínimos locais, separando os componentes escoamento superficial e fluxo de base (GONÇALVES, *et al.*, 2016).

5.3.2. Isótopos

A água é predominantemente composta por moléculas do tipo $^1\text{H}_2\text{ }^{16}\text{O}$, porém coexistem com elas moléculas menos abundantes como $^1\text{H } ^2\text{H } ^{16}\text{O}$ e $^1\text{H}_2\text{ }^{18}\text{O}$, compostas por isótopos pesados de O e H. Como cada tipo de molécula apresenta uma pressão de vapor diferente, durante as mudanças de fase da água, ocorre o que é conhecido como fracionamento isotópico. Este leva a composições isotópicas diferentes para cada fase, de maneira que a água desenvolve uma composição característica indicativa de sua fonte (CLARCK & FRITZ, 1997). O fracionamento é controlado pela diferença de massa dos isótopos e pela temperatura (FAURE & MENSING, 2005).

Como exemplo, durante a mudança de fase da água líquida para vapor, é tendência que a água líquida residual seja enriquecida em isótopos pesados, enquanto a fase gasosa se enriqueça em isótopos leves.

Visando unificar a forma de expressão dos dados e permitir a comparação de resultados, a AIEA estabeleceu o padrão internacional Vienna SMOW (*Standard Mean Ocean Water*). Consiste na composição isotópica média das águas oceânicas e foi preparada com amostras provenientes dos oceanos Atlântico, Pacífico e Índico. Dessa maneira, as composições passaram a serem expressas como desvios δ , positivos ou negativos, em partes por mil (‰). A equação (5.2) representa o descrito.

$$\delta_{amostra} = \frac{R_{amostra} - R_{SMOW}}{R_{SMOW}} \times 10^3 \text{ (‰)} \quad (5.2)$$

Onde:

$$R = \frac{\text{Isótopo pesado}}{\text{Isótopo leve}} \quad (5.3)$$

As análises de chuva ao redor do mundo permitiram também a identificação de uma relação geral entre as quantidades de deutério (D) e O^{18} , segundo a equação (5.4). Essa relação é conhecida como Linha Meteorica Mundial (LMM).

$$\delta D = 8\delta^{18}O + 10 \quad (5.4)$$

Apesar disso, a composição das chuvas varia localmente, a depender da distância em relação aos oceanos, da temperatura, da latitude, da altitude, da evaporação e do intercâmbio isotópico com o vapor atmosférico previamente existente. A comparação entre as assinaturas isotópicas da água de rios, lagos, chuva e águas subterrâneas permite a inferência da conexão entre o aquífero e algum corpo de água superficial, possibilitando considerações importantes ao modelo conceitual da área.

5.3.3. Interpretação de Testes de Bombeamento

Tal como descrito no tópico 5.2.2., testes de bombeamento são importantes ferramentas que, entre outras funções, determinam os parâmetros hidrodinâmicos de aquíferos a partir da relação rebaixamento x tempo a uma taxa de vazão bombeada constante.

A técnica de análise da derivativa foi desenvolvida por Bourdet *et al.* (1983), inicialmente popularizada na indústria do petróleo. No contexto de testes de bombeamento, um *diagnostic plot* é um gráfico de dispersão do rebaixamento e sua derivativa versus o tempo (equação 5.5), usualmente plotado em escala log-log ou semi-log.

$$\delta s / \delta \ln t \text{ vs } t \quad (5.5)$$

Bourdet *et al.* (1983) analisaram o comportamento da derivativa em uma grande quantidade de modelos conceituais clássicos de fluxo ao redor de poços. Fazendo isso eles evidenciaram algumas vantagens da análise da derivativa:

- O gráfico log da derivativa é muito sensível à súbitas variações de forma da curva de rebaixamento, o que permite a detecção de comportamentos difíceis de observar na curva original;
- A análise do *diagnostic plot* de um conjunto de dados facilita a determinação do modelo conceitual que melhor se encaixa ao comportamento do aquífero frente ao teste;
- Para alguns modelos, os valores da derivativa podem ser usados diretamente para a estimativa das propriedades do aquífero.

Alguns dos diagnostic plots associados a modelos conceituais específicos podem ser observados na figura 5.8.

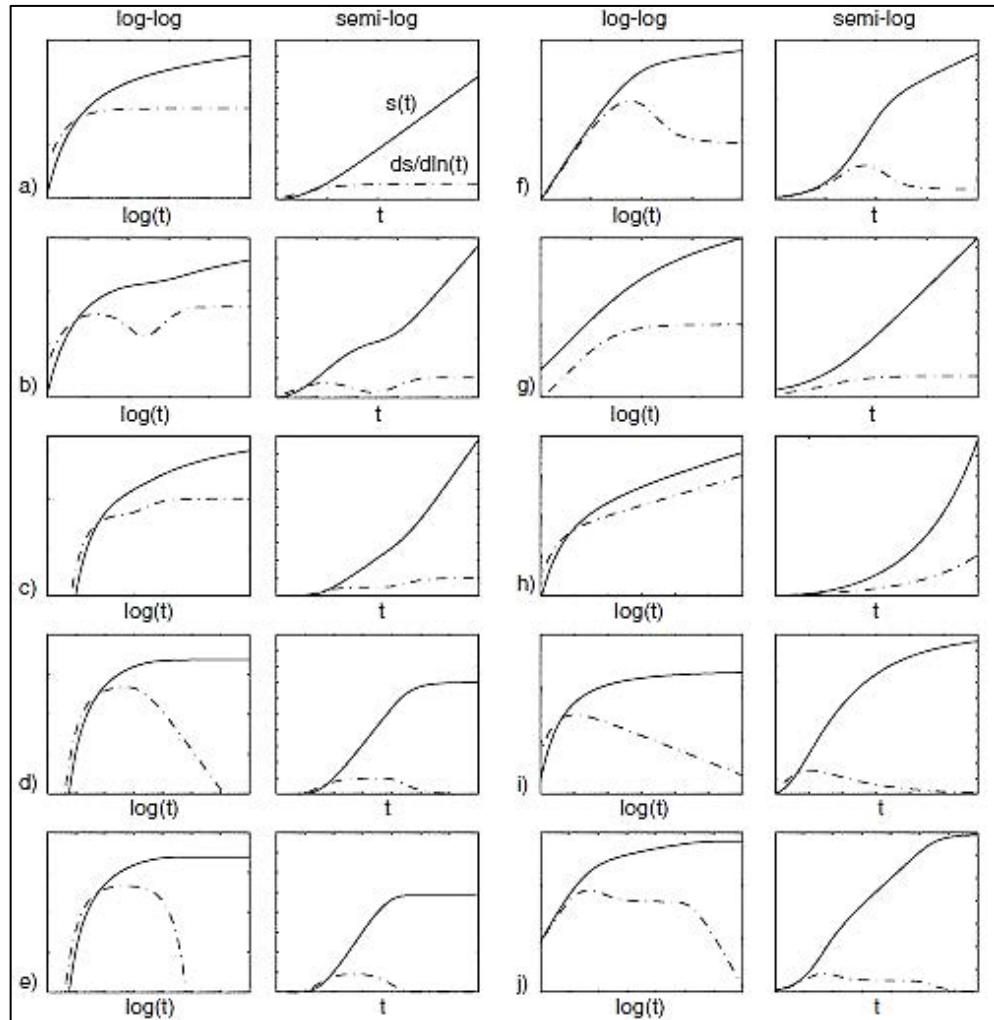


Figura 5.8: Típicos diagnostic plots encontrados em hidrogeologia: (a) Modelo de Theis: aquífero confinado bidimensional; (b) Dupla porosidade ou aquífero confinado; (c) Contorno linear infinito de não fluxo; (d) Contorno linear infinito de carga constante; (e) Aquífero drenante; (f) Efeito de armazenamento pela perfuração do poço e revestimento; (g) Fratura vertical de condutividade infinita; (h) Fluxo radial geral – fluxo menor que 2; (i) Fluxo radial geral – fluxo maior que 2; (j) Efeito combinado de armazenamento pela perfuração de poço e contorno linear infinito de carga constante. Modificado de Renard (2005b).

Para a interpretação dos testes de bombeamento realizados na área de estudo foi utilizado o programa *AQTESOLV for Windows*, versão 4.5, especializado na interpretação gráfica de testes de bombeamento em modelos de aquíferos fraturados, livres, confinados e drenantes, com a ferramenta de análise de derivativa embutida.

5.4. Modelo Geológico

Um modelo hidrogeológico de qualidade deve ser coerente com a geologia da área que representa. Portanto é imprescindível uma boa caracterização dos litotipos presentes, buscar

identificar como se comportarão no contexto hídrico da área e mapeá-los da melhor forma possível frente a escala de trabalho escolhida.

Como base do modelo hidrogeológico numérico, foi desenvolvido um modelo geológico no *software* Leapfrog, versão 4.2. Uma das grandes vantagens desse programa é a sua extensão *Hydro*, que se comunica com os principais softwares de modelagem hidrogeológica permitindo tanto a importação quanto a exportação de grids para o MODFLOW e FEFLOW, baseado no modelo geológico construído. Isso fornece flexibilidade na geração de um grid melhor adaptado a geologia.

O objetivo foi desenvolver um modelo regional que unificasse os três modelos fornecidos pela equipe de exploração mineral de Paracatu e o estendesse para oeste, onde escassas informações estavam disponíveis, porém seria interessante sua representação para o modelo hidrogeológico. Para isso foram utilizadas informações como mapa geológico da área, descrição de testemunhos de sondagem, topografia e geofísica.

5.4.1. Topografia

A topografia do modelo foi gerada a partir de informações do modelo digital do terreno com pixels de 30x30 m, obtido da ASTER (Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer) utilizando o *software Arcmap*, versão 10.4.1.

5.4.2. Geofísica

A equipe de exploração mineral da Nexa Resources realizou duas campanhas de levantamento de dados geoeletricos na área, em 2013 e 2016. Os métodos utilizados foram o de eletrorresistividade e polarização induzida, gerando perfis geofísicos com a técnica do imageamento elétrico. O arranjo utilizado nas campanhas foi Polo-Dipolo (PDP), com espaçamento de eletrodos A-MN de 50m e investigação de 10 níveis (cerca de 200 m de profundidade). Os dados foram analisados e processados pelo *software Oasis Montaj* da Geosoft.

As seções resultantes foram inseridas no Leapfrog para auxiliar na definição do topo rochoso e delimitação da zona do epicarste e do contato entre as Fms. Serra do Garrote e Morro do Calcário (Fig.5.9).

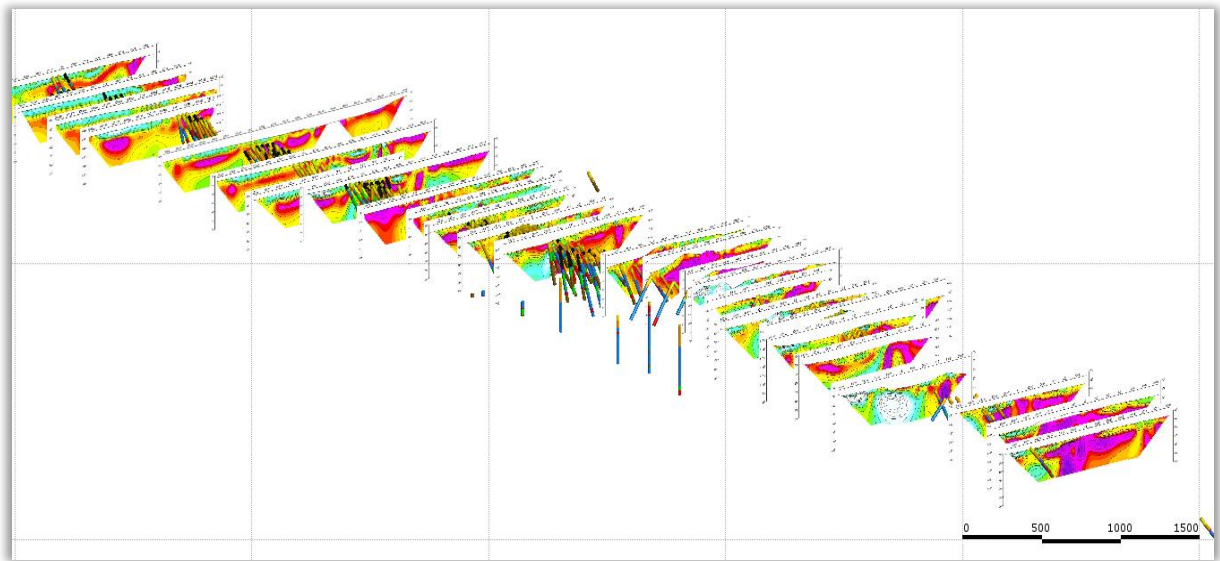


Figura 5.9: Seções geofísicas (resistividade e IP) inseridas no Leapfrog junto de furos de sonda para auxiliar na construção do modelo geológico.

5.4.3. Descrição Hidrogeológica de testemunhos

Planilhas com descrições de testemunhos de sondagem foram fornecidas pela equipe de exploração mineral da Nexa Resources, contendo dados de litologia e alteração com a profundidade de 624 perfurações. Também foram fornecidas fotos dos testemunhos.

A descrição litológica original não leva em conta a zona conhecida como epicarste, definida como porção superior do maciço rochoso em contato com o solo onde são encontradas a maior parte das cavidades. Sua identificação é de grande importância hidrogeológica, já que essa camada consiste na unidade com maior condutividade hidráulica da área. Para sua delimitação foram analisados alguns testemunhos de sondagem e consultadas as fotos de todos. Foram considerados epicarste os intervalos que continham as seguintes características:

- Trechos de fendas (porções não recuperadas) e blocos de dolomito intercalados, numa profundidade de cerca de 40 a 80m;
- Camadas de margas intemperizadas que aparecem em contato com solo, seguidas de trechos de fendas e blocos no domínio da Fm. Morro do Calcário;
- Camadas de filito intemperizado numa profundidade de cerca de 40 a 80m no domínio da Fm. Morro do Calcário;
- Dolomitos contendo feições de carstificação, como sulcos, descontinuidades rugosas e sedimentos argilosos de coloração amarelada, associados ou não a trechos não recuperados.

Foram geradas tabelas de collar, survey e lito dos furos para sua inserção no Leapfrog como *drillholes* (Fig. 5.10). A geração das superfícies e volumes das camadas foi feita juntando as informações de contatos oferecidos pelas sondagens, as superfícies já desenvolvidas nos modelos geológicos dos projetos, contatos em superfície fornecidos pelo mapa geológico e polilinhas geradas a partir da interpretação das seções geofísicas. Em maiores profundidades, foram geradas polilinhas com base em perfis teóricos regionais (DARDENNE et al, 1998a; DARDENNE, 2000; MONTEIRO, 2002).

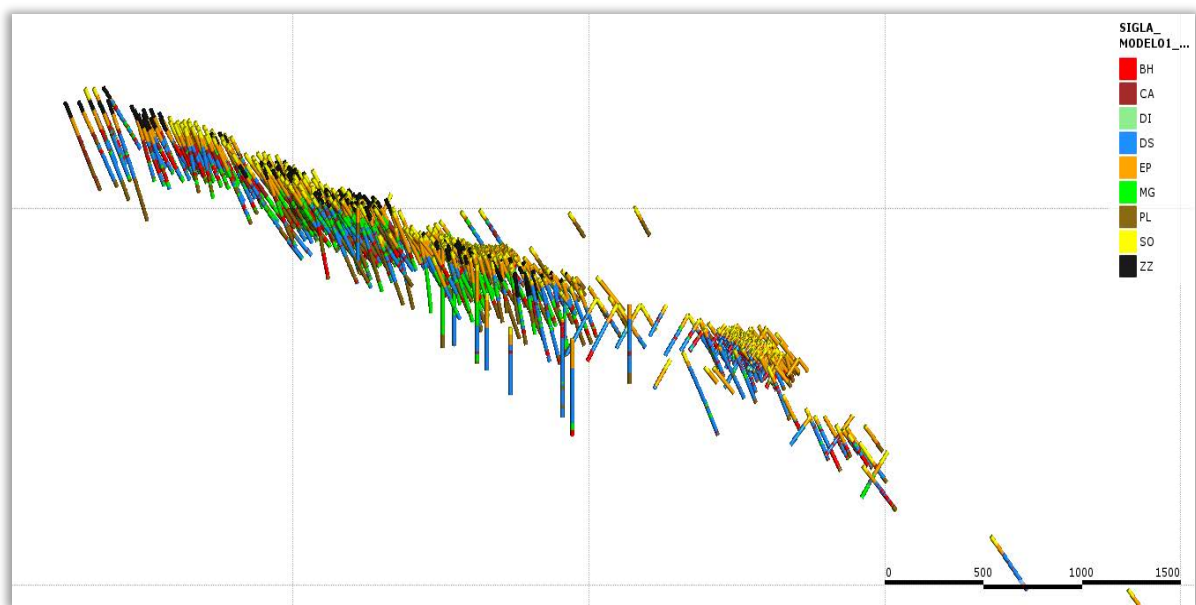


Figura 5.10: Descrição de testemunhos de sondagem adaptada inserida no Leapfrog como drillholes.

As siglas da legenda identificam as unidades do modelo geológico: BH (vermelho) = brecha hidrotermal; CA (vermelho escuro) = cavidades; DI (verde claro) = diamictito; DS (azul) = dolomito são; EP (laranja) = epicarste; MG (verde) = marga; PL (marrom) = rochas pelíticas; SO (amarelo) = solo/material superficial; ZZ (preto) = amostra destruída

5.5. Modelo Matemático

No próprio *software* Leapfrog, extensão Hydro, foi iniciado o design do modelo numérico computacional com base no método dos elementos finitos. Primeiramente foi construído um grid 2D e depois gerado o grid 3D a partir das camadas do modelo geológico.

O grid 3D foi exportado para o *software* FEFLOW® (DHI) para então serem inseridos os parâmetros hidrogeológicos iniciais do modelo. Foi adquirida licença via internet junto a DHI, que fornece incentivo ao desenvolvimento de projetos acadêmicos.

5.6. Calibração

Nessa etapa, é realizada a calibração e verificação do modelo gerado com base nas informações de campo adquiridas anteriormente. São alterados os parâmetros iniciais até que se obtenha um erro aceitável em relação aos dados monitorados. O valor de NRMS (*Normalized Root Mean Square*) considerado aceitável pela Agência Norte Americana de Meio Ambiente (EPA) é de até 10%. Importante destacar que os parâmetros devem ser alterados mantendo as premissas do modelo conceitual. Se a calibração não ocorrer, deve-se retornar a etapa anterior e rever os conceitos assumidos.

5.7. Análise de Sensibilidade

Essa etapa consiste na realimentação do modelo com parâmetros de entrada, avaliando-se o grau de dependência dos resultados e definindo os parâmetros com maior peso.

5.8. Análise e Discussão dos Resultados

Realizada análise dos resultados obtidos com o modelo, como os valores de condutividade e recarga obtidos com a calibração, mapa potenciométrico simulado e balanço hídrico da região. O modelo conceitual é revisitado, comparando-se com os resultados obtidos.

6. ANÁLISE DE DADOS

6.1. Nível de água

Como descrito no tópico 5.2.3 deste relatório, foram obtidos dados de um total de 84 instrumentos. Uma análise inicial permite distinguir os dados de NA para os três projetos da área de estudo. O gráfico da Fig. 6.1 diferencia o monitoramento do NA em piezômetros para cada projeto.

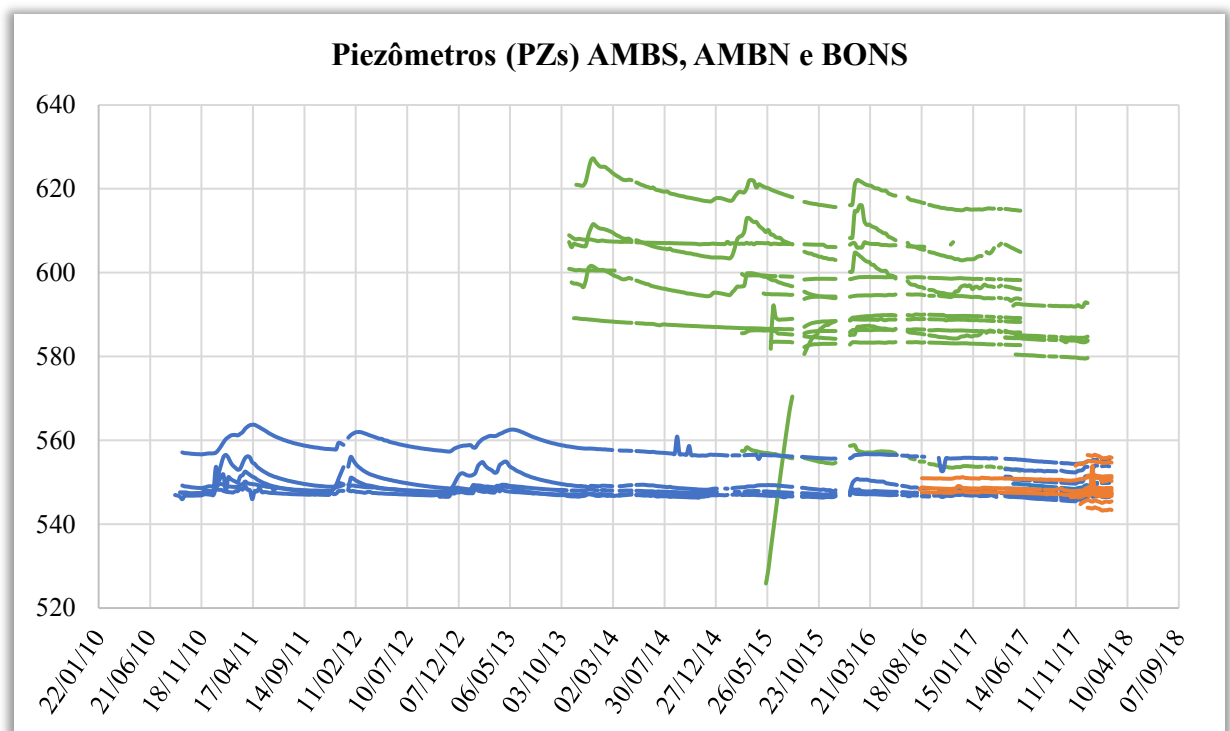


Figura 6.1: Evolução do nível d'água monitorado em piezômetros nos projetos Ambrósia Norte (Azul); Ambrósia Sul (Verde); e Bonsucesso (Laranja). Destaque para o nível mais elevado de Ambrósia Sul em relação aos demais empreendimentos que se localizam mais próximos aos rios Santa Rita e São Pedro.

Pode-se notar que os níveis de água em Ambrósia Sul são mais elevados que nos projetos de Ambrósia Norte e Bonsucesso, que se localizam mais próximos dos rios Santa Rita e São Pedro. O monitoramento de AMBN é o mais antigo, tendo se iniciado em 2010. Os trabalhos de monitoramento de AMBS se iniciaram em 2013, enquanto o projeto Bonsucesso, mais novo, é monitorado desde a segunda metade de 2016.

A seguir são expostos alguns gráficos de evolução do NA para indicadores de nível de água e piezômetros. A figura 6.2 se refere aos NAs monitorados em indicadores de nível de água (INAs). Esses instrumentos tem o objetivo de monitorar o aquífero raso da área (poroso,

sedimentos recentes que recobrem o maciço rochoso). As figuras 6.3 a 6.4 exibem a variação do NA em piezômetros. Estes instrumentos são construídos de maneira a isolar a influência do aquífero raso, possuindo entradas de água apenas provenientes do maciço rochoso abaixo (aquífero profundo).

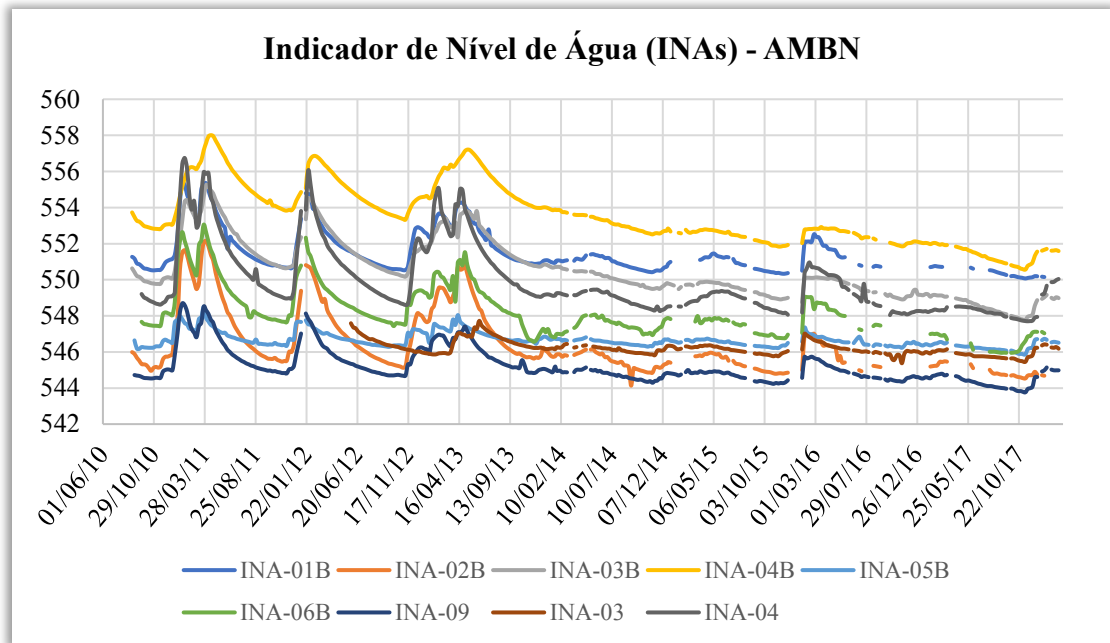


Figura 6.2: Evolução do NA monitorado nos indicadores de nível d'água de Ambrósia Norte.

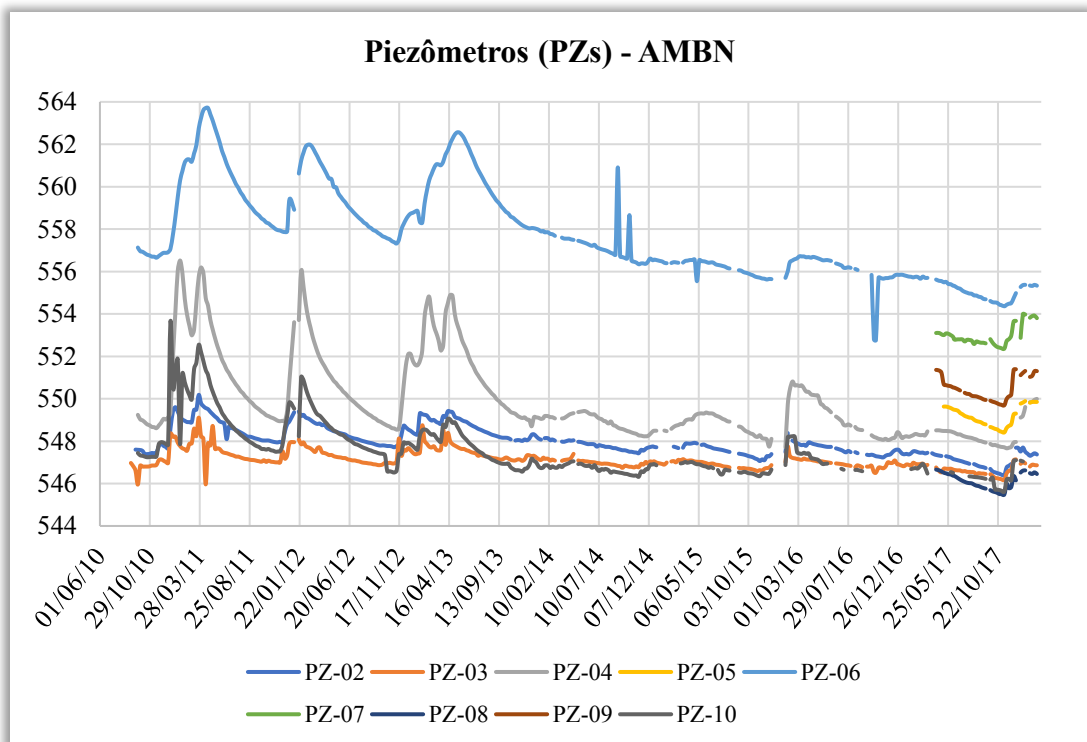


Figura 6.3: Evolução do NA monitorado nos piezômetros de Ambrósia Norte.

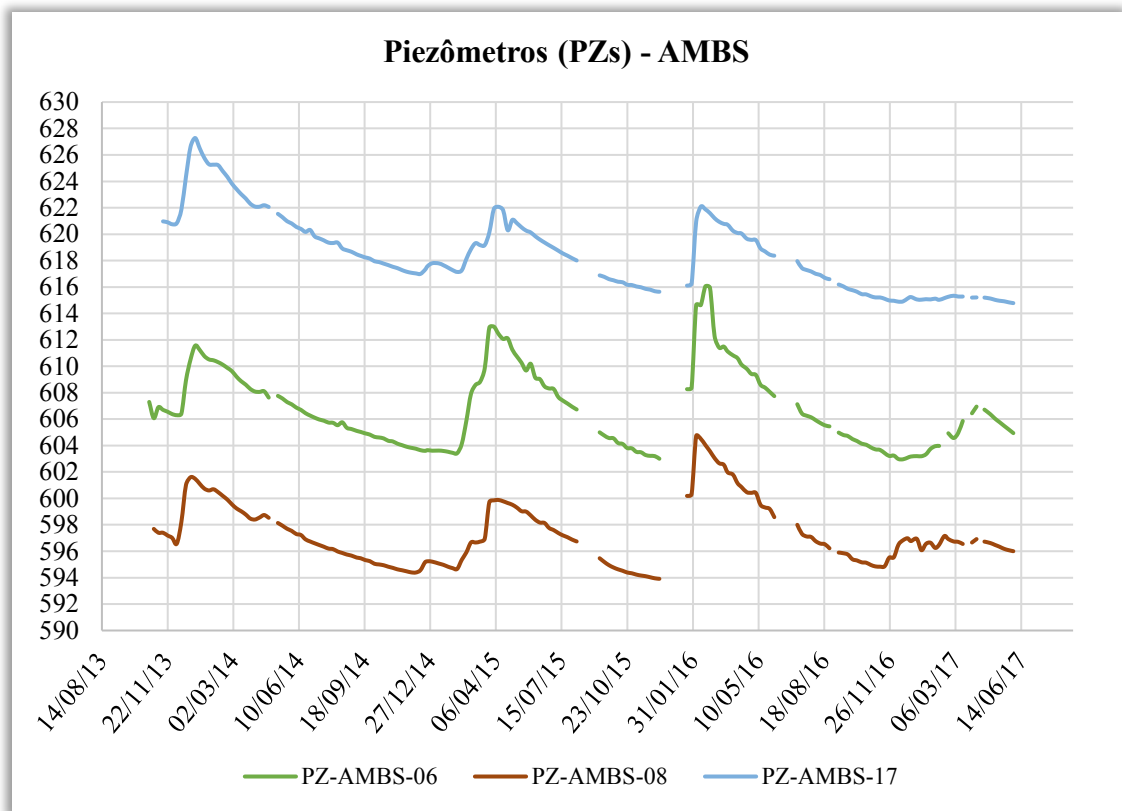


Figura 6.4: Evolução do NA monitorado nos piezômetros de Ambrósia Sul.

A análise dos gráficos apresentados possibilita algumas interpretações:

1. Pode-se observar que o NA apresenta uma tendência de declínio desde o início do monitoramento;
2. Principalmente nos gráficos referentes a AMBN (figs. 6.2 e 6.3), percebe-se que a partir do final de 2013 o comportamento do NA se altera drasticamente. Não apenas os níveis são mais baixos, como também seus picos são bem mais suaves;
3. Em Ambrósia Norte, pode-se observar uma variação do NA no período chuvoso de até 7 metros antes do ano de 2014 (maior pluviosidade) – Figs. 6.2 e 6.3. Em Ambrósia Sul, a variação é ainda mais intensa, se mantendo inclusive para o atual ciclo de seca da região, de 2013 até hoje. Essa variação chega a 13 m no caso do PZ-AMBS-06, no período chuvoso de 2016.

A seguir, é exibido o gráfico de variação do NA em poços de bombeamento de Ambrósia Norte (Fig. 6.5)

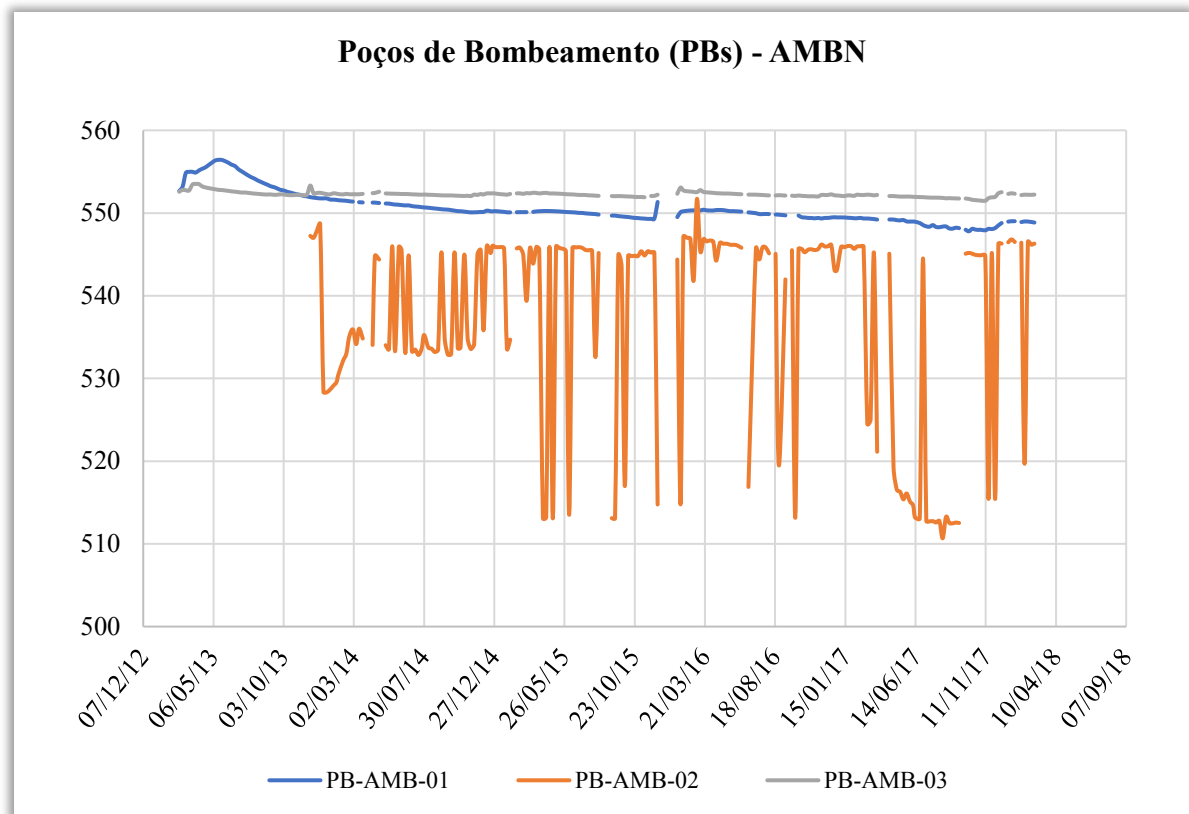


Figura 6.5: Evolução do NA monitorado nos poços de bombeamento de Ambrósia Norte.

A análise da variação do NA nos poços de bombeamento permitiu identificar quais poços estão em atividade na área. A figura 6.5 evidencia bruscas e intensas variações de NA no PB-AMBN-02, variando de 510 m (ligado) a 540 m (desligado). Ele é utilizado para abastecimento da unidade administrativa, bombeando cerca de 17 m³/h. O poço PB-AMBN-01 também se mantém em atividade e bombeia cerca de 15 m³/h, sendo utilizado para o consumo na unidade administrativa de AMBN.

6.2. Pluviometria

A pluviometria tomada como base para o modelo considera os dados obtidos por dois pluviômetros: de 1983 a agosto de 2009 foram utilizados os dados do pluviômetro da ANA, situado a norte dos empreendimentos; de setembro 2010 até hoje são obtidos os dados do pluviômetro localizado na porção central da área, pertencente ao projeto Ambrósia Norte. A figura 6.6 exibe um gráfico de colunas que ilustra a variação do volume de chuva precipitado nos diferentes anos hidrológicos.

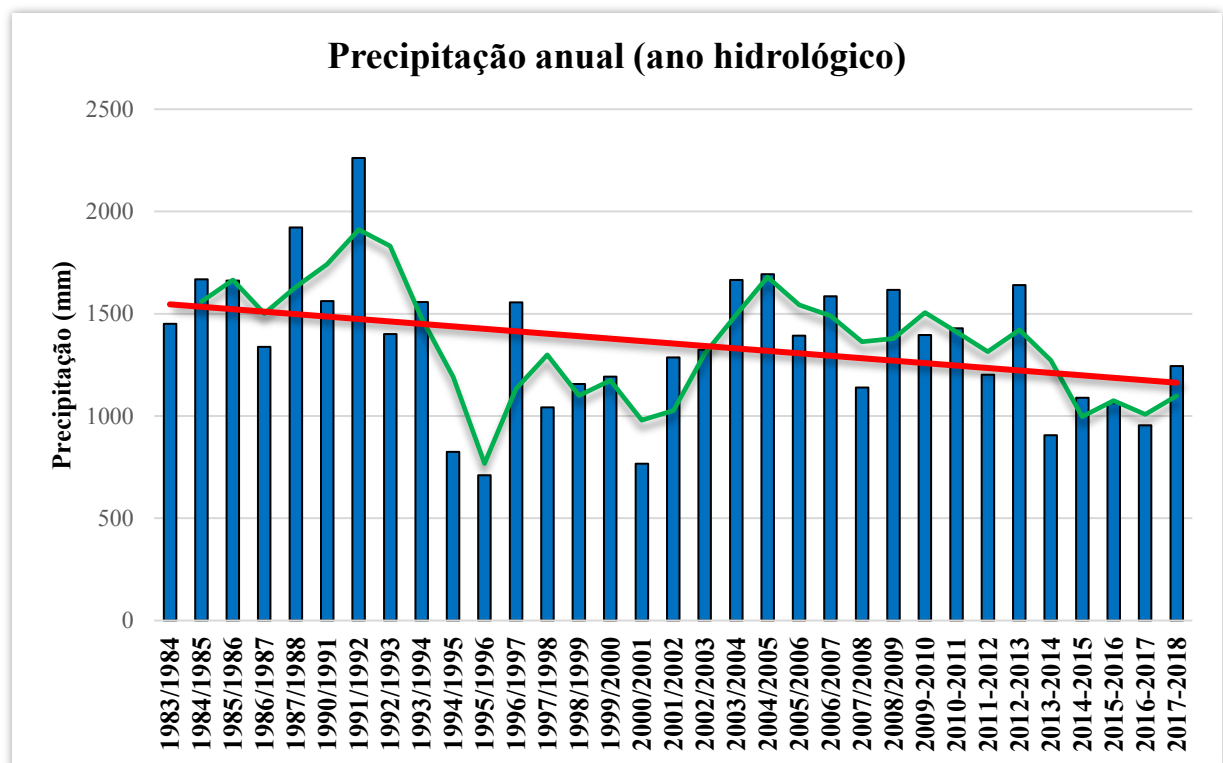


Figura 6.6: Variação da pluviometria com o ano hidrológico. Linha vermelha consiste na linha de tendência linear dos dados. Linha em verde consiste na média móvel.

A linha de tendência linear dos dados deixa claro que o volume de chuva vem diminuindo ao longo dos 35 anos de monitoramento. É possível perceber também a ocorrência de ciclos com maior ou menor precipitação. De 1994 a 2001, a região passou por um período de escassez pluviométrica, chegando a somar apenas 710,5 mm no ano de 1995/1996. Atualmente passamos por um período de seca similar, ainda que menos intenso.

6.3. Vazão e estimativa de recarga

Foram fornecidos dados de monitoramento diário do rio Santa Rita, obtidos por meio de régua linimétrica e geração de curva-chave. A figura 6.7 exibe o gráfico de variação da vazão diária de dez anos de monitoramento.

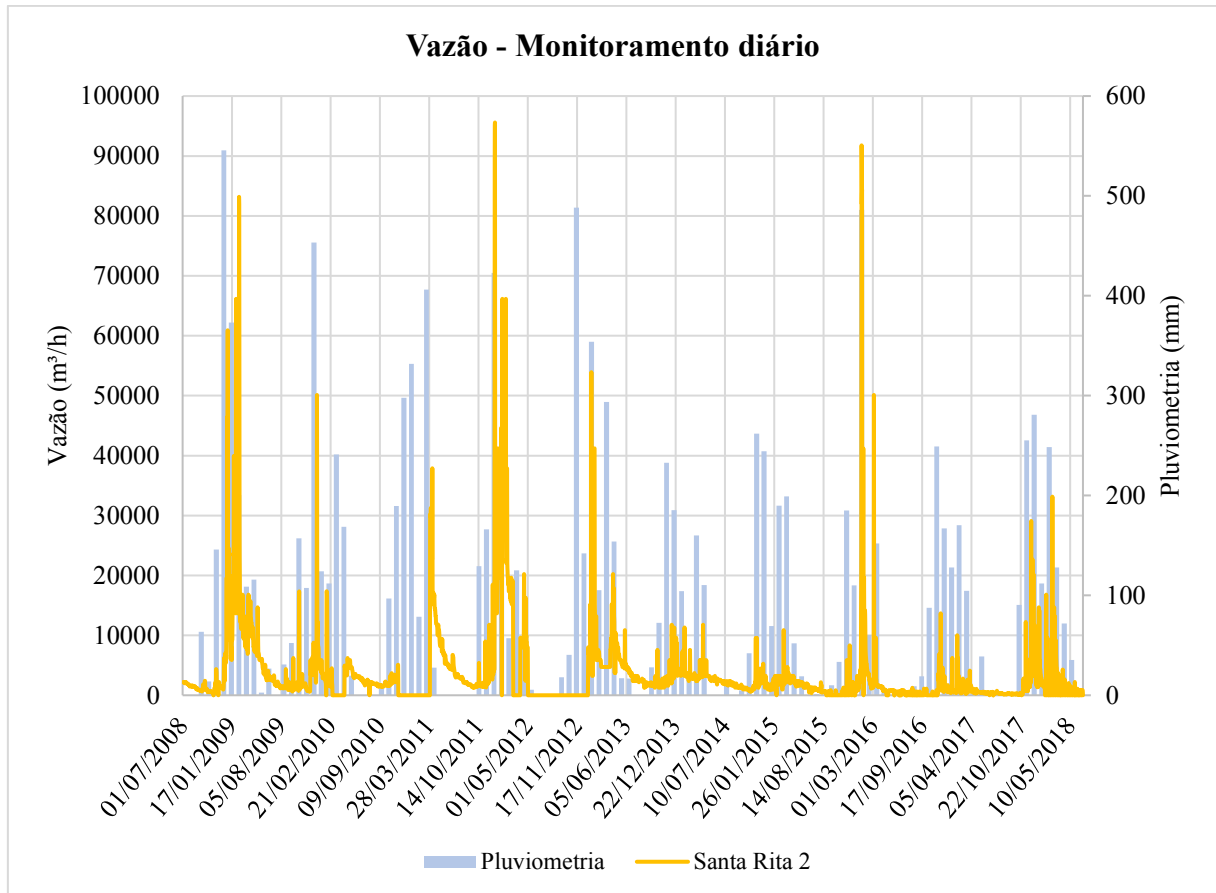


Figura 6.7: Variação diária da vazão em ponto de monitoramento do rio Santa Rita e comparação com as variações de chuva mensal.

A análise do gráfico permite identificar um comportamento cíclico na escala anual, que corresponde a variação da vazão conforme os períodos secos e chuvosos do ano. No período seco, apenas o escoamento de base do aquífero abastece o rio, por isso a vazão é menor. De maneira geral, entre junho e novembro, pode-se considerar que a vazão do rio é igual a descarga do aquífero no mesmo. No período chuvoso, a água de precipitação se soma ao fluxo de base para gerar os picos de vazão das drenagens que chegam a ultrapassar 90.000 m³/h.

A análise do gráfico exibe uma tendência de declínio da vazão a partir de 2013. Esse intervalo está inserido no atual período de escassez pluviométrica.

Para o cálculo do fluxo de base, foi delimitada a sub-bacia do ponto de medição da vazão, definindo sua área de drenagem. A figura 6.8 ilustra a sub-bacia delimitada a partir de modelo digital do terreno com pixels de 30x30 m, obtido da ASTER (Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer) utilizando o software *Arcmap*, versão 10.4.1.

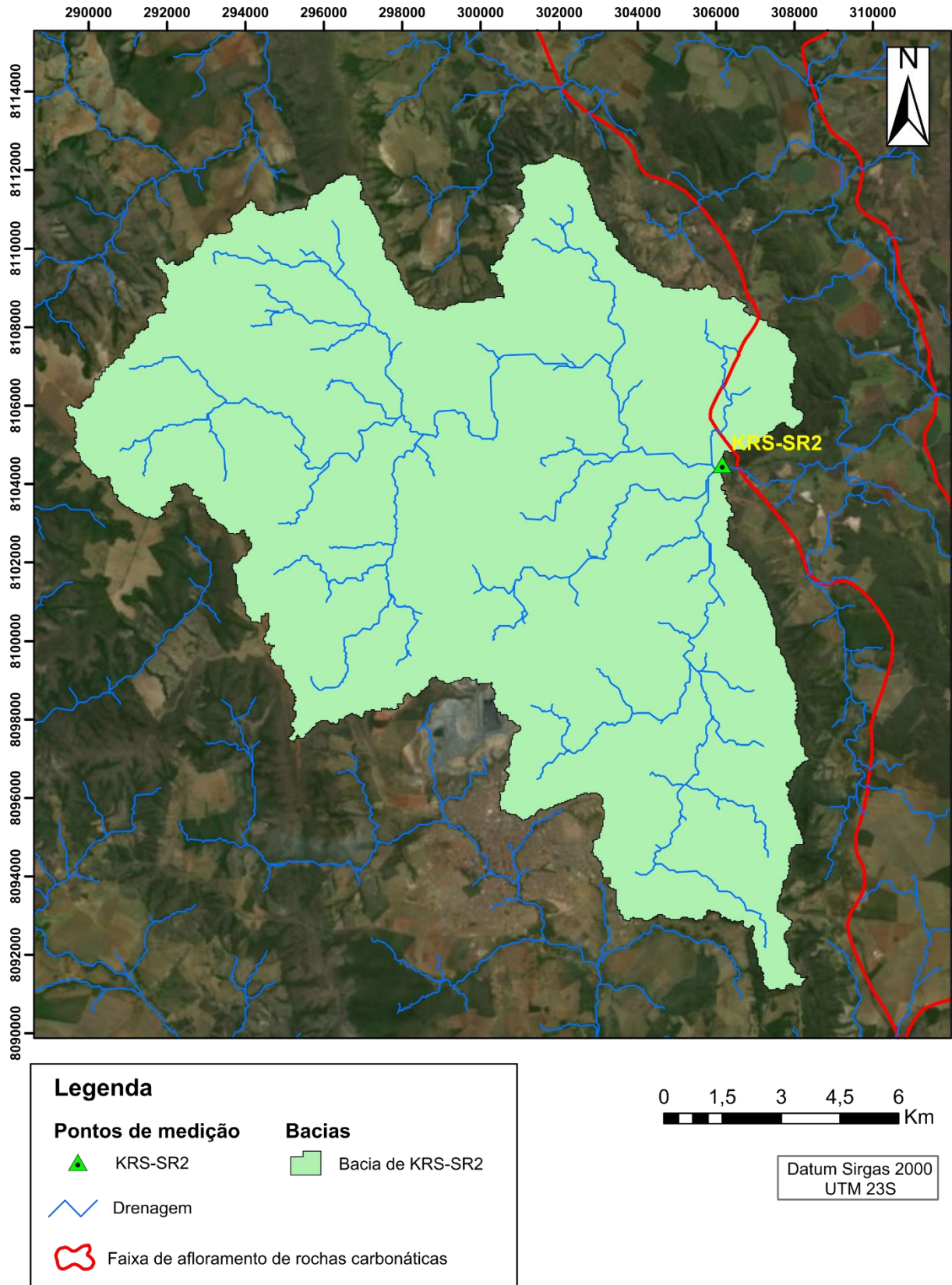


Figura 6.8: Sub-bacia delimitada para o ponto de medição de vazão KRS-SR2 que abrange principalmente uma área de afloramento de filito.

Identificada a área da sub-bacia, foi calculado seu período de recessão (N) utilizando a equação 5.1. A sub-bacia em análise consiste na área de afloramento de filito das Fms. Lapa e Landim, apresenta cerca de 210 Km² e seu N calculado é igual a 2,41 dias.

Com base no método dos filtros digitais, utilizando o programa BFI+ e a técnica dos Mínimos Locais (ML) foi separado o fluxo de base do hidrograma da estação, como mostra a figura 6.9.

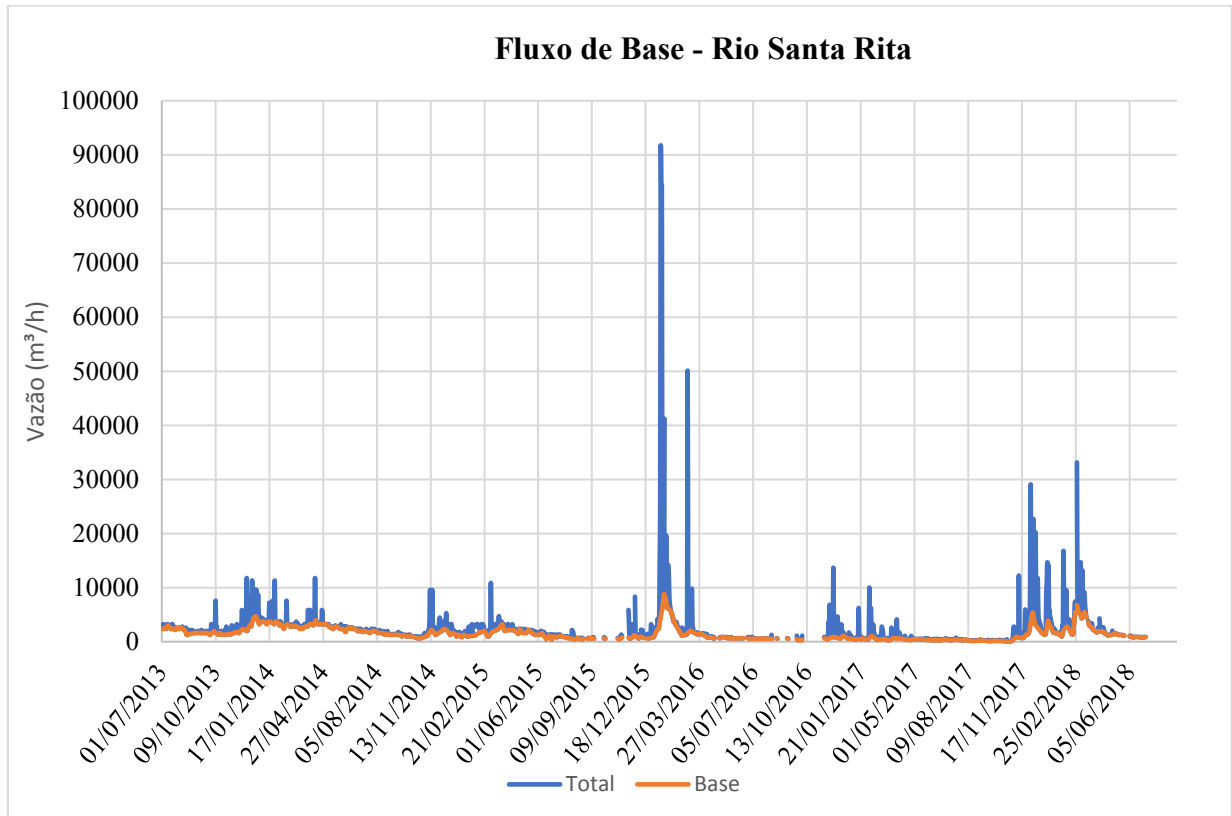


Figura 6.9: Delimitação da vazão do fluxo de base a partir da separação de hidrograma pelo método dos filtros digitais.

A tabela 6.1 exibe a média mensal da vazão do fluxo de base de julho de 2013 a junho de 2018, resultantes da análise realizada no *software* citado.

Tabela 6.1: Valores de média mensal de vazão calculados a partir dos resultados obtidos do *software* BFI+.

Rio/Ponto de medição	Ano	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez	Média Anual (m³/h)
Santa Rita 2	2013	-	-	-	-	-	-	2471.40	1849.50	1563.96	1475.32	1701.20	3264.40	2054.30
	2014	3559.89	2992.01	2701.26	3307.40	2710.36	2298.64	1888.08	1530.60	1188.71	804.90	1497.15	1757.77	2186.40
	2015	1055.99	1520.54	2152.98	2022.60	1632.93	993.13	837.92	512.46	-	536.61	798.06	713.36	1161.51
	2016	4522.68	2847.40	1582.44	889.46	699.58	613.36	541.40	544.07	388.38	302.67	640.45	747.94	1193.32
	2017	491.57	590.46	479.11	436.67	395.28	289.83	293.80	201.09	148.89	106.42	909.47	2706.37	587.41
	2018	2077.17	2960.78	4082.87	1640.92	1262.08	846.92	-	-	-	-	-	-	2145.12
	Média Mensal (m³/h)	2307.94	2256.27	2427.12	2665.00	2171.65	1645.88	1732.47	1297.52	1376.33	938.95	1332.14	1911.85	N = 2,41

A partir dos dados obtidos foi desenvolvida a tabela 6.2, com os cálculos da porcentagem do volume do fluxo de base anual em relação ao total precipitado na área da sub-bacia.

Tabela 6.2: Tabela de cálculo da porcentagem do fluxo de base em relação à chuva anual.

Ano Hidrológico	BF (m³/a)	Precip. anual (mm)	Área (m²)	V precip. (m³)	% Chuva
2013-14	20872374.00	906.4	210020181.2	190362292.2	10.96%
2014-15	11198208.24	1088.8	210020181.2	228669973.3	4.90%
2015-16	10822957.32	1062.1	210020181.2	223062434.5	4.85%
2016-17	3630141.24	953.9	210020181.2	200338250.9	1.81%
2017-18	12504601.92	1222.3	210020181.2	256707667.5	4.87%

Se considerarmos um regime permanente, onde não ocorre variação das cargas hidráulicas, pode-se definir que a água que sai do aquífero deve ser igual ao volume que entra.

$$\text{Entradas} - \text{Saídas} = \Delta S$$

Em regime permanente:

$$\text{Entradas} - \text{Saídas} = 0$$

$$\text{Entradas} = \text{Saídas}$$

Assumindo a premissa que a única saída de água do aquífero é a descarga de água para as drenagens da área, podemos considerar que o fluxo de base é igual a recarga do aquífero ou à taxa da chuva anual que infiltra e abastece o lençol freático.

$$\text{Fluxo de base} = \text{Recarga}$$

Portanto, com base nos cálculos realizados, foi definido valor de recarga para a área de afloramento do filito em relação a precipitação média anual dos últimos 3 anos (1034,2 mm/a). O valor foi fixado em 4%, que corresponde a 41 mm/ano.

Importante frisar que a premissa utilizada para o cálculo de recarga, em que a saída de água corresponde somente ao escoamento de base, não condiz com o modelo conceitual que será apresentado no capítulo 7. Existe também a componente de saída por poços de bombeamento, o que implica que a recarga calculada é subestimada. No entanto, interpreta-se que a componente de saída por poços apresenta impacto insignificante se comparada ao fluxo de base e por isso a estimativa pode ser utilizada.

6.4. Isótopos

Para as análises, foram realizadas coletas de amostras de chuva nos meses de fevereiro e abril de 2018, além de realizada amostragem em lagos, rios, surgências e poços presentes na área, como se observa na figura 5.8.

O resultado das análises isotópicas é exibido na tabela 6.3.

Tabela 6.3: Resultados das análises isotópicas para as diferentes amostras e cálculo dos pontos para a definição da linha meteórica mundial (LMM – azul escuro).

Identificação	δ H-2 ‰	δ O-18 ‰	LMM (H)	LMM (O)
RE-01	-24.5	-2.05	-6.4	-2.05
RE-02	-8.0	1.96	25.68	1.96
RE-03	-18.3	-0.05	9.6	-0.05
RE-06 A	-20.9	-0.76	3.92	-0.76
RE-06 B	-21.0	-1.04	1.68	-1.04
RE-07	-14.8	-0.15	8.8	-0.15
RE-05	-38.4	-5.63	-35.04	-5.63
Meandro Abandonado	-33.1	-4.93	-29.44	-4.93
Cava AMBS	-28.1	-4.15	-23.2	-4.15
PB-AMBN-01	-42.7	-7.10	-46.8	-7.10
PB-AMBN-02	-42.1	-6.99	-45.92	-6.99
PB-AMBS-01	-44.1	-7.47	-49.76	-7.47
Dreno AMBN	-39.6	-5.84	-36.72	-5.84
VM-NA-1	-43.2	-6.79	-44.32	-6.79
VM-NA-3	-14.3	-0.43	6.56	-0.43
VM-NA-6	-17.9	-1.99	-5.92	-1.99
PLUV AMBN-FEV18	-57.5	-8.27		
PLUV AMBS-FEV18	-62.2	-8.93		
PLUV AMBN-ABR18	-42.4	-7.02		
PLUV AMBS-ABR18	-38.3	-6.66		
Erro , ‰	1.20	0.40		

A análise de água da chuva (4 amostras) definiu uma linha de tendência para a composição isotópica da chuva local, cuja equação da reta é $y = 10.83x + 33.511$. O gráfico da figura 6.10 compara essa tendência com a reta da linha meteórica global ($y = 8x + 10$).

Pode-se perceber que as amostras dos poços coincidem com a assinatura isotópica da chuva local. Em contrapartida, as outras amostras coletadas (lagos, nascentes e água acumulada na cava da mina de Ambrósia Sul) exibem um desvio positivo em relação à essa composição.

Esse desvio positivo indica fracionamento da água. É comportamento típico de amostras susceptíveis à evaporação, coletadas em corpos de água superficiais, como lagos e drenagens. A reta tracejada em cor laranja (Fig. 6.21) é a linha de tendência da composição isotópica dos lagos e corresponde a linha de evaporação local. Sua equação da reta é $y = 3,75x - 16,44$.

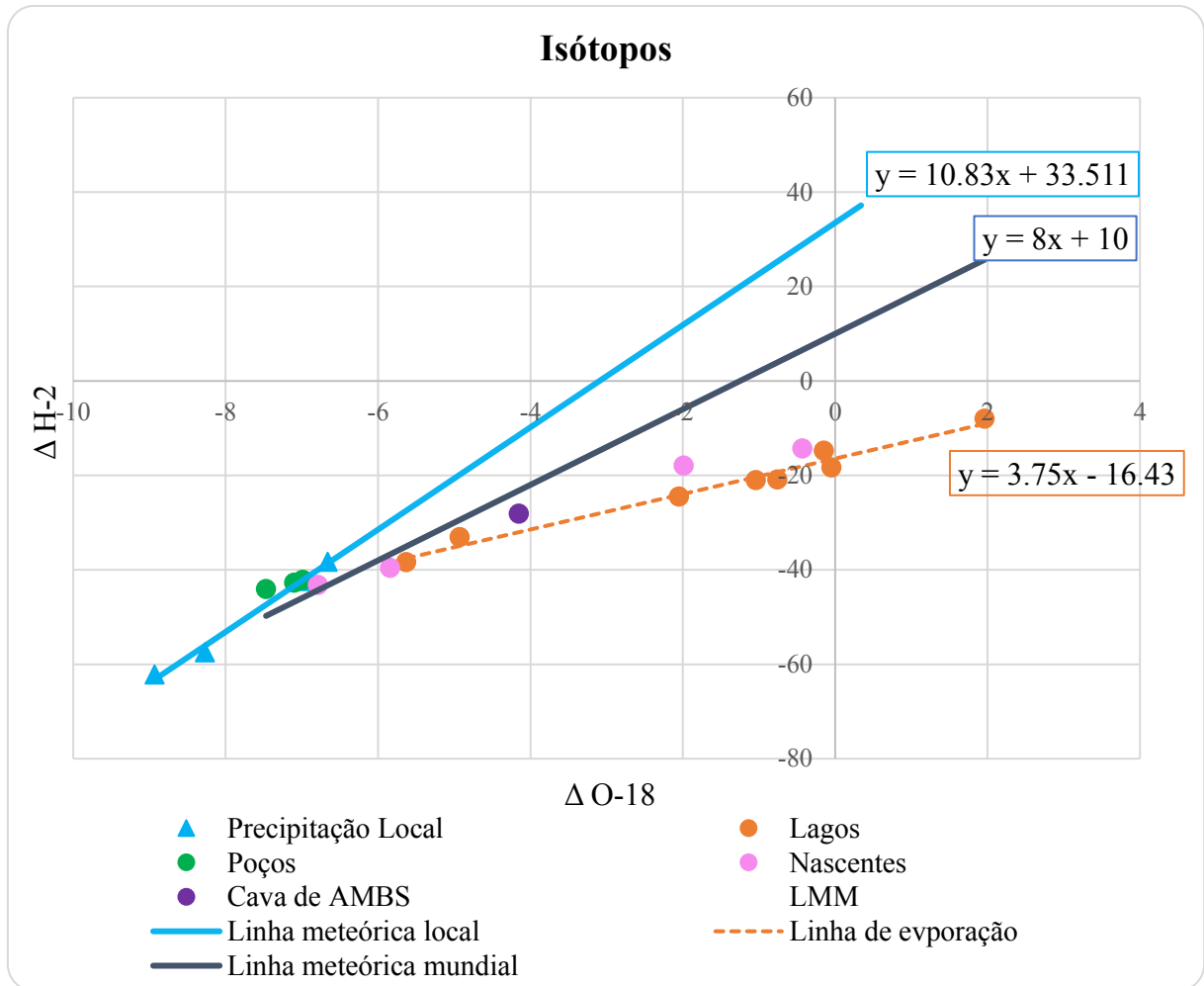


Figura 6.10: Gráfico exibindo a composição isotópica das amostras analisadas, a linha meteórica mundial (LMM) e a local.

6.5. Testes de bombeamento

Foi realizado um estudo superficial dos *plots* diagnósticos de cinco testes de bombeamento no *software* AQTESOLV for Windows, versão 4.5. A primeira etapa da análise consistiu na organização dos dados de vazão bombeada, rebaixamento e tempo, para a inserção no *software*. A seguir, foram comparadas as curvas geradas com os gráficos característicos de diferentes modelos conceituais sumarizados por Renard, *et al.* (2005b), expostos na figura 5.2 deste relatório.

Essa análise preliminar se fez importante para identificar modelos conceituais aplicáveis aos sistemas aquíferos da área, além de direcionar a calibração de curvas no *software*, para a definição de alguns parâmetros das unidades hidrogeológicas. Foram identificados, assim, valores de condutividade hidráulica aproximados para cada um dos testes de bombeamento, além da inferência do(s) modelo(s) conceitual(s) mais provável para cada unidade nas quais

foram realizados os testes. Em alguns casos também foram identificadas condições de contorno próximas aos testes de bombeamento. Cabe citar que não foram definidos valores de armazenamento pois é necessária a análise de rebaixamento em poços de observação para esse fim, o que não foi realizado.

No poço PB-AMBN-01 foi realizado um teste de 24 horas. As principais entradas de água no poço ocorrem através de fraturas presentes na zona do epicarste em dolomitos e na unidade de dolomitos não alterados. O poço foi bombeado a uma vazão média de 25,4 m³/h. A figura 6.11 ilustra a curva de rebaixamento resultante do teste.

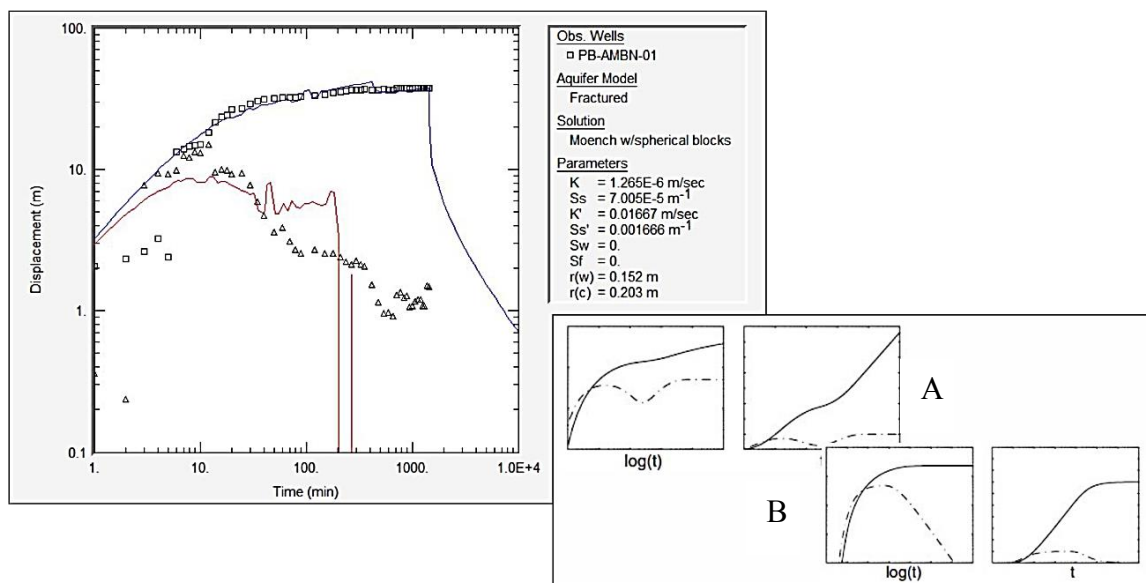


Figura 6.11: Plot diagnóstico do teste de bombeamento no poço PB-AMBN-01 e comparação com comportamento típico de modelos conceituais segundo Renard, et al. (2005b). (A) Modelo de dupla porosidade; (B) Comportamento para condição de contorno de carga constante próxima ao poço.

Não foi identificado um modelo conceitual característico para o teste em questão. Interpretou-se que o comportamento do rebaixamento se dá de forma a combinar um modelo de dupla porosidade associado a uma condição de contorno de carga constante (um rio que forneça água ao aquífero, por exemplo). A calibração da curva no AQT SOLV considerou o modelo de Moench de dupla porosidade (blocos esféricos) e forneceu um valor de K da ordem de 10⁻⁶ m/s (1,26E-6 m/s).

O teste realizado no PB-AMBN-02 também teve duração de 24 horas. As entradas de água correspondem a fraturas no interior da unidade de margá. A vazão média de bombeamento foi de 18,27 m³/h. A figura 6.12 ilustra a evolução do rebaixamento e recuperação do NA no poço.

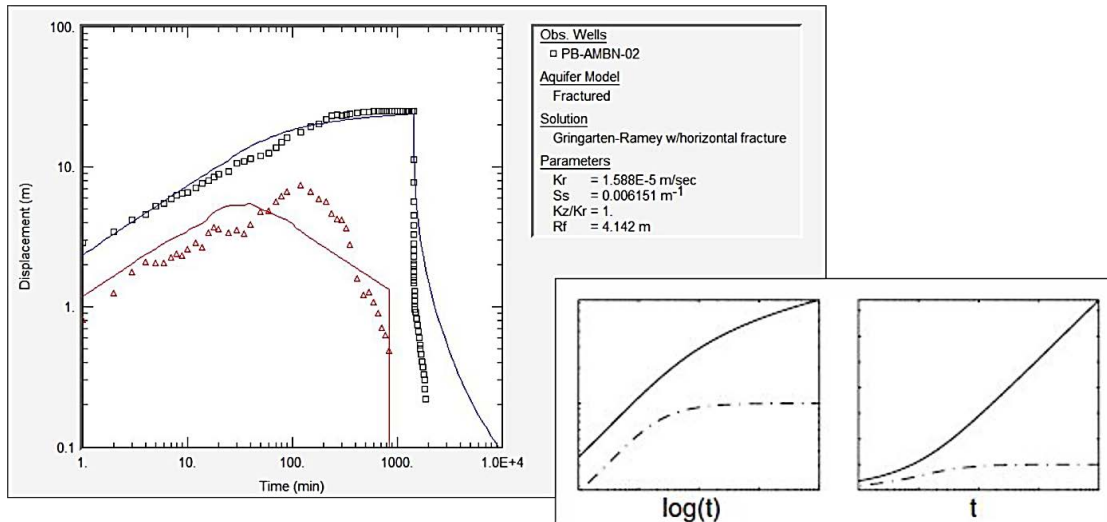


Figura 6.12: Plot diagnóstico do teste de bombeamento no poço PB-AMBN-02 e comparação com comportamento típico de modelo de fratura vertical/horizontal, segundo Renard, et al. (2005b).

A modelo conceitual que mais se aproxima do comportamento observado no teste é o de fratura vertical/horizontal. Destaca-se o comportamento da derivativa que não toca na curva do rebaixamento, único modelo em que isso é observado. A calibração no *software* foi realizada com o modelo de Gringarten-Ramey de fratura horizontal, caracterizando um K da ordem de 10^{-5} m/s (1,59E-5 m/s).

No PB-AMBN-03, o teste realizado também foi de 24 horas. As principais entradas de água do poço consistem em fraturas desenvolvidas no dolomito não alterado, abaixo das camadas de margas. O teste contou com uma vazão média de 84,64 m³/h. A figura 6.13 ilustra o rebaixamento ocorrido frente ao teste.

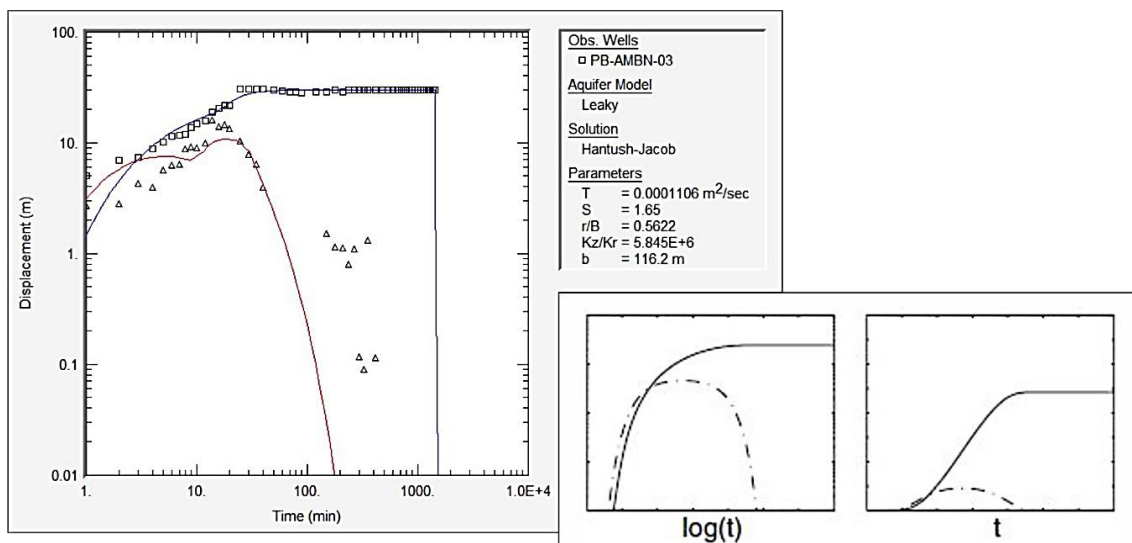


Figura 6.13: Plot diagnóstico do teste de bombeamento no poço PB-AMBN-03 e comparação com comportamento típico de modelo de aquífero confinado drenante, segundo Renard, et al. (2005b).

O modelo conceitual que mais se aproxima do comportamento da curva de rebaixamento é o de aquíferos confinados drenantes. Esse comportamento pode ser derivado do confinamento do aquífero dolomítico pelas camadas de marga sobrepostas a ele. A calibração da curva no AQT SOLV foi realizada utilizando a solução de Hantush-Jacob para aquíferos confinados drenantes, definindo um K da ordem de 10^{-7} m/s (9,98E-7 m/s).

Os testes realizados em Ambrósia Sul tiveram duração de 15 dias. Apesar disso, problemas nas bombas e oscilação de energia causaram a oscilação intensa da vazão, comprometendo parte do ensaio. Por esse motivo, foram considerados intervalos menores para a interpretação dos resultados.

No caso do poço PB-AMBS-01, foram utilizadas 55 horas de teste (2 dias e 7 horas). As entradas de água no poço correspondem a estruturas presentes na zona de epicarste desenvolvida sobre dolomitos. Importante citar que a perfuração do poço interceptou uma cavidade em profundidade (descontinuidade de 4 metros segundo relato do sondador). A vazão média do teste foi de 60,46 m³/h. A figura 6.14 ilustra o comportamento do rebaixamento do NA monitorado no poço.

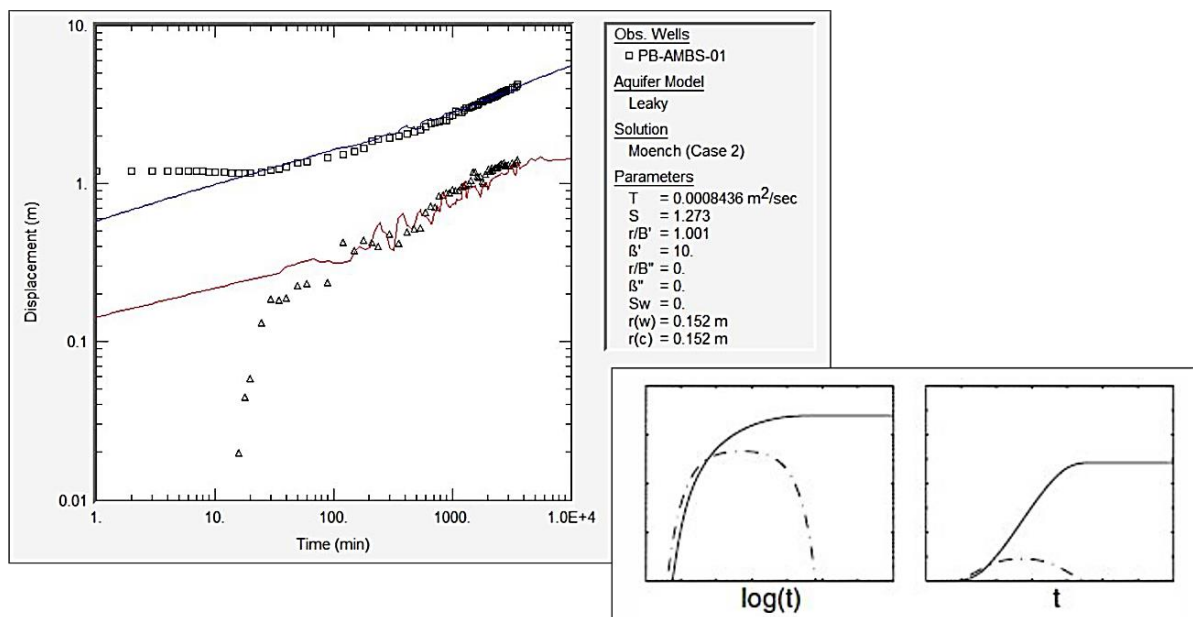


Figura 6.14: Plot diagnóstico do teste de bombeamento no poço PB-AMBS-01 e comparação com comportamento típico de modelo de aquífero confinado drenante, segundo Renard, et al. (2005b).

O início do teste exibe um comportamento de curva incomum que não foi reconhecido em nenhum dos plots diagnósticos dos modelos conceituais investigados por Renard, *et al.* (2005b). Esse fato pode estar associado a baixa confiabilidade do comportamento da curva no início de testes de bombeamento em geral, quando o ritmo de monitoramento é acelerado e

sujeito a erros de medição. O melhor modelo calibrado por tentativa e erro no AQT SOLV foi a solução de Moench para aquíferos confinados drenantes, apesar de a feição de curva característica desse modelo ser diferente do observado no teste em questão. A calibração forneceu um K da ordem de 10^{-5} m/s ($1,32E-5$ m/s).

Para o PB-AMBS-04, foram consideradas 59 horas (2 dias e 11 horas) de teste. As entradas de água do poço são provenientes de fraturas desenvolvidas nos filitos da Fm. Serra do Garrote. A vazão média do teste foi de $12,04$ m³/h. A figura 6.15 ilustra o rebaixamento do NA medido no poço do ensaio.

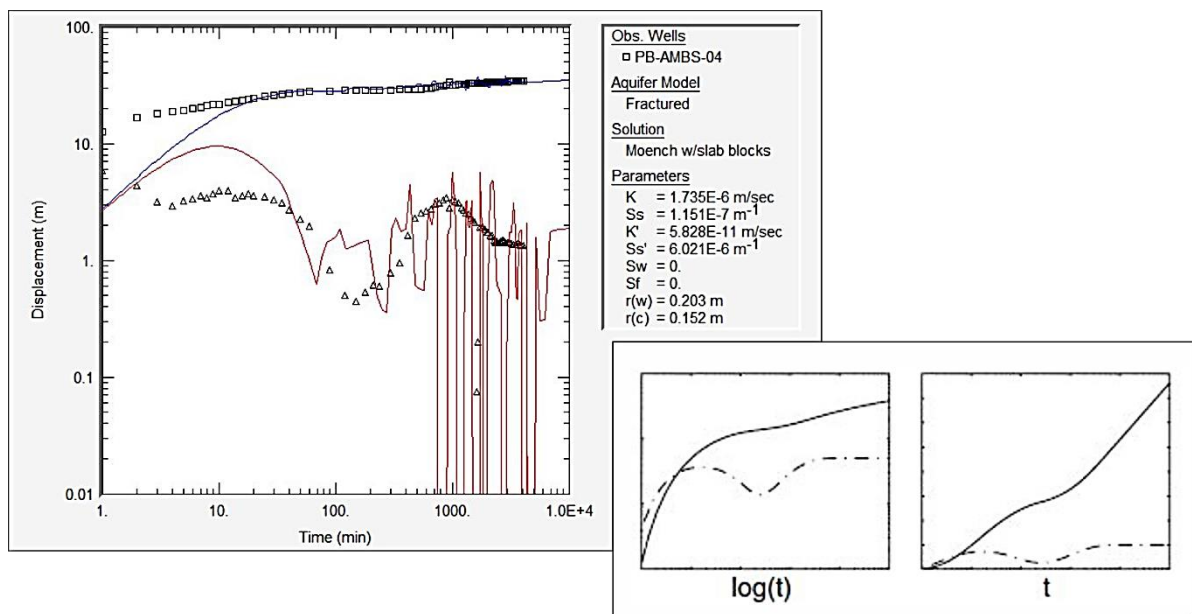


Figura 6.15: Plot diagnóstico do teste de bombeamento no poço PB-AMBS-04 e comparação com comportamento típico de modelo de dupla porosidade, segundo Renard, et al. (2005b).

A feição da curva de rebaixamento e principalmente de sua derivativa evidencia claramente um modelo de dupla porosidade. A calibração da curva no *software* foi realizada com a solução de Moench de dupla porosidade (blocos em placas), fornecendo um K da ordem de 10^{-6} m/s ($1,73E-6$ m/s).

A tabela 6.4 resume os resultados obtidos com a análise dos plots diagnósticos dos testes realizados.

A análise realizada foi superficial e a calibração das curvas não foi realizada de maneira ideal. A calibração de testes de bombeamento exige tempo e, como esse estudo não é o foco deste projeto, não foi dada prioridade a tal análise.

Tabela 6.4: Resumo das características dos poços e dos produtos obtidos pela análise dos testes de bombeamento.

Poços	Duração (h)	Vazão média (m ³ /h)	Litotipo/unidade	K (m/s)	Modelo/Condição de contorno
PB-AMBN-01	24	25,4	Epicarste em dol; dol são	1,26E-6	Dupla-porosidade; carga constante
PB-AMBN-02	24	18,27	Marga	1,59E-5	Fratura horizontal
PB-AMBN-03	24	84,64	Dol são	9,98E-7	Confinado drenante
PB-AMBS-01	55	60,46	Epicarste em dol	1,32E-5	Confinado drenante
PB-AMBS-04	59	12,04	Fm. Serra do Garrote	1,73E-6	Dupla-porosidade

Além disso, os dados produzidos pelos testes não foram os ideais. É importante para esse tipo de estudo que a vazão seja mantida constante, o que não foi o caso, levando a oscilações fortes na curva de derivativa, comprometendo sua calibração. Esse fato pode ser identificado pelas grandes variações da linha vermelha em todos os gráficos expostos anteriormente.

Importante destacar ainda que o AQT SOLV, tal como o artigo de Renard, *et al.* (2005b), não apresenta soluções próprias para modelos de aquíferos cársticos de tripla porosidade. As feições incomuns observadas nas análises podem ser comportamentos típicos desse tipo de modelo de aquífero ou a combinação de diferentes modelos distintos.

Apesar dessas ressalvas, as análises ofereceram um resultado interessante. Evidenciou-se que a área do projeto abrange um cenário hidrogeológico complexo e heterogêneo, sendo identificados diferentes modelos presentes na área: dupla-porosidade, fratura horizontal, confinado drenante, etc. Além disso, mesmo que a calibração não foi realizada de forma precisa, ao menos foram identificadas ordens de grandeza de condutividade hidráulica para as principais unidades do sistema hidrogeológico da área.

7. SIMULAÇÃO NUMÉRICA DE FLUXO

7.1. Modelo Conceitual

A partir dos dados de monitoramento hidrogeológico (piezometria, pluviometria e fluviometria), análise de testes de aquíferos, isótopos e dados geológicos (testemunhos de sondagem, seções geofísicas, modelos e mapas geológicos), é possível o desenvolvimento de um modelo conceitual para a área de estudo. Este modelo traz considerações em relação às unidades hidrogeológicas presentes, componentes do balanço hídrico e limites do modelo a serem considerados no modelo numérico.

7.1.1. Discussão dos resultados da análise de dados

Aquíferos cársticos são conhecidos por sua heterogeneidade, com variada distribuição de condutividades hidráulicas que abrangem diferentes ordens de grandeza (WHITE, 1977). Eles são caracterizados pela presença de três tipos de porosidades:

- Primária: matriz com fluxo laminar, maior armazenamento e menor transmissividade. Responsável pela recarga dos condutos e fraturas por meio de drenança. Quando se trata de rochas mais antigas, a condutividade tende a ser menor. O fato de os dolomitos da área serem proterozoicos e sofrerem metamorfismo de baixo grau sugere um K baixo;
- Secundária: fraturas presentes no maciço. Na área, as principais direções associadas são NE-SW a ENE-WSW e NW-SE a NNW-SSE. As estruturas hidrogeologicamente mais importantes são as NE, enquanto as NW estão associadas à mineralização e por isso constituem descontinuidades preenchidas. Apresenta fluxo laminar a turbulento;
- Terciária: Condutos e cavidades gerados pela dissolução dos calcários e dolomitos, também controlados pelas principais estruturas regionais. Apresenta fluxo turbulento, maior transmissividade e menor armazenamento.

Importante fator de estudo em aquíferos cársticos é a relação entre os condutos e as fraturas e/ou matriz. White (1977) evidencia um importante papel das chuvas nessa relação. Durante períodos secos, água proveniente da matriz e fraturas tendem a fluir para o sistema de condutos. No entanto, durante tempestades, os condutos são rapidamente preenchidos e o fluxo é revertido, partindo dos condutos para a matriz e fraturas. A figura 7.1 ilustra essa relação.

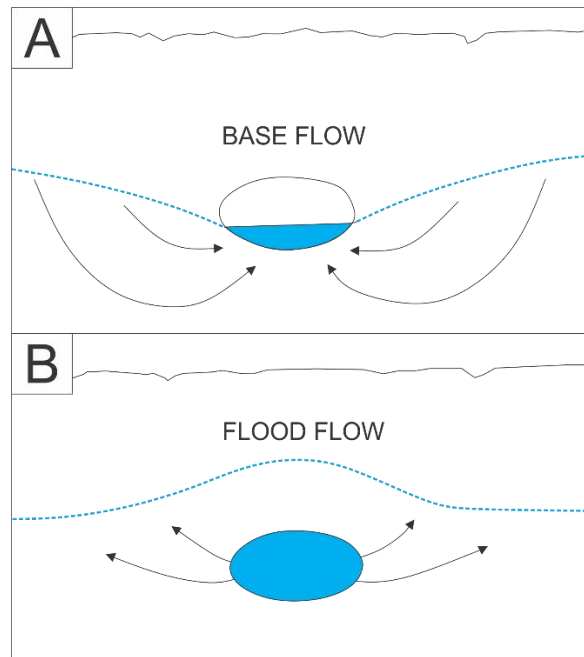


Figura 7.1: Modelo de White (1977) para a relação entre os condutos cársticos e a matriz e/ou fraturas do maciço rochoso. (A) representação de períodos secos, onde a matriz drena água para os condutos; (B) ilustração para os períodos chuvosos, onde os condutos são preenchidos e drenam fornecem água para a matriz.

O acompanhamento do monitoramento de piezômetros na região de Bonsucesso permitiu identificar uma resposta rápida do NA à chuva, com elevação da carga monitorada após cerca de 4 horas a partir do início da precipitação, mesmo com bombeamento em poços próximos.

As análises piezométricas nos projetos Ambrósia Norte e Sul, ilustradas pelas figuras 6.2, 6.3 e 6.4, evidenciaram variações consideráveis de carga hidráulica (até cerca de 13 m em alguns casos). Ambos os fatos descritos podem ser derivados do baixo armazenamento e elevada transmissividade característica dos condutos de aquíferos cársticos, o que permite a alta variabilidade do NA em poços conectados a esse sistema.

A rápida resposta do NA ainda pode estar associada a uma possível conexão do rio com os condutos. Durante as chuvas, a elevação da vazão dos rios poderia preencher rapidamente um conduto conectado e recarregar o aquífero.

No entanto, os dados de isótopos até então obtidos invalidam essa hipótese. O gráfico da figura 6.10 evidencia que a água subterrânea coletada em três poços é concordante com a assinatura isotópica da chuva e diverge daquela associada aos lagos, rios e nascentes da área. Esse comportamento é próprio de águas subterrâneas cuja fonte principal de recarga é diretamente a infiltração da precipitação, sem indícios de evaporação ou mistura com água superficial.

Os testes de bombeamento e análise de testemunhos permitiram uma melhor caracterização dos sistemas hidrogeológicos presentes na área, descritos no tópico a seguir.

7.1.2. Unidades Hidrogeológicas

- *Sistema Aquífero de Coberturas Detríticas*

Corresponde a um aquífero livre granular, composto por material de alteração das rochas dolomíticas e pelíticas, e material coluvionar. A partir da análise dos testemunhos de sondagem, define-se que apresenta em média 40 m, podendo chegar a até 70 m.

É encontrado bem desenvolvido sobre as rochas carbonáticas da Fm. Morro do Calcário e com menor espessura sobre os pelitos das Fms. Serra do Garrote e Lapa. Sua recarga se dá pela infiltração direta da precipitação sobre a área plana presente na maior parte da região.

- *Sistema Aquífero Carbonático*

O aquífero é caracterizado como cárstico-fissural livre a localmente confinado devido a presença de fácies pelíticas que se comportam como aquíferos. Esse comportamento é confirmado pela análise do teste de bombeamento do poço PB-AMBN-03 (Fig 6.13).

É composto pelas rochas dolomíticas da Fm. Morro do Calcário. Apresenta importante variação de condutividade hidráulica com a profundidade. Pode ser dividido em uma zona mais superficial, onde o fraturamento e dissolução das rochas é mais desenvolvido, denotando maior condutividade hidráulica (Epi e endocarste); e uma zona profunda, com baixa carstificação e com uma permeabilidade menor.

A carstificação na zona superficial é variável. Em determinadas porções se mostra mais profunda, podendo chegar a 200 m, em outras se mostra mais rasa, com uma profundidade de 20 a 30 m. Profundidades intermediárias, de 40 a 70 m são comuns. Essa zona se caracteriza por presença de matriz carstificada; condutos; fraturas; e cavidades chegando a mais de 15m.

A zona mais profunda é caracterizada por dolomitos pouco alterados e resistentes de coloração cinza clara a escura. Nessas porções também podem ser encontradas feições de carstificação e/ou alteração em meio às rochas sãs, porém são raras.

Esse sistema aquífero também pode ser localmente subdividido em porções com menor permeabilidade devido a cimentação por sílex. Onde esse fenômeno é mais desenvolvido, ocorre a sustentação de morros testemunhos em meio à planície típica da formação. Mesmo que presente principalmente em superfície, a até 50 m segundo Silva, *et al.* (1994), o sílex protege o maciço sob ele, diminuindo a carstificação em profundidade. Isso é condizente com as baixas vazões da mina de Morro Agudo e incipiente carstificação em seu substrato.

A recarga desse sistema aquífero se dá pela infiltração de água proveniente do aquífero granular de material de alteração superficial; pela infiltração direta nas zonas de afloramento

das rochas e pelo fluxo advindo de aquífero adjacentes. Cabe ressaltar que, devido a maior declividade e menor permeabilidade dos morros da área, interpreta-se que a recarga nessas porções seja menor do que nas planícies. Ressalta-se ainda que as dolinas consistem em zonas de recarga preferencial, conectadas a estruturas do maciço.

- *Sistema Aquífero/Aquitardo Pelítico-Carbonático*

Corresponde às camadas de margas e filitos inseridas no interior da Fm. Morro do Calcário. Pode ser classificado como um aquitardo, apresentando condutividade hidráulica menor em relação aos dolomitos adjacentes. Interpreta-se que as camadas compartimentam o aquífero carbonático em dois: um bloco a leste e outro a oeste. Esse sistema também sofre com alteração nas porções menos profundas, onde assume um valor de condutividade mais elevado, como se observa na análise do teste de bombeamento no poço PB-AMBN-02, com uma condutividade da ordem de $10E-5$ m/s.

- *Sistema Aquífero/Aquitardo Pelítico*

Composto pelos filitos das Fms. Serra do Garrote e Lapa. Também apresentam uma diminuição da condutividade com a profundidade. A análise dos testemunhos de sondagem evidenciou que até uma profundidade de 60 m os filitos se mostram bastante alterados. A presença de poços com vazões razoáveis (~ 12 m³/h) sobre esse maciço alterado condiz com a interpretação dessa zona mais permeável.

O modelo de aquífero mais conveniente é o de dupla porosidade, típico de aquíferos fraturados. Consiste na presença de uma matriz que se comporta como meio poroso, cortada por estruturas de condutividade elevada, com fluxo laminar a turbulento. O teste de bombeamento do poço PB-AMBS-04 reforça esse modelo conceitual.

7.1.2.1. Subdivisões

Para representação do modelo numérico seguindo o propósito deste trabalho, o modelo conceitual assume que:

- O sistema aquífero carbonático é subdividido em duas zonas: porção superficial (epicarste) e profunda (dolomitos são);
- O sistema aquífero/aquitardo pelítico é subdividido em porção superficial (saprólito pelítico) e profunda (filitos são);

- O sistema aquífero detrítico não foi diferenciado no modelo, sendo representado junto com as porções superficiais dos sistemas carbonático e pelítico, constituindo um K médio entre essas unidades;
- A porção superficial alterada do sistema aquífero/aquitardo pelítico-carbonático não foi diferenciada da zona superficial (epicarste) do sistema aquífero carbonático;
- A porção superficial do sistema carbonático nos morros foi diferenciada para retratar uma zona de menor permeabilidade composta por dolomito cimentado por sílex.

A figura 7.2 ilustra a definição dos sistemas hidrogeológicos da área e sua subdivisão para melhor retratar as variações de condutividade hidráulica dentro de cada sistema.

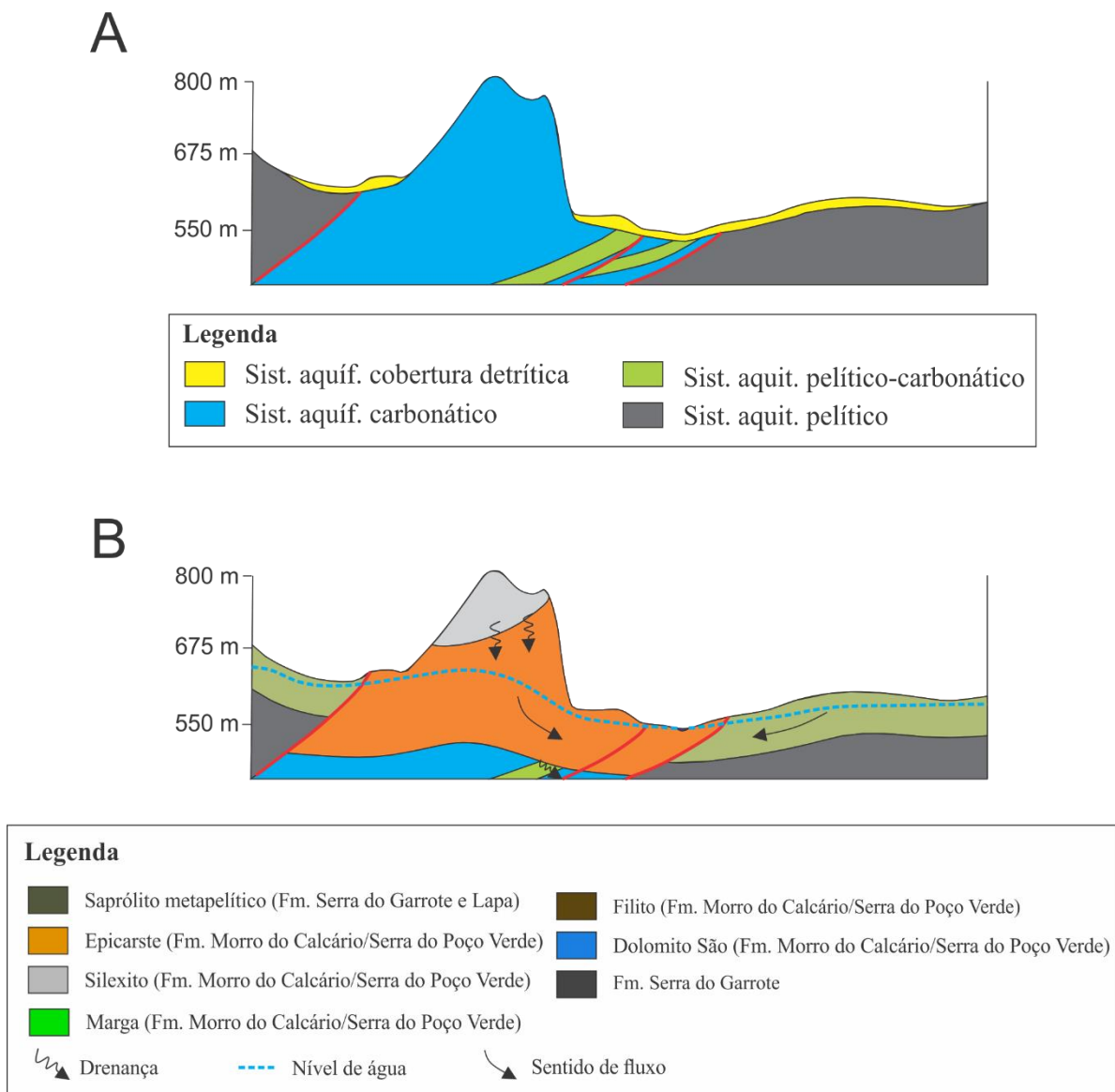


Figura 7.2: (A) Seção exibindo os sistemas hidrogeológicos da área de estudo; (B) Subdivisões dos sistemas para representar as variações de condutividade.

7.1.3. Limites do Modelo

Para a delimitação do contorno do modelo regional foram considerados quatro tipos de limites e duas condições de contorno, como se observa na Fig. 7.3.

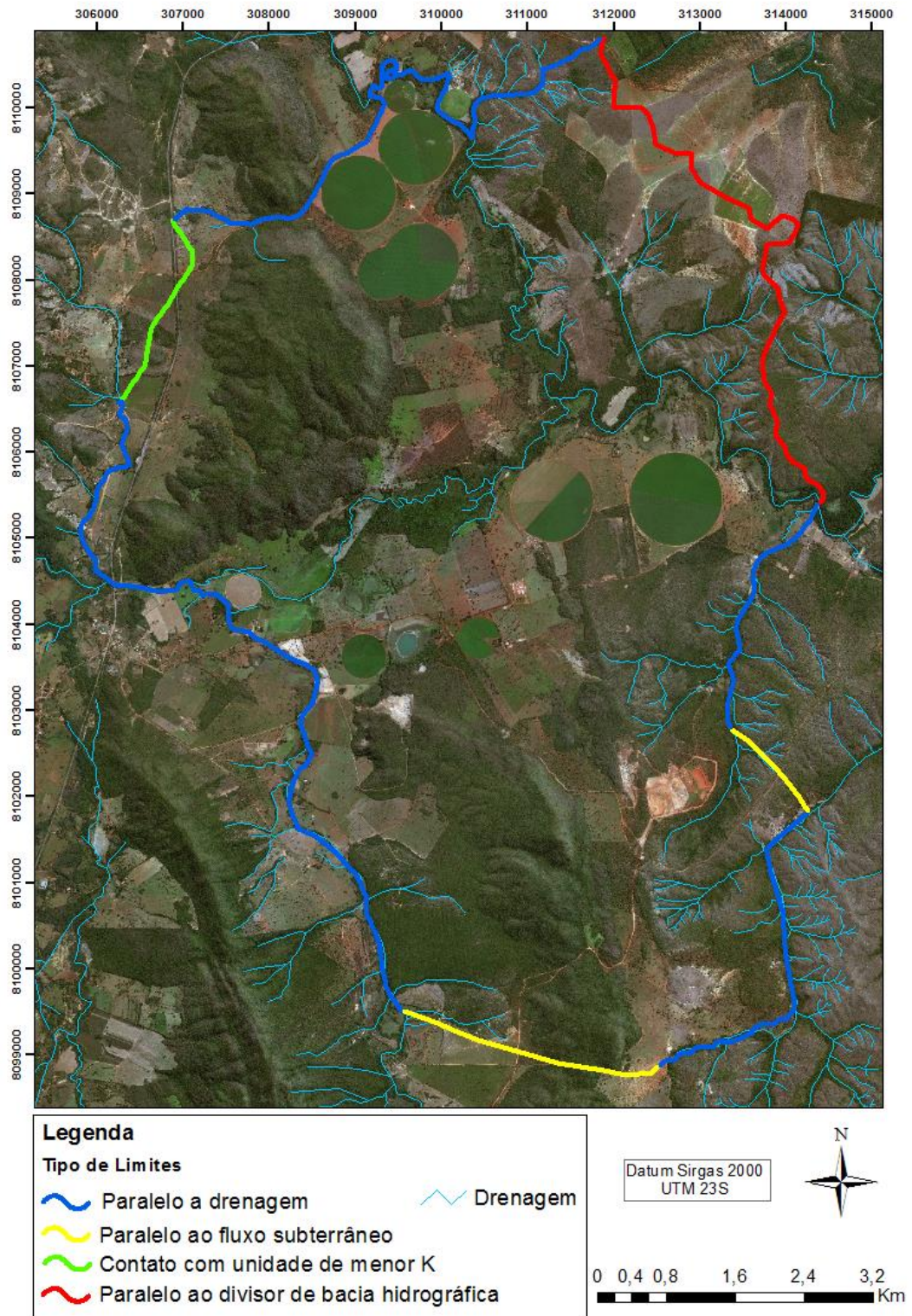


Figura 7.3: Limites do modelo numérico.

- As linhas em azul consistem nos limites paralelos a drenagens, definidas no modelo por condições de contorno do tipo carga conhecida.
- As linhas em amarelo foram delimitadas com base no mapa potenciométrico da área, definidas como linhas paralelas à direção do fluxo; A linha vermelha foi delimitada de forma paralela ao divisor de água que limita a bacia em estudo a SW e outra bacia a NE; A linha verde foi traçada paralelamente ao contato com os filitos da Fm. Lapa, interpretados com um K menor. Desse modo, esses três limites consistem em contornos de não fluxo.

Apesar do modelo desenvolvido apresentar um limite inferior não definido, considera-se que a base da unidade aquífera principal do modelo coincida com o contato de base da zona de epicarste. As unidades abaixo foram definidas como rochas bem conservadas, com condutividade hidráulica baixa ($10E-7$), duas ordens de grandeza inferior a condutividade considerada para o epicarste ($10E-5$).

7.1.4. Balanço Hídrico

O balanço hídrico de uma área leva em conta as entradas e saídas de água, e as variações de armazenamento das rochas em um determinado sistema hídrico. A equação do balanço hídrico (Equação 7.1) segue o princípio da conservação de massa, segundo o qual, em um sistema qualquer, a diferença entre as entradas e saídas é igual à variação do armazenamento dentro do sistema.

$$\text{Entradas} - \text{Saídas} = \Delta S \quad (7.1)$$

Em um sistema em equilíbrio, no caso de um modelo em regime permanente, pode-se desconsiderar o armazenamento das rochas. Isso é traduzido na equação 7.2.

$$\text{Entradas} = \text{Saídas} \quad (7.2)$$

- Entradas: Apesar de não se poder afirmar que não existem trechos influentes nos rios da área, o modelo conceitual proposto considera que a principal recarga do sistema provém da precipitação. Por esse motivo, optou-se por não representar o aporte de água do rio ao aquífero no modelo a ser desenvolvido.

- Saídas: Considera-se principalmente a descarga nas drenagens da área (fluxo de base) e os poços de superficiais. A relação entre os lagos e os sistemas aquíferos não é bem definida com as análises até então realizadas, por isso se escolheu não representar esses corpos como saídas de água no modelo.

Dessa maneira, pode-se resumir a interpretação do balanço hídrico da região na equação 7.3.

$$\text{Recarga (precipitação)} = \text{Descarga (rios + poços)} \quad (7.3)$$

7.2. Modelo Geológico

O modelo geológico regional, base para o hidrogeológico, apresenta cerca de 13,88 km por 10,21 km, compondo uma área retangular alongada segundo a direção Norte e Sul. Ele abrange os três projetos de mina e é composto litoestratigraficamente por:

- Fm. Serra do Garrote a leste (Fig. 7.4A): ardósias de coloração cinza escura intercaladas por camadas de quartzitos. A formação Serra do Garrote apresenta caracteristicamente zonas com anomalia negativa de resistividade (<200 ohm.m), no contato de falha de empurrão com a Fm. Morro do Calcário/Serra do Poço Verde. Essa assinatura pode ser associada a um enriquecimento em pirita disseminada, não correspondendo ao minério, porém com uma assinatura similar a ele. Essa feição auxiliou na delimitação da unidade (Fig.7.7B);
- Fms. Morro do Calcário e Serra do Poço Verde indiferenciadas no centro: rochas carbonáticas variadas (Fig. 7.4B) (dolomitos, dolarenitos, dolorruditos, dolomitos estromatolíticos, brechas estromatolíticas, dolomitos laminados etc) associadas com fácies calciossilicáticas (Fig. 7.4C) (margas com intercalação de rochas carbonáticas e siliciclásticas metapelíticas) e metapelíticas (Fig. 7.4D) (filitos de coloração cinza escura exibindo forte foliação);
- Fm. Lapa à oeste: composta por filitos, ardósia carbonosa, metassiltitos carbonáticos e lentes de dolomito.

Visto que o objetivo é o desenvolvimento de um modelo hidrogeológico, foram individualizadas camadas no interior das unidades litoestratigráficas. Elas buscam representar

unidades hidrogeológicas do modelo conceitual proposto. Nesse sentido, foram inseridos os seguintes compartimentos:

- Epicarste (Fig. 7.5A; B; e C): zona superior das Fms. Serra do Poço Verde e Morro do Calcário. Abrange o solo que recobre o terreno da área e o topo rochoso das unidades citadas. Caracterizado como uma matriz de dolomitos carstificados com presença de zonas de elevada condutividade hidráulica na forma de condutos e cavidades. Zonas úmidas (cavidades, condutos ou matriz fraturada condutiva) delimitadas pelas seções geofísicas e pela análise dos testemunhos de sondagem se encontram nessa camada, marcadas por uma resistividade <150 ohm.m (cores roxas na seção de resistividade), associadas a baixo IP e com geometria sub-horizontal (Fig. 7.7A). O epicarste apresenta profundidade variada, de acordo com a análise de fotos de testemunhos de sonda e descrições da equipe de exploração mineral. A espessura dessa zona na área varia de 30 a cerca de 200 m.
- Saprólito metapelítico (Fig. 7.5D): zona superior das Fms. Serra do Garrote e Lapa. Caracteriza-se como uma camada de 60 m de profundidade a partir da topografia do terreno. É composta por material superficial não consolidado e filitos das Fms. Lapa e Serra do Garrote alterados e associados a um fraturamento mais intenso, levando a uma maior condutividade hidráulica;

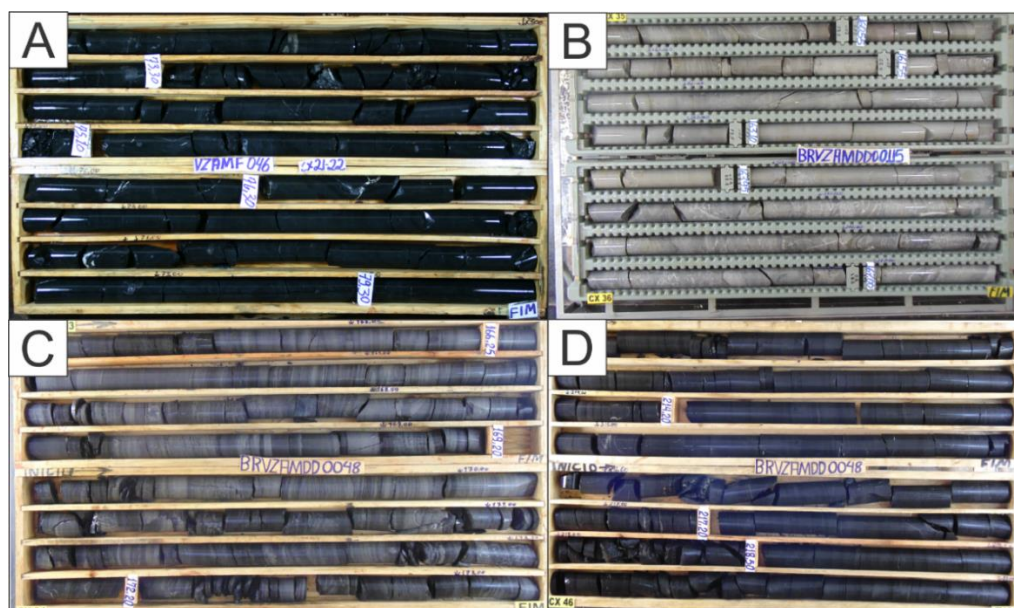


Figura 7.4: Rochas não intemperizadas representantes das Fms. Serra do Garrote e Morro do Calcário. (A) Filito cinza escuro carbonoso da Fm. Serra do Garrote; (B) Dolomito cinza dominante na Fm. Morro do Calcário; (C) Camada de marga da Fm. Morro do Calcário, composta pela intercalação de bandas de composição siliciclástica pelítica (cinza escuro) e carbonática (cinza claro); (D) Camada de filito cinza escuro carbonoso da Fm. Morro do Calcário. Todas as rochas apresentam um K baixo.

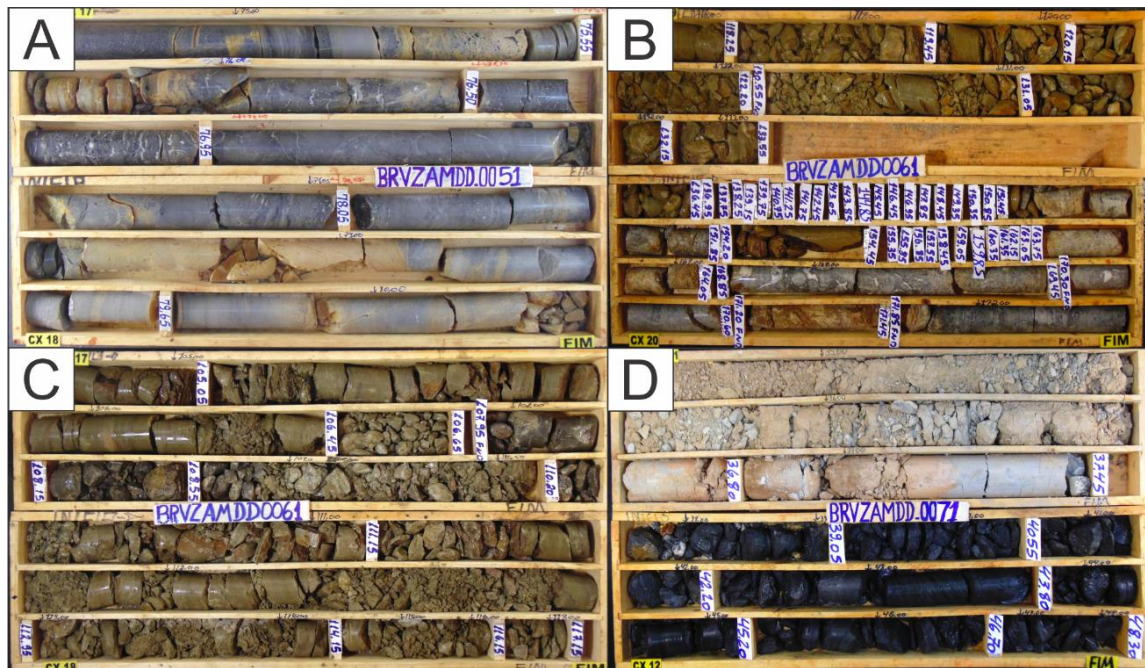


Figura 7.5: Unidades de maior K individualizadas no modelo geológico. (A) Dolomito com feições de carstificação moderada a intensa pertencente a unidade do epicarste; (B) Marga e brecha dolomítica com carstificação moderada a intensa associado a um trecho de baixa recuperação que caracteriza uma fenda/cavidade de aproximadamente 15 m a uma profundidade de cerca de 130 m da superfície (unidade epicarste); (C) Marga exibindo carstificação intensa da unidade epicarste; (D) Material superficial e filitos alterados e fraturados do topo da Fm. Serra do Garrote, agrupados na unidade saprólito metapélico do modelo geológico.

- Chert/Silexito (Fig. 7.6A e B): zonas inseridas na área de afloramento das Fms. Serra do Poço Verde e Morro do Calcário. Caracteriza-se por rochas carbonáticas cimentadas por sílex, o que leva a uma maior resistência ao intemperismo e uma condutividade hidráulica menor. Esse litotipo é responsável por sustentar os morros da área;

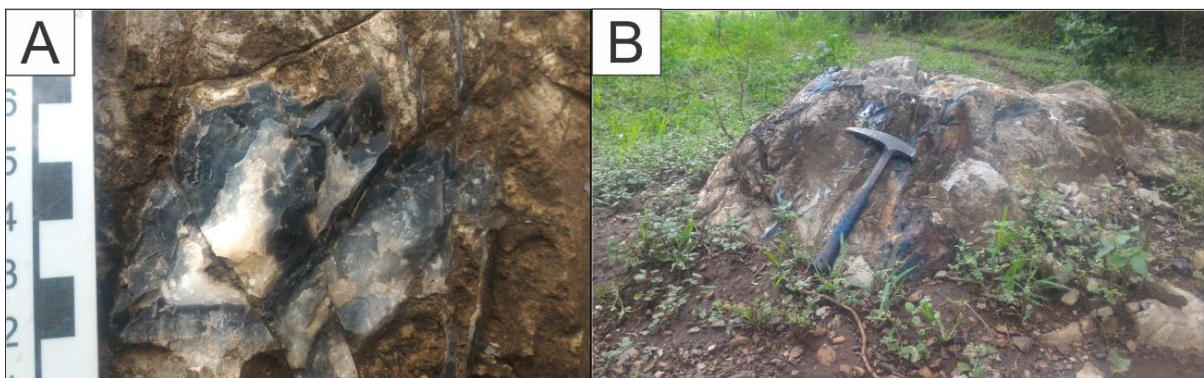


Figura 7.6: Unidade Silexito/chert do modelo geológico. (A) Dolomitos da Fm. Morro do Calcário cimentados por sílex; (B) A cimentação eleva a resistência ao intemperismo da rocha, levando a sustentação de morros na área. A figura ilustra uma pequena porção do terreno mais elevada, sustentada pelo cimento silexítico.

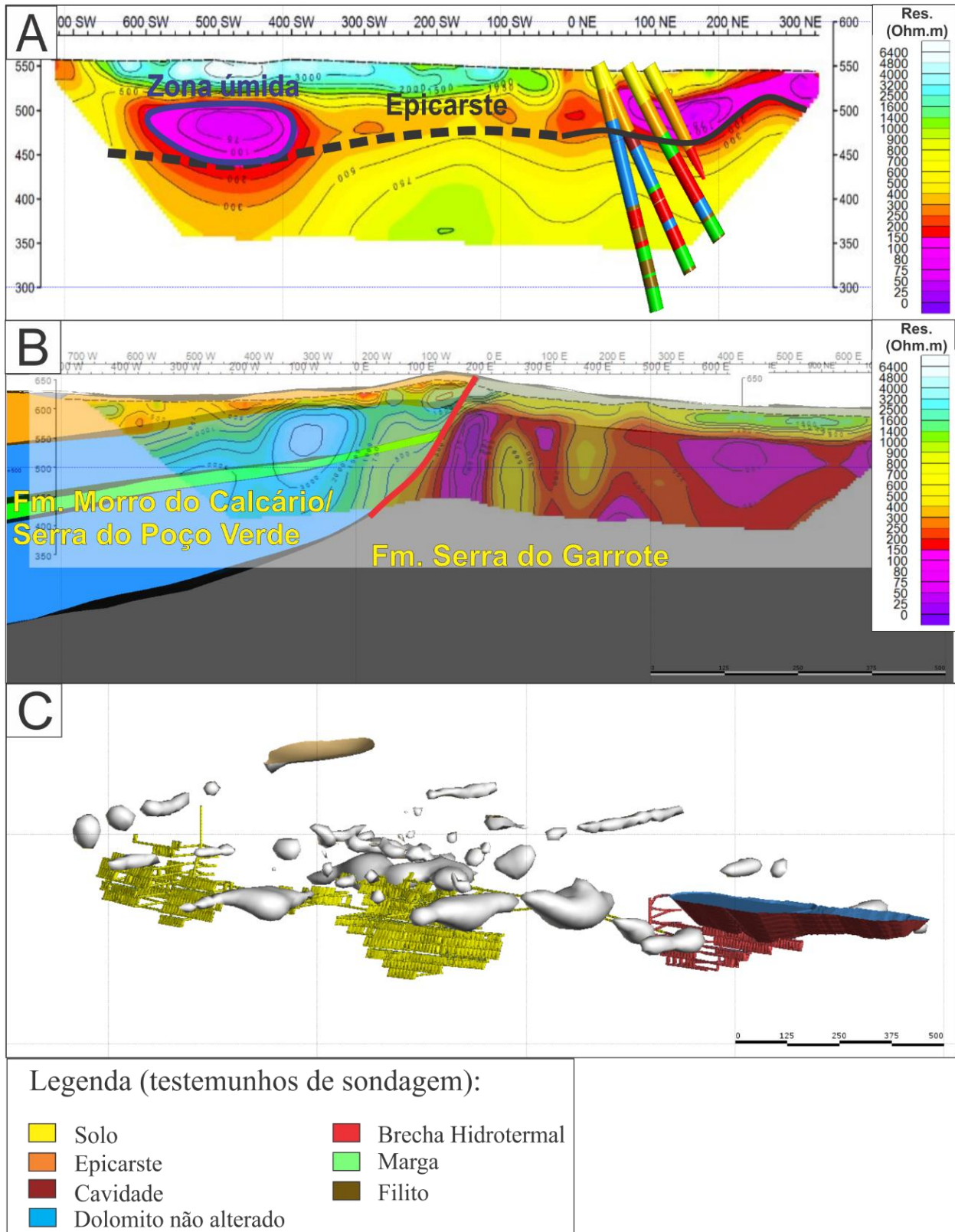


Figura 7.7: (A) Delimitação da zona de epicarste pela conjugação de informações de geofísica (resistividade) e testemunhos de sonda. Observar que as zonas úmidas da seção geofísica coincidem com a zona de epicarste dos testemunhos; (B) Delimitação do contato com a Fm. Serra do Garrote utilizando seções de resistividade. O contato é marcado por zonas condutivas (<200 ohm.m – cor vermelha a roxa) subverticais; (C) Superfícies (em cinza) geradas com base no contorno das zonas úmidas delimitadas nas seções de resistividade e locação em relação às minas do empreendimento.

A figura 7.8 exibe o modelo geológico final, base para o modelo hidrogeológico.

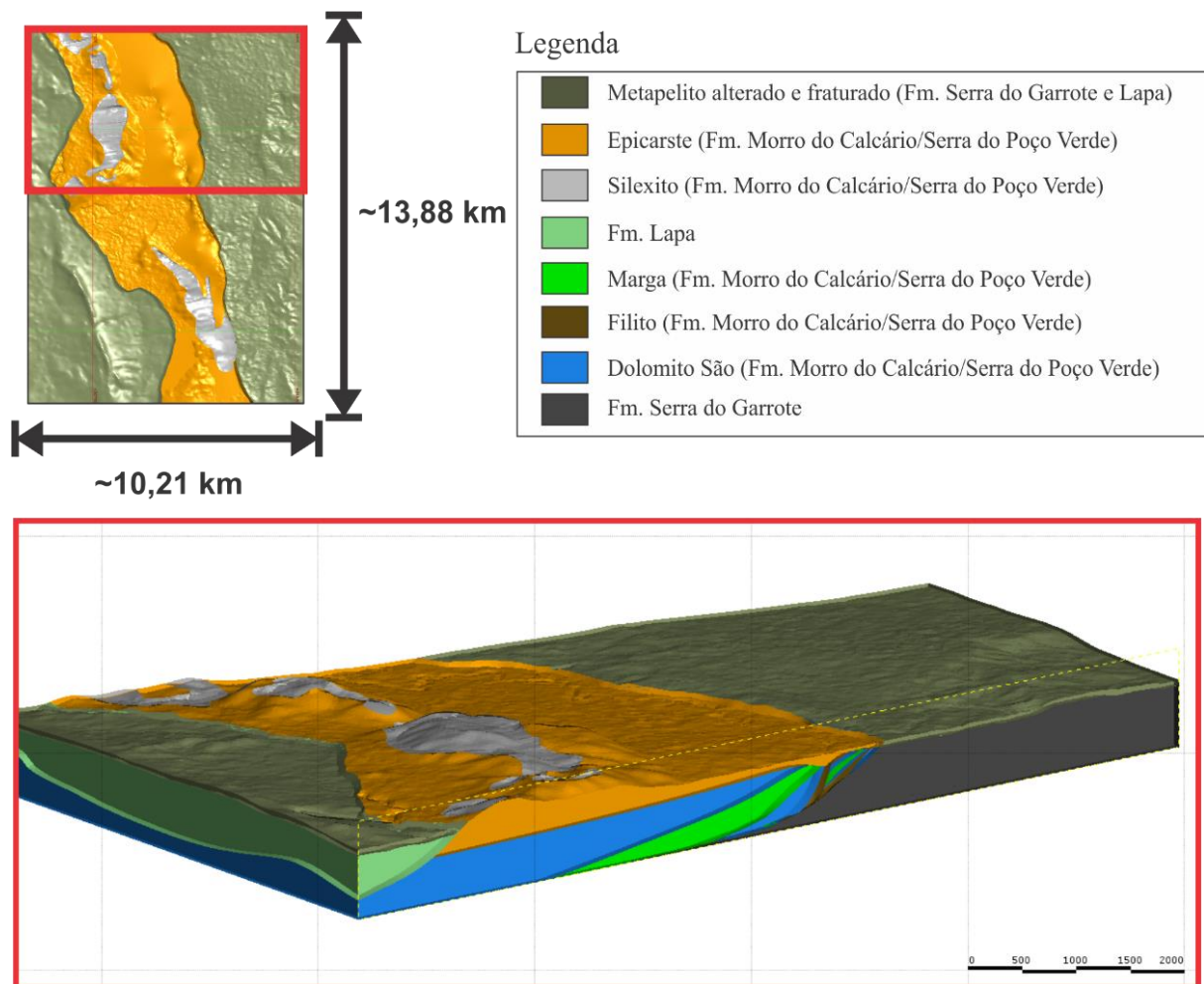


Figura 7.8: Design do modelo geológico final.

7.3. Modelo Matemático

7.3.1. Malha bidimensional

A malha do modelo hidrogeológico foi limitada de acordo com o especificado no tópico 7.1.3 deste relatório, cujos contornos podem ser observados na figura 7.3.

A malha de elementos finitos bidimensionais (triângulos irregulares) totaliza 38.051 elementos e 19.923 nós. O espaçamento entre nós é variável com distâncias entre 150 e 260 m no geral. No entanto, esse espaçamento diminui, uma vez que a malha foi construída considerando adensamentos nos limites do modelo e nas feições mais importantes em superfície e em profundidade. As feições de superfície consideradas no detalhamento foram:

- Limites do modelo;
- Drenagens, como os rios Santa Rita, São Pedro e seus afluentes;
- Lagos;
- Contatos litológicos;
- Falhas regionais;
- Piezômetros, indicadores de nível de água, poços escavados e poços de bombeamento da rede de monitoramento;
- Cavas a céu aberto.

A malha também foi adensada nas porções correspondentes ao desenvolvimento atual e futuro dos projetos de mina subterrânea, de modo a se obter um ponto do modelo à no máximo 10 m de distância horizontal de qualquer ponto XY das galerias da mina subterrânea a desenvolver. A Figura 7.9 apresenta a malha do modelo hidrogeológico discretizado e destaque para uma área em que é possível observar o detalhamento da malha em torno da mina subterrânea, dos rios Santa Rita e São Pedro e dos limites do modelo.

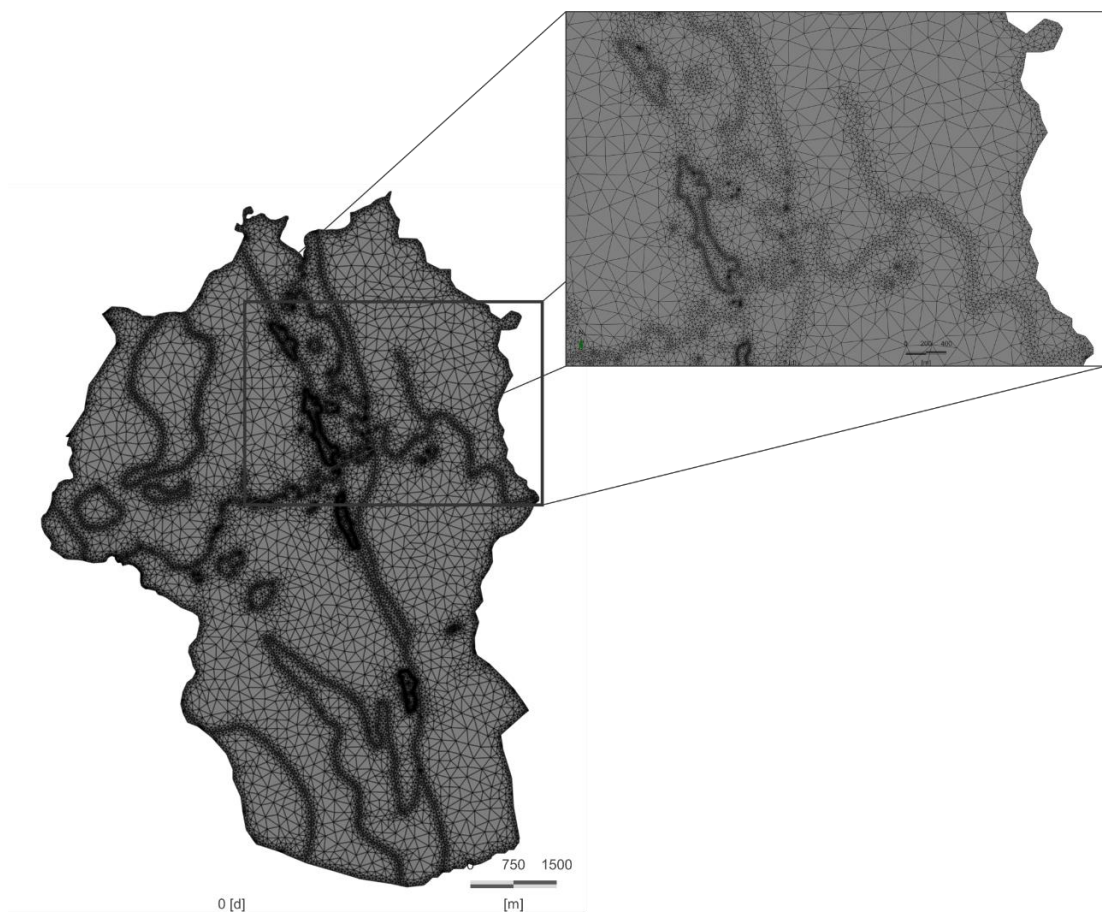


Figura 7.9: Malha bidimensional total, com destaque para a região de desenvolvimento da mina e adensamento dos elementos.

7.3.2. Malha tridimensional

A malha bidimensional e o modelo geológico serviram como base para a construção de uma malha de elementos tridimensional. O modelo foi representado em 18 camadas e 17 cortes. Os cortes foram delimitados de acordo com as superfícies de contato das unidades do modelo geológico para melhor representação da geologia. A tabela 7.1 resume as principais características construtivas do modelo numérico. A figura 7.10 expõe o modelo numérico discretizado tridimensional. A Figura 7.10A e B compara um perfil geológico SW-NE (perpendicular à zona de falha mineralizada) e sua respectiva representação em camadas discretizadas.

Tabela 7.1: Principais parâmetros construtivos do modelo numérico.

Parâmetros construtivos	
Software/versão	FEFLOW 7.1.4
Tipo	Saturado (Equação de Darcy)
Nº de elementos total	646.867
Nº de elementos por camada	38.051
Área (Km²)	657,55
Volume (Km³)	45,91
Slices	18
Camadas	17
Triângulos obtusos	0,3% > 120°; 29,7% > 90°
Triângulos que violam o Delaunay	0,30%
Solver	Direct (PARDISO – Parallel Direct Solver – O. Schenk & K. Gärtner)
Projeção	Aquífero não confinado; Slice 1 = freático (fixa)
Residual Water Depth	0,1

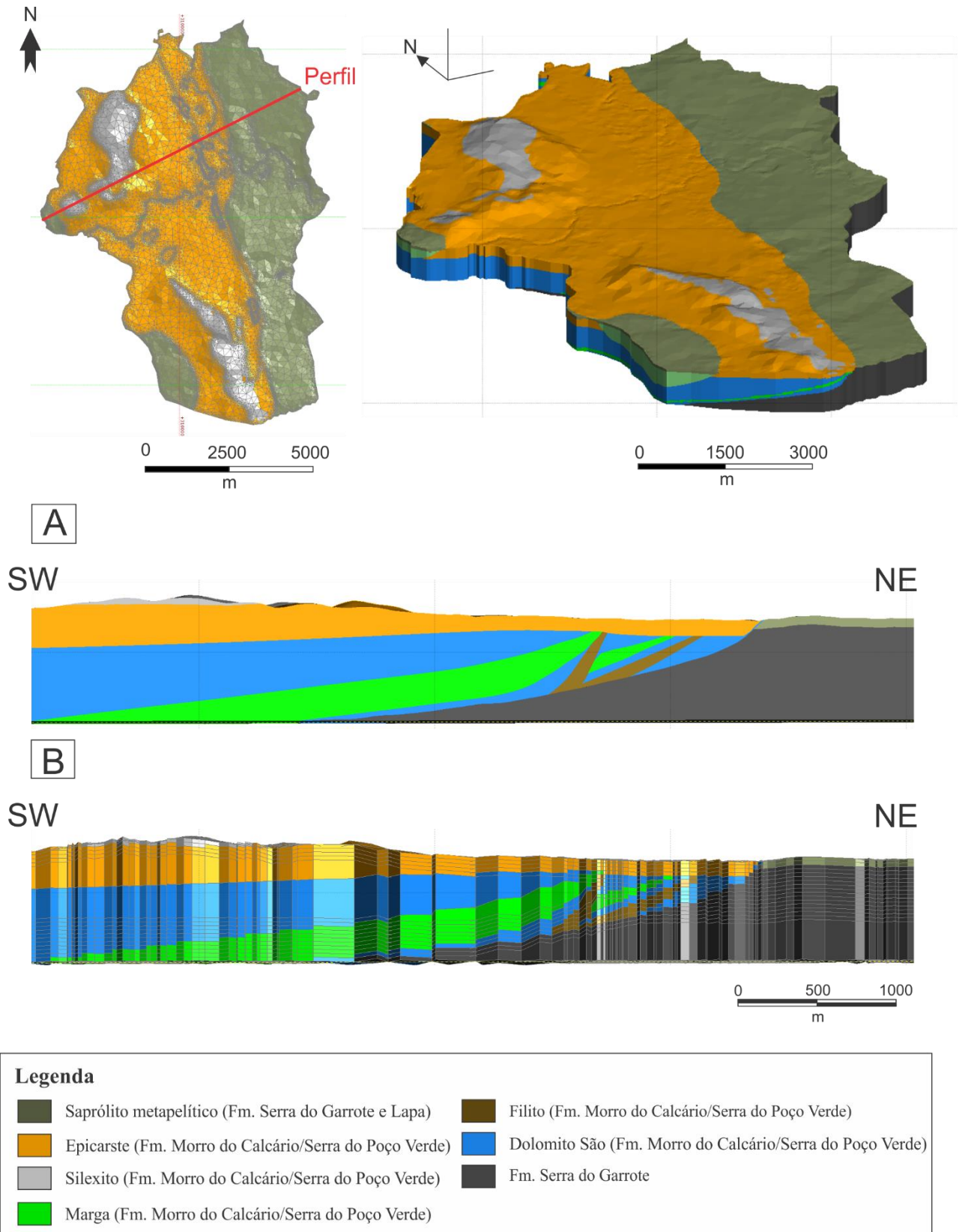


Figura 7.10: Modelo numérico tridimensional discretizado e comparação entre perfis SW-NE do (A) modelo geológico e do (B) modelo numérico discretizado.

7.3.3. Condições de contorno

As condições de contorno inseridas no modelo numérico podem ser observadas na figura 7.11.

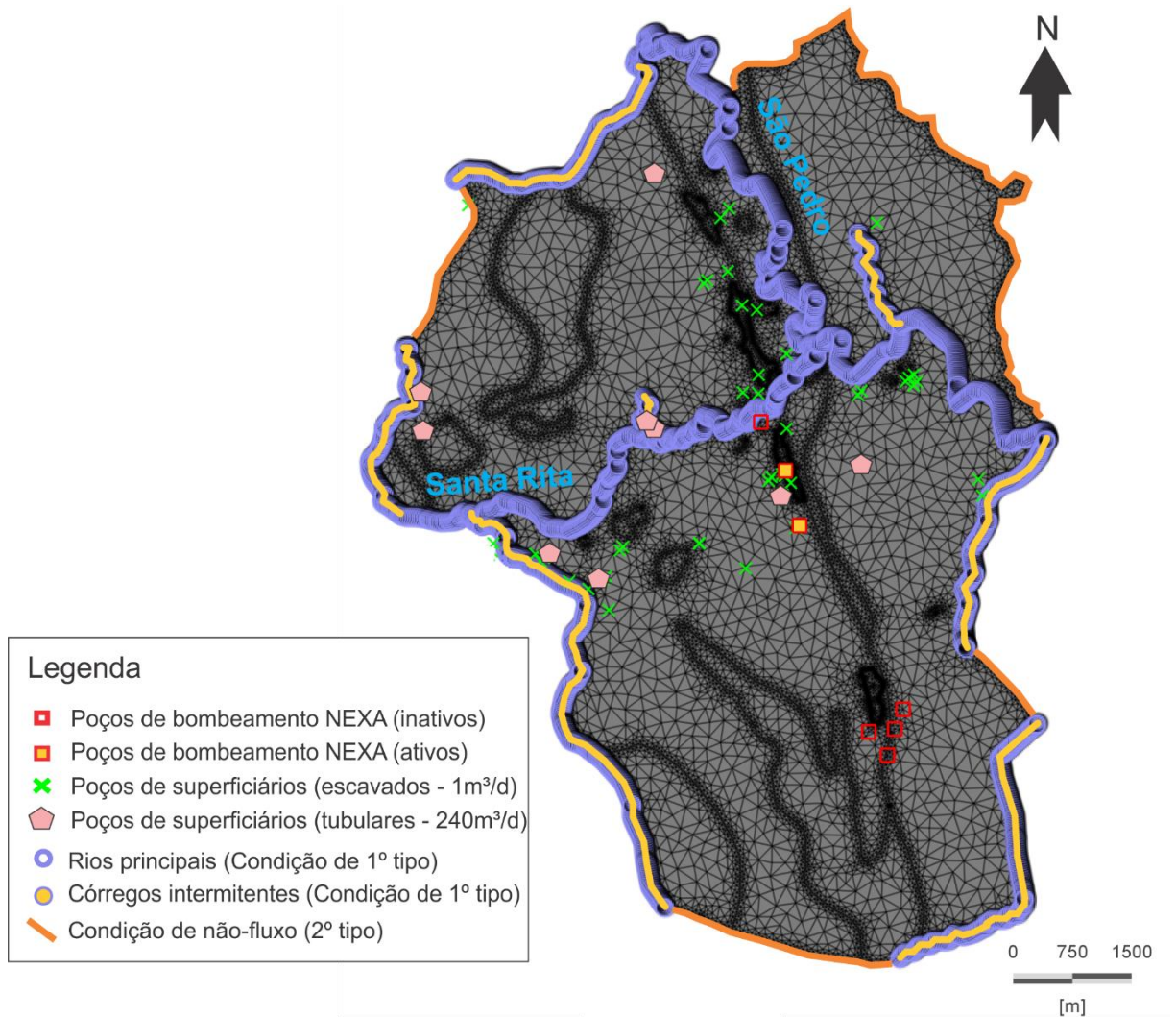


Figura 7.11: Condições de contorno utilizadas no modelo numérico.

Tal como descrito no tópico 7.1.3 deste trabalho, foram inseridas condições de contorno de primeiro tipo (Dirichlet – carga hidráulica especificada) nos limites do modelo coincidentes com drenagens. Para os rios do interior do modelo também foi inserida a condição de primeiro tipo. Em todas as drenagens foi estabelecida uma restrição de fluxo 0 m³/h, isto é, o córrego consiste apenas em uma descarga de água do modelo (*seepage face*). Para os demais limites, foi definida uma condição de contorno de segundo tipo (Neuman – fluxo especificado), estabelecendo uma condição de não fluxo.

Foram inseridos ainda os poços de bombeamento em atividade na área do modelo, mapeados por empresa terceira. Foram considerados tanto poços escavados para uso domiciliar com menor vazão (cerca de 1 m³/d considerando uma família de cinco pessoas); quanto poços tubulares utilizados para agricultura, com uma vazão estimada de 240 m³/d. Em ambos os casos, eles foram inseridos como uma condição de contorno de quarto tipo (condição de poço).

Também foram considerados dois poços em atividade pela *Nexa Resources*: o PB-AMBN-01, com vazão de 15 m³/h e o PB-AMBN-02, com 40 m³/h. Como suas características construtivas são bem conhecidas, eles foram inseridos como poços de multi-camadas.

7.3.4. Parâmetros iniciais (Recarga e Condutividade Hidráulica)

Como condições iniciais para a simulação em regime permanente, foram considerados dados de trabalhos prévios na área (dados de calibração de modelo em regime permanente realizado no *software* MODFLOW por empresa consultora), além de produtos da análise dos testes de bombeamento e do histórico de monitoramento hidrogeológico.

Os valores de recarga iniciais são resumidos na tabela 7.2 e sua distribuição ilustrada na Figura 7.12. A precipitação anual considerada para esses valores é de 1290.4 mm.

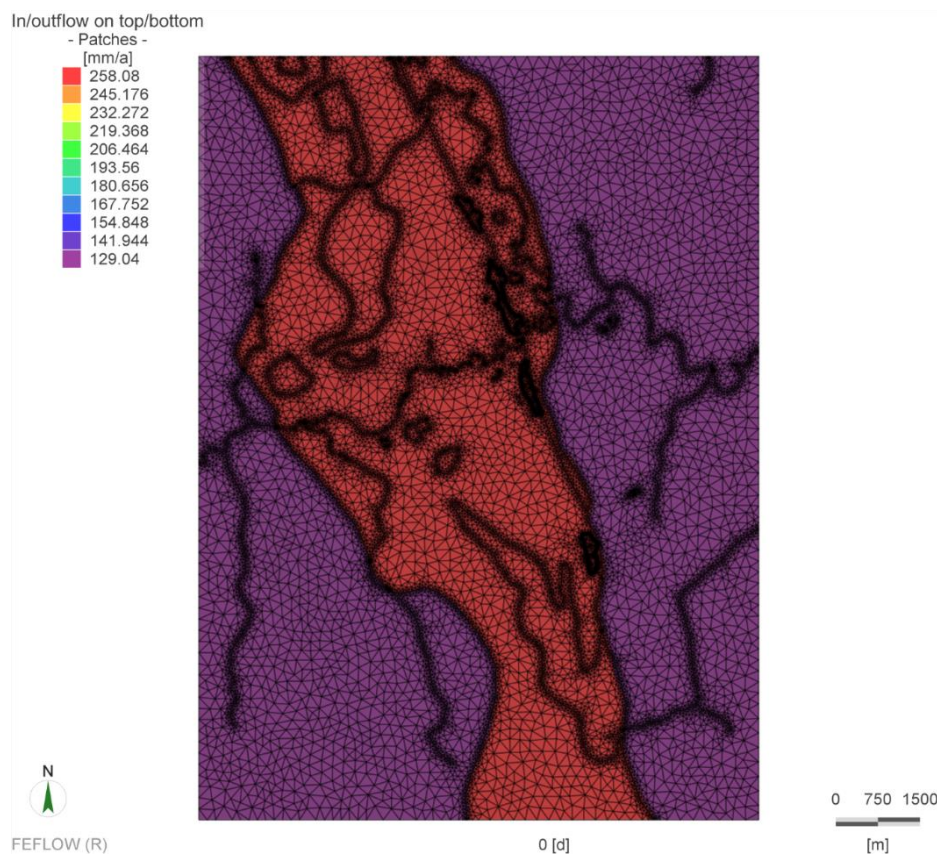


Figura 7.12: Distribuição dos valores de recarga a partir da precipitação na área do modelo numérico inicial.

Tabela 7.2: Valores de recarga inseridos inicialmente no modelo numérico.

Unidade	Taxa de recarga	Recarga (mm/ano)	Fonte
Epicarste	20%	258,08	Calibração MDGEO (valores aproximados)
Chert	20%	258,08	Calibração MDGEO (valores aproximados)
Saprólito	10%	129,04	Calibração MDGEO (valores aproximados)

Os valores de K inicialmente inseridos no modelo são resumidos na tabela 7.3 e sua distribuição no modelo representada na figura 7.13.

Tabela 7.3: Valores iniciais de K inseridos no modelo numérico e a fonte dos dados.

Unidade	K (m/d)	K (m/s)	Origem
Epicarste	1,13	1,31E-05	Testes de bombeamento (PB-AMBS-01)
Chert	1	1,16E-05	Calibração MDGEO
Saprólito	0,1728	2,00E-06	Teste de bombeamento (PB-AMBS-04 e 05)
Dolomito São	0,008	9,26E-08	Calibração MDGEO
Filito	0,008	9,26E-08	Calibração MDGEO (Serra do Poço Verde)
Marga	0,008	9,26E-08	Calibração MDGEO (Serra do Poço Verde)
Fm. Serra do Garrote	0,005	5,79E-08	Calibração MDGEO
Fm. Lapa	0,005	5,79E-08	Calibração MDGEO

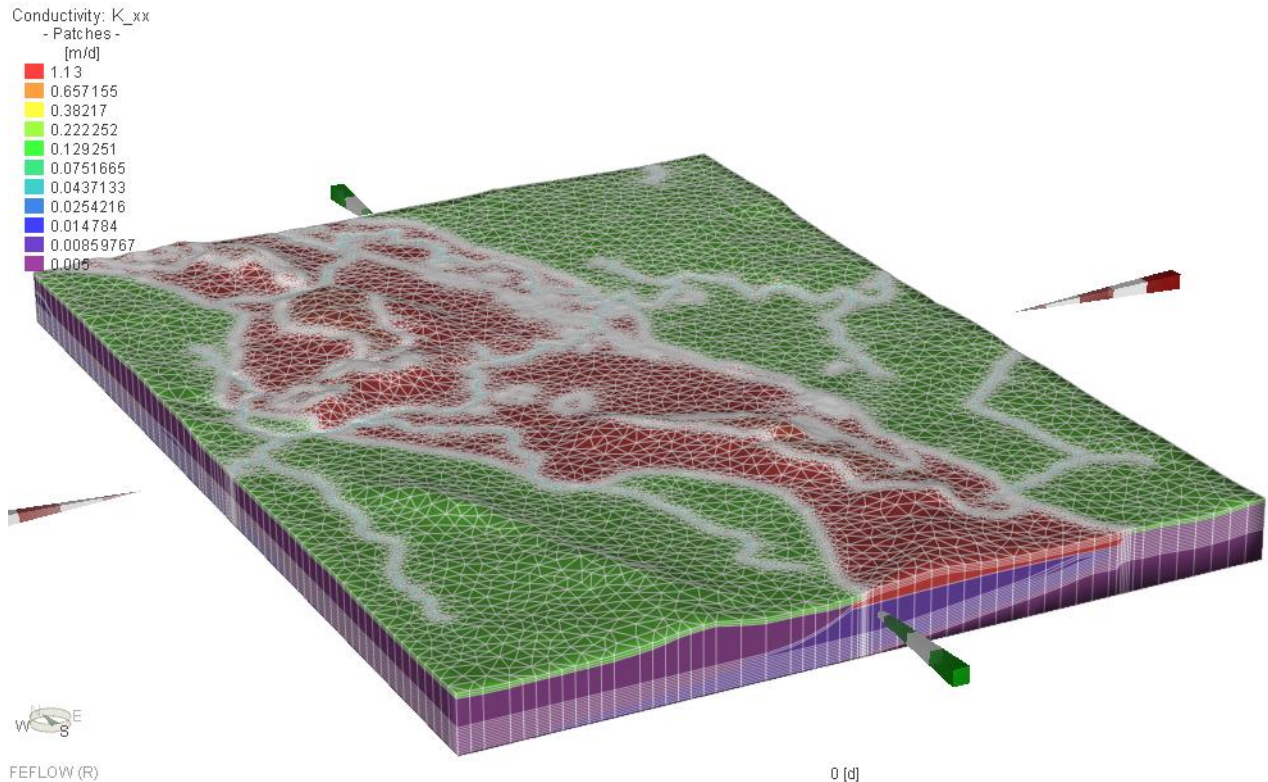


Figura 7.13: Distribuição dos valores de K inseridos no modelo numérico inicial. Sem exagero vertical.

7.3.5. Controles de calibração

Como principal critério de calibração do modelo, foram adotados 52 poços de monitoramento de nível d'água como pontos de observação (7 INAs, 1 PE, 10 PMs 5 PBs inativos e 29 PZs – Figura 7.14). O dia de monitoramento escolhido para a calibração foi 2 de junho de 2017, representativo do período seco da região, sem influência de chuvas. O objetivo é aproximar os valores de NA computados pelo modelo aos valores reais monitorados nesse dia, variando os parâmetros de condutividade hidráulica.

Como descrito no tópico 5.6 deste relatório, o controle do erro entre os valores reais e computados é feito pela análise de gráficos de correlação entre os dois valores (*scatter plots*) e por índices de ajustamento como RMSE (raiz do erro quadrático médio ou valor eficaz), NRMSE (raiz do erro quadrático médio normalizado), erro absoluto e desvio padrão.

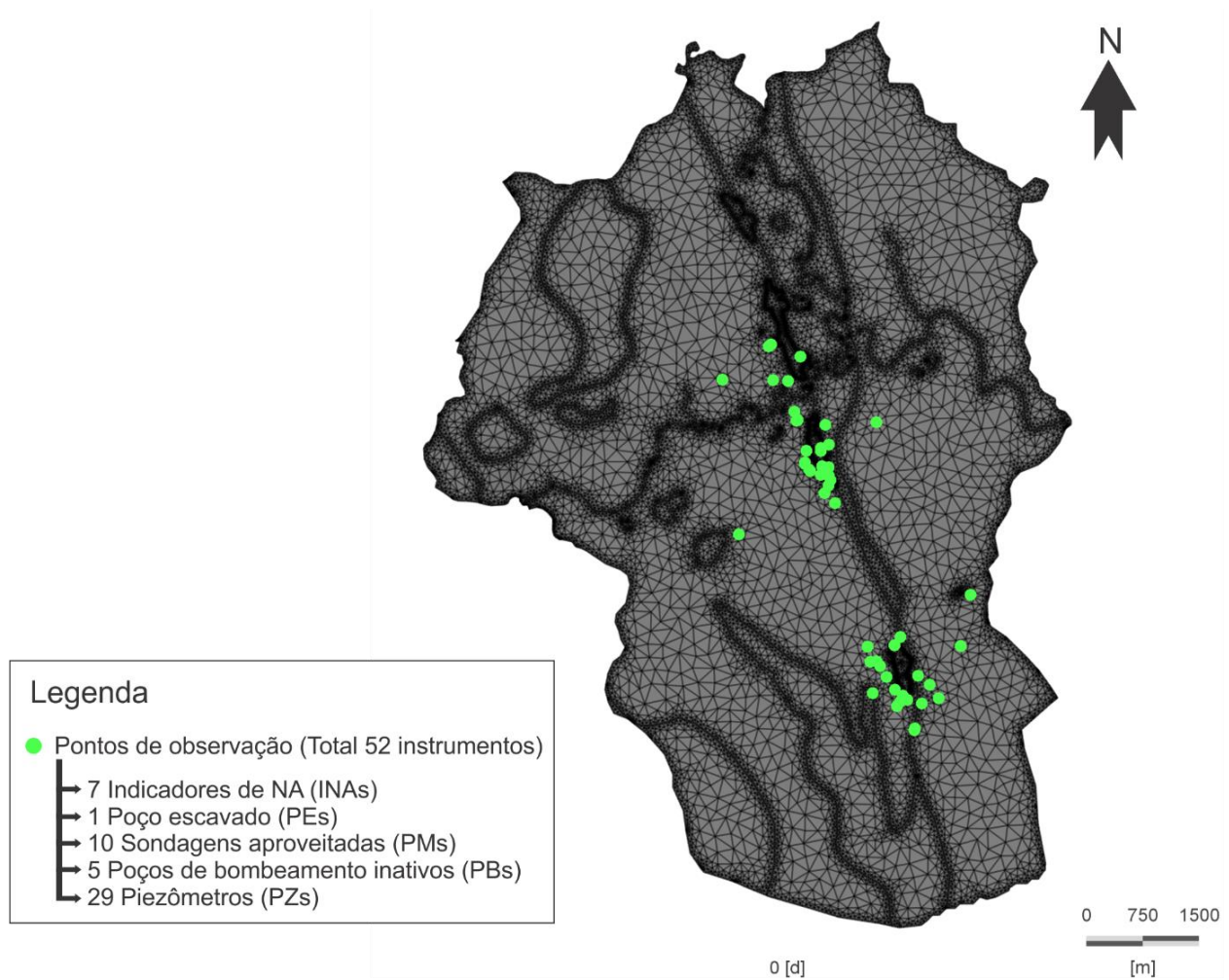


Figura 7.14: Pontos de observação de nível de água adotados no modelo. Como se observa, eles são concentrados nas áreas dos projetos de mina.

Secundariamente, também foram analisados os seguintes fatores para avaliar a calibração do modelo:

- Análise do mapa potenciométrico em busca de valores de carga anômalos irreais;
- Comparação do incremento de vazão em trecho do rio Santa Rita real com o valor de descarga computado pelo modelo para esse mesmo trecho.

Como critérios de convergência do modelo, foi adotado um erro máximo de 0.002 com número de iterações máximo igual a 12.

8. RESULTADOS

A partir da configuração inicial dos parâmetros hidrodinâmicos expostos no tópico 7.3.4., o processo de calibração consistiu na variação da condutividade hidráulica e recarga de cada unidade do modelo de maneira independente, já executando uma análise de sensibilidade preliminar. Como produtos da calibração, é definida a distribuição regional de valores de recarga e condutividade hidráulica, desenvolvido um mapa potenciométrico para área e são feitas considerações para o balanço hídrico da região.

8.1. Recarga

Foram diferenciadas três zonas de recarga no modelo: a porção superficial de filito das Fms. Serra do Garrote e Lapa; as planícies cujo substrato é composto pelo epicarste da Fm. Morro do Calcário; e os morros onde aflora o dolomito cimentado por sílex da Fm. Morro do Calcário.

Para a zona de afloramento do filito foi fixada uma recarga de 41 mm/ano, de acordo com a estimativa do fluxo de base do rio Santa Rita. O cálculo do valor de recarga tomou como base a média anual da precipitação para os anos hidrológicos de 2014-2015, 2015-2016 e 2016-2017, caracterizados pela recente seca que assola a região (1034,2 mm/a). Em relação ao epicarste e a zona delimitada pelos morros, os valores de recarga foram alcançados pelo exercício da calibração.

Os valores de recarga utilizados podem ser observados na tabela 8.1. A distribuição da recarga em mapa pode ser analisada na figura 8.1.

Tabela 8.1: Valores de recarga utilizados para cada zona diferenciada no modelo calibrado.

Recarga Calculada		
Unidade	Taxa da recarga	Valor últimos 3 anos (mm/a)
Epicarste	26%	268,89
Morros	20%	206,84
Saprólito	4%	41,37

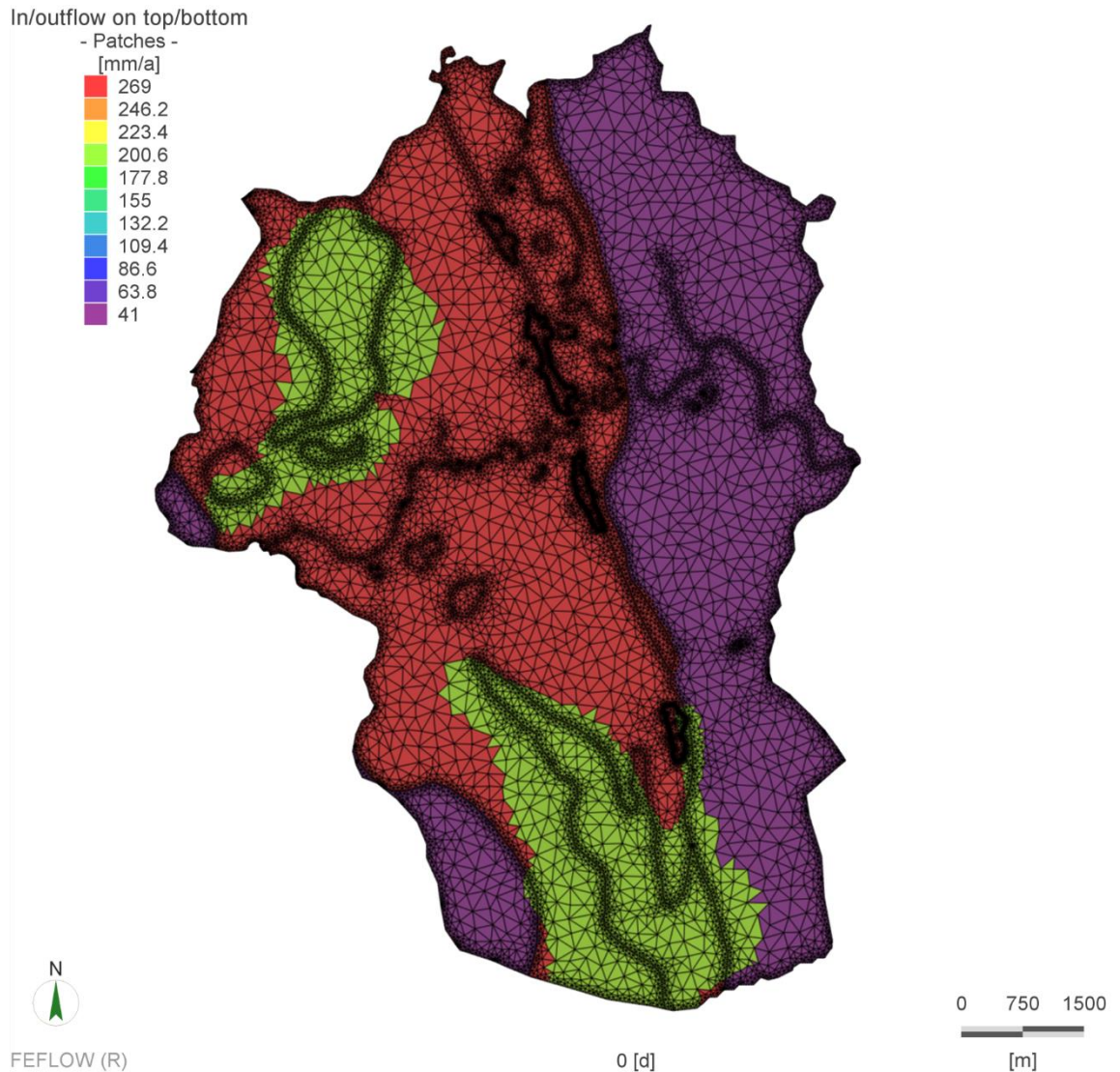


Figura 8.1: Distribuição dos valores de recarga no modelo numérico calibrado.

Interpreta-se que os morros apresentam um K mais baixo e sua maior declividade leva a um maior escoamento superficial que infiltração. Por esse motivo tomou-se o cuidado de manter sua recarga maior que a do saprólito porém menor que a do epicarste.

8.2. Condutividade hidráulica

A partir dos valores de recarga exibidos no tópico anterior, os valores de K de cada unidade foram testados de maneira independente até o modelo apresentar o menor erro possível. Inicialmente se buscou calibrar o modelo utilizando a mais simples subdivisão de zonas de K, partindo da configuração inicial exibida no tópico 7.3.4. Nesse cenário, o epicarste apresentava um K médio para toda a sua extensão.

Com o avanço do processo de calibração, percebeu-se que a região dos projetos Ambrósia Norte e Bonsucesso (centro-norte do modelo) apresenta um K mais elevado que a região do projeto Ambrósia Sul (centro-sul). Essa definição foi decisiva para a delimitação das zonas de morro, caracterizadas por um K mais baixo.

A figura 8.2 exibe a distribuição das zonas de K no modelo numérico calibrado, enquanto a tabela 8.2 detalha o valor utilizado.

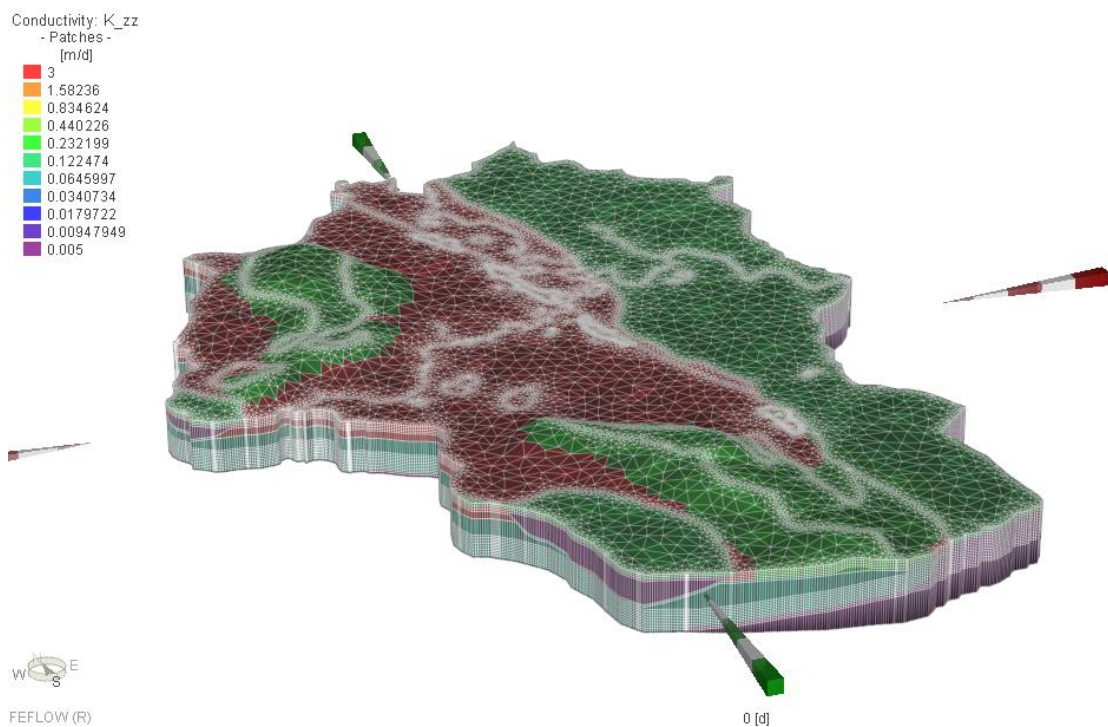


Figura 8.2: Distribuição das zonas de condutividade hidráulica no modelo calibrado. Destaque para a nova zona de K mais baixo nos morros da área identificada pelas simulações em regime permanente. A figura não apresenta exagero vertical.

Tabela 8.2: Valores de condutividade hidráulica usados em cada zona do modelo e sua fonte.

Unidade	K (m/d)	K (m/s)	Origem
Epicarste	3,000	3,47E-05	Calibração
Morros	0,220	2,55E-06	Calibração
Saprólito	0,173	2,00E-06	Teste de bombeamento (PB-AMBS-04 e 05)
Dolomito São	0,080	9,26E-07	Teste de bombeamento PB-AMBN-03
Filito	0,080	9,26E-07	Teste de bombeamento PB-AMBN-03
Marga	0,080	9,26E-07	Teste de bombeamento PB-AMBN-03
Fm. Serra do Garrote	0,005	5,79E-08	Calibração MDGEO (BMS)
Fm. Lapa	0,005	5,79E-08	Calibração MDGEO (BMS)

8.3. Calibração dos pontos de observação e vazão de rios

O principal critério de calibração utilizado foi a comparação entre os valores de cargas hidráulicas computados pelo modelo e os reais obtidos por monitoramento dos poços da área. Os 52 pontos de observação utilizados na calibração podem ser analisados na figura 7.12.

A figura 8.3 expõe gráficos de correlação dos valores reais de carga hidráulica monitorada no dia 2 de junho de 2017 versus os valores computados pela simulação em regime permanente (Scatter plots). Atentar para os bons valores de correlação, marcados por RMSE = 4.316; NRMSE = 5,811%; erro absoluto: $\hat{E} = 3.290$; desvio padrão: $\sigma = 4,358$; e coeficiente de determinação: $R^2 = 0,967$. A tabela 8.4 exhibe o valor da carga hidráulica de cada poço monitorado *versus* o valor computado pelo modelo.

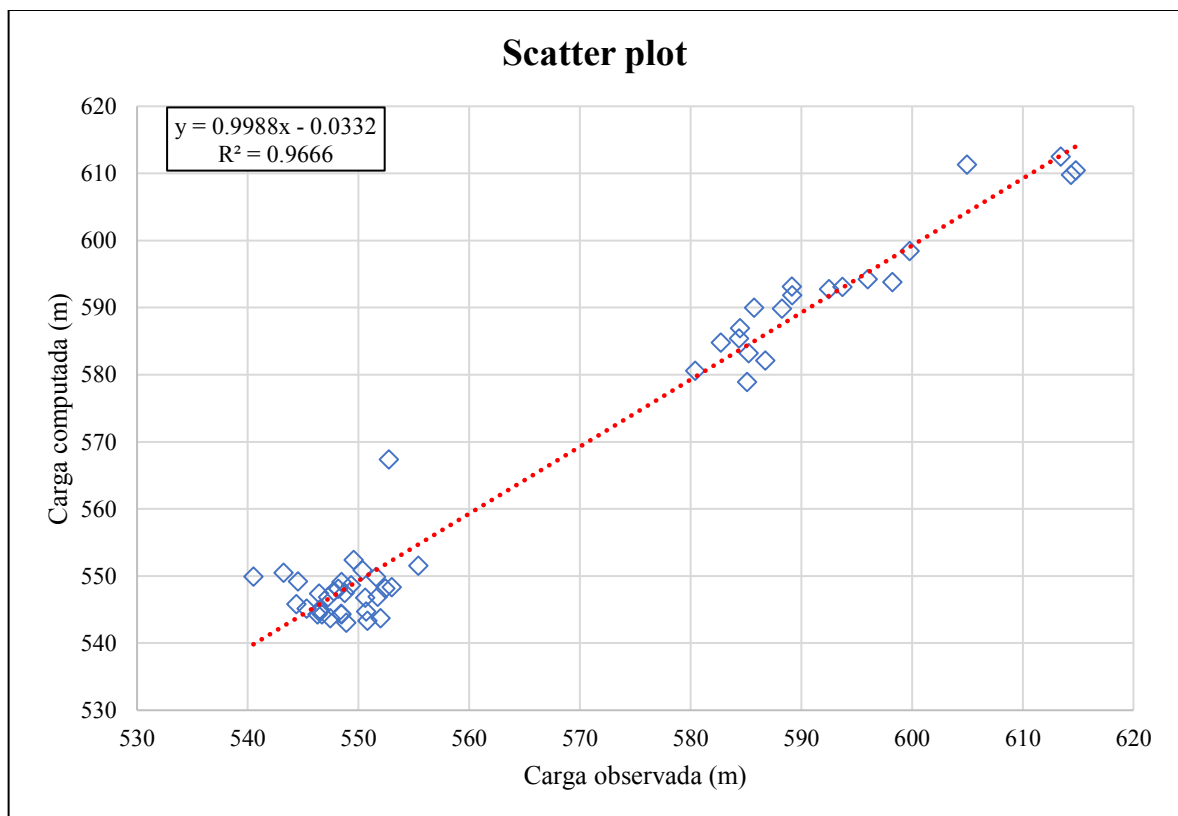


Figura 8.3: Gráficos de correlação dos valores observados de carga hidráulica versus os computados pelo modelo.

Tabela 8.3: Carga hidráulica real versus computada pelo modelo nos 52 pontos de observação.

ID	Ponto de Observação	Real	Computado
1	INA-AMBN-01B	550.67	544.69
2	INA-AMBN-02B	545.32	545.13
3	INA-AMBN-03B	548.75	547.44
4	INA-AMBN-04B	551.59	549.86
5	INA-AMBN-05B	546.30	544.28
6	INA-AMBN-06B	546.48	545.00
7	INA-AMBN-09	544.38	545.79
8	PZ-AMBN-02	547.23	546.83
9	PZ-AMBN-03	546.70	544.26
10	PZ-AMBN-04	548.46	549.07
11	PZ-AMBN-05	549.56	552.36
12	PZ-AMBN-06	555.40	551.53
13	PZ-AMBN-07	553.00	548.32
14	PZ-AMBN-08	546.43	547.35
15	PZ-AMBN-09	550.59	546.75
16	PZ-AMBN-10	546.54	544.83
18	PM-AMBN-18	547.77	547.69
20	PM-AMBN-23	549.33	548.61
21	PM-AMBN-26	552.43	548.12
22	PM-AMBN-27	544.53	549.19
23	PM-AMBN-34	540.51	549.91
24	PM-AMBN-38	543.22	550.45
25	PM-AMBN-40	550.36	550.83
29	PM-AMBN-135	548.18	548.08
31	PE-AMBN-02	551.72	546.87
32	PZ-AMBS-01	589.17	591.83
33	PZ-AMBS-02	598.22	593.77
35	PZ-AMBS-04	586.75	582.09
36	PZ-AMBS-05	592.50	592.74
37	PZ-AMBS-06	604.94	611.29
38	PZ-AMBS-07	593.71	593.05
39	PZ-AMBS-08	596.00	594.21
40	PZ-AMBS-09	585.74	589.95
42	PZ-AMBS-11	588.23	589.81
43	PZ-AMBS-12	582.71	584.77
44	PZ-AMBS-13	585.22	583.21
46	PZ-AMBS-14	552.73	567.34
47	PZ-AMBS-15	585.08	578.91
49	PZ-AMBS-16	584.44	586.92
50	PZ-AMBS-17	614.78	610.43
51	PZ-AMBS-18	584.36	585.40
52	PZ-AMBS-19	580.40	580.57
74	PZ-BMS-12	550.79	543.33
75	PZ-BMS-13	547.45	543.69
76	PZ-BMS-14	548.42	544.38
78	PM-BMS-59	548.90	543.03
79	PM-BMS-88	548.47	544.29
91	PB-AMBN-03	551.99	543.71
92	PB-AMBS-01	589.13	593.13
93	PB-AMBS-04	599.78	598.43
94	PB-AMBS-05	614.35	609.77
95	PB-AMBS-06	613.41	612.49

Outro critério utilizado foi a comparação da variação de vazão no trecho entre os pontos de medição PV-01 e PV-03 e a descarga computada pelo modelo nesse mesmo trecho (Figura 8.4). Como o dia escolhido para a calibração consiste no período seco, o escoamento de base é o que sustenta a vazão na drenagem. Sabendo-se o quanto a vazão aumentou em um determinado trecho é de se esperar que essa vazão corresponda ao volume de descarga do aquífero nesse trecho da drenagem, o que pode ser computado pelo modelo. A média dessa vazão em junho de 2017 foi igual a $11.184 \text{ m}^3/\text{d}$ e para o período de abril a junho desse mesmo ano foi igual a $13608 \text{ m}^3/\text{d}$. O modelo calcula que nesse trecho é descarregada uma vazão de $11.542 \text{ m}^3/\text{d}$, que é um valor coerente.

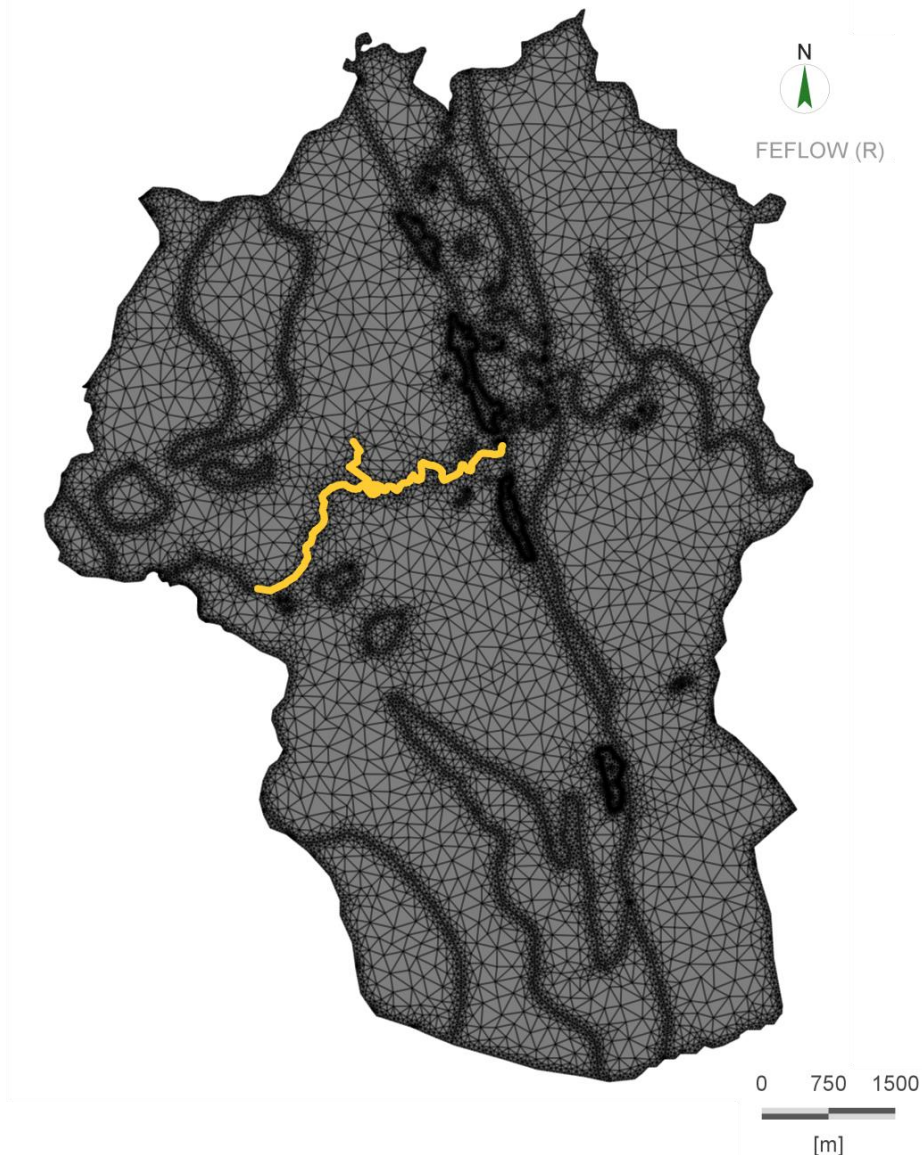


Figura 8.4: Trecho do rio Santa Rita utilizado para controle da calibração. Nos extremos desse trecho existem pontos de medição de vazão (PV-01 e PV-03). A diferença da vazão entre esses pontos no período seco é atribuída ao fluxo de base do rio nesse trecho. Compara-se a variação medida com o fluxo de base calculado pelo modelo.

8.4. Análise de sensibilidade

8.4.1. Pré-calibração

A premissa adotada para a calibração foi a de buscar manter a configuração do modelo a mais simples possível, adotando novas configurações de condutividade hidráulica, recarga e condições de contorno à medida que fosse necessário para a calibração.

Iniciou-se a calibração com valores de K e de recarga provenientes de análises de testes de bombeamento e obtidos pela calibração de modelo realizado previamente por empresa especializada. No entanto, foi necessário alterar os parâmetros buscando encontrar a melhor configuração para o modelo em desenvolvimento, que apresentava base geológica, condições de contorno e método numérico diferentes.

Foram realizadas ao todo 191 simulações em regime permanente tomando notas das variações dos parâmetros de controle de calibração. As simulações eram realizadas variando-se valores de recarga e condutividade hidráulica em um intervalo amplo, inclusive usando valores irrealistas. Em alguns casos também foram testadas novas condições de contorno e critérios de convergência. A cada simulação, apenas um parâmetro era alterado para analisar a sua influência no modelo de forma independente. São enumeradas a seguir as conclusões alcançadas durante o processo de calibração:

1. As primeiras simulações foram realizadas em modelo de formato retangular mais amplo, não seguindo os critérios estabelecidos para os limites do modelo. Esse processo teve como objetivo investigar se os limites definidos causariam alguma influência nos resultados das simulações. Depois de calibrado o modelo retangular, utilizou-se os mesmos parâmetros no modelo limitado e aferiu-se que os limites foram bem traçados visto que poucas mudanças ocorriam na transição;
2. A variação de K dentro das unidades individualizadas evidenciou que existiam um conjunto de poços que dificilmente eram calibrados, distribuídos ao longo dos três projetos do trabalho. Para o ajuste desses poços (e mesmo de pontos de observação como um todo), observou-se que a unidade que controla a flutuação das cargas hidráulicas é o epicarste, considerado o principal sistema aquífero da área;
3. O avanço da calibração evidenciou que a região do projeto Ambrósia Sul deveria estar inserida em uma subzona do epicarste com K relativamente mais baixo que seu entorno. Foram testados diversos cenários para o ajuste desse problema:

- Separação de zonas de K diferentes por profundidade – à exemplo do modelo da MDGEO;
- Individualização de zona de K apenas paralelo a falha regional da mineralização;
- Rebaixamento do K até limites coerentes para a unidade superficial de sílex nos morros;

A solução que melhor respondeu à calibração do modelo foi a exposta no tópico 8.2 do trabalho, individualizando os morros como um todo.

4. Definida a nova zona, optou-se por calibrar primeiramente os poços de Ambrósia Norte e Bonsucesso pela variação do valor de K do epicarste. Depois, variou-se o K dos morros até a calibração dos poços de Ambrósia Sul.

8.4.2. Pós-calibração

Após a calibração do modelo, são realizadas análises de sensibilidade para avaliação do grau de dependência dos resultados deste modelo frente a determinados parâmetros de entrada. O coeficiente de sensibilidade (X_k), na forma normalizada, fornece este grau de dependência (Equação 8.1).

$$X_k = \frac{\partial S}{\partial a_k/a_k} \approx \frac{S(a_k + \partial a_k) - S(a_k)}{\partial a_k/a_k} \quad (8.1)$$

Onde ∂S é a variação do RMS no valor de base $S(a_k)$ para o novo valor $S(a_k + \partial a_k)$ devido a mudança no parâmetro.

Para análise em questão, a condutividade hidráulica e recarga das unidades foram alteradas em 20% do valor original para mais e para menos, executando uma nova simulação para cada variação de forma independente. O critério de calibração RMS foi utilizado como ponderador da sensibilidade.

A tabela 8.4 apresenta os resultados dos coeficientes de sensibilidade calculados para cada unidade e a figura 8.5 exibe um gráfico para melhor análise dos dados.

Tabela 8.4: Resultado da análise de sensibilidade para os parâmetros de condutividade hidráulica e recarga, com alteração de 20% dos valores obtidos pela calibração do modelo.

Parâmetro	RMS (+20%)	Xk (+20%)	RMS (-20%)	Xk (-20%)
K1 (Epicarste)	4.66776	1.75785	4.7608	2.22305
K2 (Morros)	4.4327	0.58255	4.35096	0.17385
K3 (Saprólito)	4.31994	0.01875	4.35588	0.19845
K4 (Dol são)	4.37301	0.2841	4.34433	0.14070
K5 (Filito)	4.31645	0.0013	4.31592	-0.00135
K6 (Marga)	4.31473	-0.0073	4.31856	0.01185
K7 (Fm. S. Garrote)	4.32079	0.023	4.31384	-0.01175
K8 (Fm. Lapa)	4.31622	0.00015	4.31618	-0.00005
R1 (Epicarste)	4.48975	0.8678	4.73056	2.07185
R2 (Morros)	4.71143	1.9762	4.96706	3.25435
R3 (Saprólito)	4.31169	-0.0225	4.28886	-0.13665

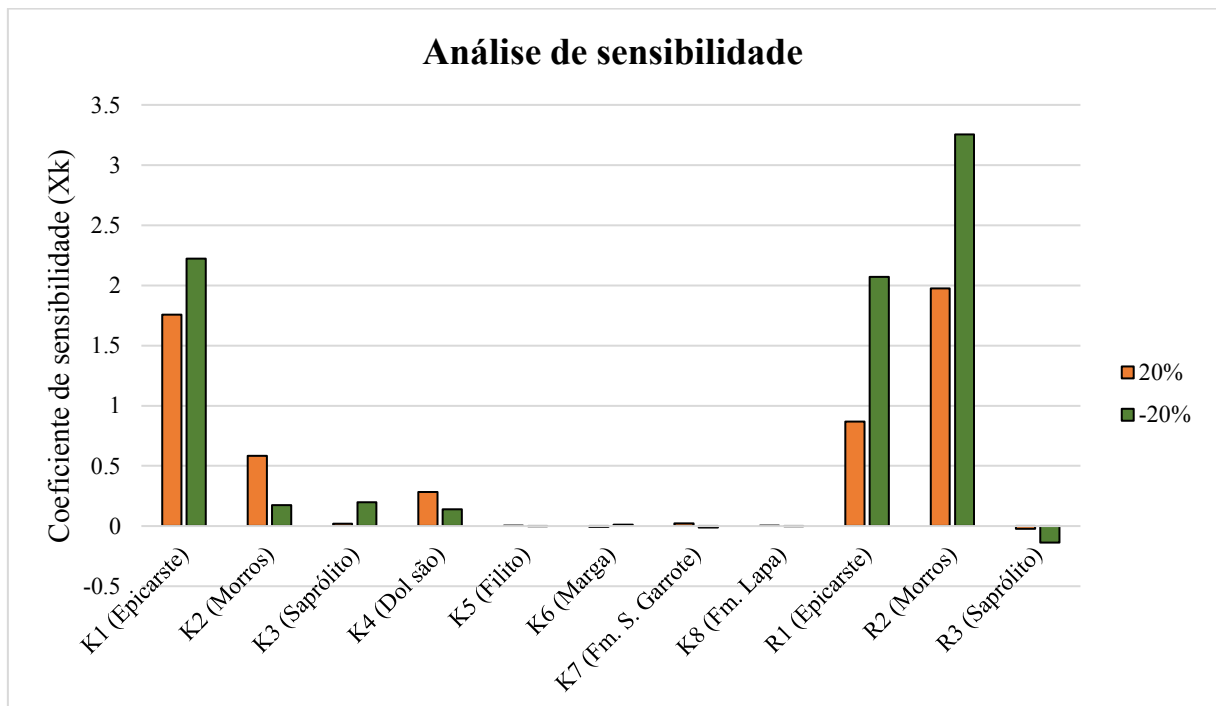


Figura 8.5: Gráfico exibindo os resultados da análise de sensibilidade realizada para a variação de 20% nos valores de condutividade hidráulica e recarga obtidas pela calibração do modelo.

A análise destaca três parâmetros com maior sensibilidade para o critério de calibração utilizado: a recarga e condutividade hidráulica do epicarste e a recarga dos morros da área, sendo esta última a variável mais sensível. De forma geral, as condutividades apresentam uma baixa sensibilidade, destacando-se apenas os morros, além do epicarste. A elevada sensibilidade

da recarga dos morros era esperada, visto que se trata de uma área com menor condutividade. Por conta dessa propriedade, a variação da recarga leva a uma variação maior nas cargas hidráulicas simuladas.

Importante destacar, porém, que a média dos erros resulta 2,82%, e o erro máximo referente a alteração em 20% da recarga nos morros (parâmetro mais impactante) corresponde a uma variação de 65 cm das cargas hidráulicas computadas nos pontos de observação.

8.5. Potenciometria simulada

A figura 8.6 ilustram a distribuição das cargas hidráulicas ao longo da área modelada. Importante destacar que o mapa potenciométrico se mostra concordante com a topografia do terreno. As direções de fluxo de água subterrânea tendem a seguir em direção aos rios Santa Rita e São Pedro que compõem o nível de base da área. Notável gradiente hidráulico é identificado nas regiões dos morros.

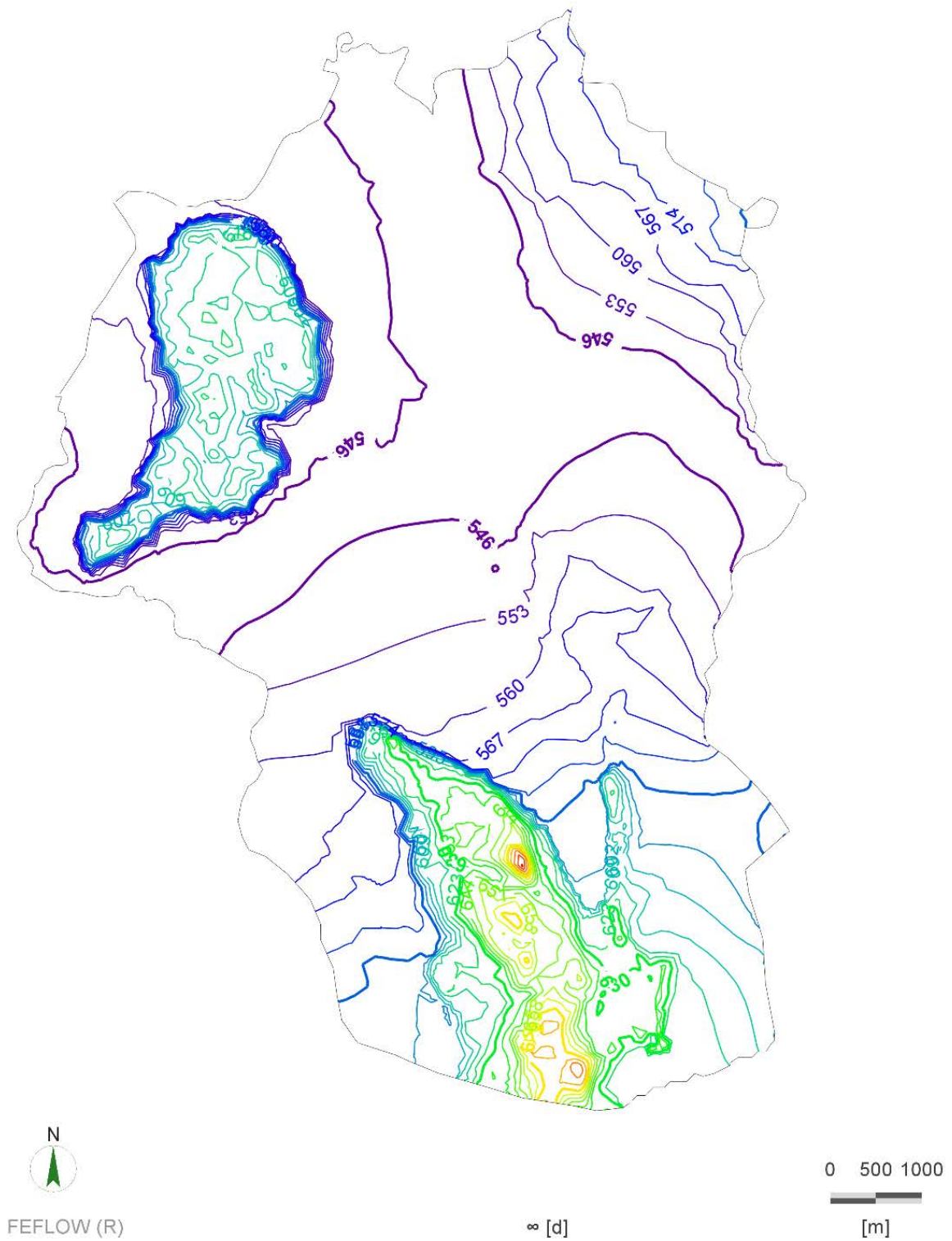


Figura 8.6: Mapa potenciométrico da área obtido pela simulação em regime permanente.

8.6. Balanço de fluxo

Como já descrito neste trabalho, em simulações sob regime permanente o volume de entrada de água no modelo deve ser igual ao volume de saída. Na figura 8.7 observamos o

balanço de fluxo obtido pela simulação realizada. Deve-se destacar que o balanço condiz com o especificado no modelo conceitual, em que a recarga consiste na precipitação e as descargas correspondem aos poços e ao escoamento de base.

Com base no modelo, a somatória de saída de água é igual a 31.301 m³/dia, dos quais 4714 m³/dia corresponde a água bombeada por poços na região. O montante de 26.587 m³ restantes correspondem a água do aquífero que abastece os rios Santa Rita e São Pedro diariamente, apenas na área modelada. A somatória de entrada de água na área é de 31301 m³/dia, que corresponde à recarga por precipitação. O balanço total simulado é de +0,299 m³/dia.

<input checked="" type="checkbox"/> Active	[m ³ /d]
Dirichlet BCs	
-26587	
Neumann BCs	
Cauchy BCs	
Wells	
-4714	
Distributed Sink(-)/Source(+)	
	+31301
Storage Capture(-)/Release(+)	
Imbalance	
	+0.29999

Figura 8.7: Balanço de fluxo obtido por simulação em regime permanente.

8.7. Discussão

O principal resultado do trabalho é um modelo numérico regional a partir do qual foram testados diferentes cenários com distribuições e valores de parâmetros hidrodinâmicos diversos. O cenário final é a configuração que melhor se ajusta aos dados coletados e consiste em uma boa estimativa da distribuição dos valores de recarga, condutividade e direções de fluxo em escala regional.

A aproximação de um K médio para a zona do epicarste se mostrou efetiva. Apesar de se caracterizar como uma camada de alta heterogeneidade, complexidade e diversos modelos conceituais associados, a calibração com baixos índices de erros evidencia que a premissa de generalização de um K médio em escala regional é justificada.

Em relação a recarga, é preciso esclarecer que os valores definidos podem não refletir a realidade a longo prazo da área, visto que se trata de um modelo realizado em regime permanente. Não se considera o armazenamento nesse tipo de simulação, o que impacta no cálculo do volume de entrada e saída do modelo. Além disso, a calibração leva em conta a distribuição do NA nos pontos de observação em um dado momento. Caso fosse escolhido outro período, com outras profundidades de NA, é certo que outros valores de recarga seriam obtidos. Em um modelo transiente, a calibração leva em conta a variação do NA e também se ajusta um valor de armazenamento para as unidades, levando a estimativas mais precisas. No entanto, a delimitação das zonas de recarga é consistente e deve ser aproveitada para uma nova etapa de modelagem.

A calibração da condutividade hidráulica identificou que o projeto Ambrósia Sul estaria associado a uma zona de menor K. Interpreta-se, portanto, que esse projeto está inserido em um contexto de carste menos desenvolvido. Infere-se neste trabalho que essa diferença de condutividade se dá devido a maior proximidade de Ambrósia Sul a um dos morros presentes na área, onde se sabe que o substrato é sustentado por dolomitos cimentados por sílex. No modelo inicial essa zona havia sido individualizada, porém com um K mais elevado e apenas sua porção superficial, onde a cimentação é mais intensa segundo a equipe da exploração mineral. Na nova proposta, essa zona foi estendida para toda a área do morro até a base do epicarste.

A explicação para isso é que o sílex atuou na superfície como uma barreira a percolação de água, evitando que os processos de intemperismo e erosão se desenvolvessem tanto quanto em seu entorno. Nesse sentido, não apenas sua porção superficial cimentada por sílex apresenta um K menor, como toda a área do morro e as rochas em profundidade, onde o processo de carstificação não se desenvolveu tal como nas outras regiões.

A empresa consultora MDGEO realizou a calibração em regime permanente utilizando o método das diferenças finitas no software MODFLOW utilizando limites, condições de contorno, modelo geológico e modelo conceitual diferente. Sua calibração foi realizada subdividindo os valores de K em diversas zonas com a profundidade, enquanto a modelagem realizada neste trabalho buscou por uma abordagem mais simplista com grandes zonas exibindo um K médio. A tabela 8.5 exibe uma comparação dos valores de K alcançados pela calibração do modelo deste trabalho com a realizada pela empresa consultora.

Tabela 8.5: Comparação dos valores de condutividade hidráulica obtidos pela calibração do modelo do trabalho com os obtidos pelo modelo da empresa MDGEO

Modelo desenvolvido		Modelo de empresa consultora		
Unidades	Kxyz (m/d)	Unidades correlatas	Profundidade	Kxy (m/d)
Saprólito	0.173	Saprólito Lapa	0-30	1
			30-60	0.04
		Saprólito Serra do Garrote	0-30	1
			30-60	0.25
Epicarste	3.000	Epicarste de Dolomito Laminado	0-30	4
			30-60	2
			60-100	0.5
		Epicarste Serra do Poço Verde	0-30	4
			30-60	2
			60-100	0.5
Morros	0.220	Silex/Chert	0-30	1
			30-60	0.75
			60-100	0.05
Dolomito são, Filito e Marga	0.080	Dolomito Laminado	100-500	0.008
		Fm. Serra do Poço Verde	100-500	0.008
		Filito	100-500	0.001
		Chert/Silex	100-500	0.004
Fm. Serra do Garrote e Lapa	0.005	Fm. Lapa	60-100	0.01
			100-500	0.001
		Fm. Serra do Garrote	60-100	0.05
			100-500	0.005

A análise da tabela mostra que os parâmetros não distam muito entre si. Os valores obtidos no trabalho realizado são próximos ao que seria a média dos diferentes valores de K do modelo da empresa consultora que optou por subdividir em diversas zonas. Apesar disso, o resultado da calibração foi similar. Destaca-se apenas o valor de K utilizado para o dolomito são, filito e marga no modelo desenvolvido com a diferença de uma ordem de grandeza em relação ao valor obtido pelo modelo da MDGEO. O valor utilizado derivou da análise do teste de bombeamento do poço PB-AMBN-03 e por isso foi mantido.

É preciso lembrar que as informações disponíveis, tanto geológicas como hidrogeológicas, estão concentradas nas áreas dos projetos de mina. O grau de certeza dos resultados obtidos se torna menor à medida que nos distanciamos dessas porções.

O modelo desenvolvido é apenas uma das etapas de um trabalho mais amplo. Ele consiste em um modelo em regime permanente do cenário de seca da área estudada. Tem, portanto, o papel de definir as condições iniciais (condutividade hidráulica e distribuição de cargas hidráulicas) para um modelo transiente, que estimará a recarga e o armazenamento das unidades. A partir dessa segunda etapa, pode-se tentar prever com mais certeza o comportamento do aquífero em escala regional frente ao rebaixamento do NA para o desenvolvimento das minas.

9. CONSIDERAÇÕES FINAIS

O trabalho conta com rico banco de dados geológico-hidrogeológico fornecido pela empresa *Nexa Resources*. Essas informações permitiram a realização de análises que foram a base do modelo conceitual do projeto e direcionaram o design do modelo numérico.

De cunho hidrogeológico, foram analisadas as variações do nível d'água subterrâneo e da vazão dos rios, o histórico de precipitações e identificados os poços em bombeamento na área. Esses dados foram importantes para a identificação do contexto hidrogeológico no qual o projeto está inserido, definição dos poços de observação confiáveis para a calibração do modelo e possibilitou inferências acerca do modelo conceitual a ser desenvolvido.

O monitoramento da vazão do rio Santa Rita também permitiu a estimativa do fluxo de base nos trechos onde o rio tem como substrato o filito das Fms. Serra do Garrote e Lapa. Essas análises foram decisivas para a calibração do modelo em regime permanente, pois possibilitou estimar um valor fixo de recarga a ser inserida no modelo numérico.

Também foram coletadas amostras de água para análise de isótopos provenientes da chuva, corpos de água superficiais e poços. Não foi identificada mistura de água subterrânea com superficial dentre as amostras analisadas. Esse fato justifica a premissa de que a principal entrada de água no sistema é a recarga proveniente da chuva, adotada no modelo conceitual e inserida no modelo numérico pela condição de contorno *seepage face*, que anula a entrada de água por rios.

Os dados referentes a testes de aquífero executados permitiu uma análise preliminar do comportamento da derivativa da curva de rebaixamento. Isso possibilitou a inferência de modelos conceituais presentes na área: dupla porosidade no filito e em trechos de dolomito; fratura horizontal em camadas de marga e dolomito da Fm. Morro do Calcário; comportamento de aquífero confinado drenante em dolomito sobreposto por camadas metapelíticas. O estudo também direcionou valores de condutividade hidráulica para diferentes unidades individualizadas no trabalho: dolomito pouco alterado = $9,98E-7$ m/s; filito fraturado = $1,73E-6$ m/s; dolomito e marga alterada = ordem de $10E-5$ m/s.

O modelo conceitual desenvolvido conta com quatro sistemas aquíferos diferentes, são eles: Sistema Aquífero de Coberturas Detríticas; Sistema Aquífero Carbonático; Sistema Aquífero/Aquitardo Pelítico-Carbonático; Sistema Aquífero/Aquitardo Pelítico. Dentro de alguns sistemas foram definidas zonas que apresentam características diversas e por isso optou-se por individualizá-las no modelo geológico e numérico de fluxo. Nesse sentido, a cobertura e o topo do sistema carbonático foi representada pela unidade epicarste; a zona superficial dos

filitos das Fms. Serra do Garrote e Lapa foi representada pela unidade saprólito metapelítico; e a camada superficial dos morros foi diferenciada como dolomitos cimentados por sílex.

De cunho geológico, o projeto contou com fotos e descrições de testemunhos de sondagem, seções geofísicas de resistividade e polarização induzida, mapas e modelos geológicos de cada projeto de mina da região em estudo e ampla consulta bibliográfica da geologia regional. O agrupamento dessas informações culminou na confecção de um modelo geológico regional coerente com o complexo cenário geológico inerente a um ambiente de mineração. A conexão entre o *software* de modelagem geológica Leapfrog e o de modelagem hidrogeológica FEFLOW permitiu a boa tradução da geologia ao modelo numérico de fluxo, o que eleva o grau de confiabilidade do modelo desenvolvido.

A fase de calibração do modelo evidenciou que a porção referente aos projetos Ambrósia Norte e Bonsucesso consistia em uma área com maior condutividade hidráulica em comparação ao projeto de Ambrósia Sul. Delimitou-se assim uma zona de condutividade hidráulica e recarga individualizada nos morros da Fm. Morro do Calcário. Ao modelo conceitual foi assimilada a hipótese de que os morros sustentados pelo sílex sofreram menos com o processo de dissolução, de maneira a apresentar condutividade hidráulica reduzida.

Recomenda-se que sejam realizadas análises aprofundadas dos testes de bombeamento, com a calibração de poços de observação para a definição mais acurada da condutividade hidráulica e identificação do coeficiente de armazenamento das unidades. Também se considera importante a ampliação da coleta de amostras de água para análise isotópica, focando na amostragem da água de poços. Isso possibilitará considerações mais assertivas em relação a conexão do aquífero com os corpos de água superficiais.

9.1. Conclusões

O resultado final do trabalho é um modelo numérico regional calibrado em regime permanente de fluxo. Como tal, ele fornece importantes inferências e estimativas acerca da distribuição de parâmetros hídricos e da dinâmica hídrica regional da área. Como principais produtos alcançados estão: (1) o comportamento do fluxo subterrâneo regional; (2) distribuição geral das cargas hidráulicas; (3) zoneamento regional das condutividades hidráulicas e valores de recarga; e (4) estimativa do balanço de fluxo da região modelada.

Os valores de condutividade hidráulica obtidos são: $3.47E-05$ m/s para a zona do epicarste; $2.55E-06$ para os morros; $5.79E-08$ para o filito pouco alterado das Fms. Serra do Garrote e Lapa; $2.00E-06$ para o saprólito metapelítico que recobre as unidades anteriores; e

9.26E-07 para a marga, filito e dolomito pouco alterado da Fm. Morro do Calcário. Os valores de recarga resultantes considerando uma precipitação média anual de 1034 mm/ano são: 269 mm/ano para o epicarste; 207 mm/ano para os morros; e 41 mm/ano para o saprólito metapelítico.

O balanço de fluxo da área evidencia que 173,7 mm/ano (16,8% da média de chuva) compõe a recarga da área modelada; 26,17 mm/ano (2,53% da média de chuva) corresponde a quantidade de água retirada por poços; e 147,58 mm/ano (14,27% da média de chuva) é o volume descarregado nos rios como fluxo de base.

Os resultados obtidos podem ser considerados representativos das reais condições da área modelada, baseado nas boas correlações entre as cargas hidráulicas reais e computadas (com um NRMSE de 5,8%), e nos baixos coeficientes de sensibilidade, com impacto máximo de 65 cm no RMS quando alterado o parâmetro mais sensível em 20% de seu valor.

Cabe destacar que essa boa calibração só foi possível em um contexto geológico complexo como o caso devido ao desenvolvimento de um modelo geológico robusto e coerente com a geologia regional, traduzido de forma eficaz ao modelo numérico de fluxo. Este trabalho, portanto, evidencia a boa aplicabilidade do *software* Leapfrog para a modelagem hidrogeológica numérica.

Deve-se destacar que o modelo confeccionado consiste apenas na primeira etapa de um trabalho mais amplo. Ele pode ser definido como um modelo em regime permanente de um cenário de seca e consiste na distribuição inicial de carga hidráulica para um modelo transiente. Este deve calcular de forma mais acurada os parâmetros aqui obtidos (principalmente a recarga) e estimar o armazenamento das unidades.

O modelo regional obtido pode ser considerado um bom ponto de partida para a análise do ambiente hidrogeológico onde as minas serão implantadas. Todavia, ressalta-se que ele não é próprio para a estimativa da vazão de drenagem de água necessária para a implantação dos projetos. Para isso, se faz necessário um modelo de mina, com uma área mais restrita; maior detalhamento geológico com resolução para diferenciação de variações de condutividade no interior do epi e endocarste; e utilização de 3ª condição de contorno nos rios principais da área para avaliação do aporte de água do rio para o aquífero com o rebaixamento do lençol freático.

10.REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ALMEIDA, F. F. M. de. Limites do Cráton do São Francisco em Minas Gerais – Síntese dos conhecimentos. In: SIMPÓSIO DO CRÁTON DO SÃO FRANCISCO, 2, Salvador, 1993. **Anais**, Salvador, SBG, p. 256-259, 1993.
- AMARAL G. Contribuição ao conhecimento dos depósitos de Zn-Pb-Cu-Ag da Serra do Poço Verde, Vazante, Estado de Minas Gerais. In: **SBG, Congr. Bras. Geol.**, 22, Belo Horizonte, Anais, 13-31. 1968.
- AMARAL, A. E.; RABELO, W. A.; AMARAL FILHO, G. F. Aproveitamento dos furos de sondagem exploratórios pelo método bucha de compactolit, para implantação de poços para o monitoramento hidrogeológico. **Águas Subterrâneas**, 2014.
- ANDERSON, M. P. & WOESSNER, W. W. **Applied Groundwater Modeling: Simulation of Flow and Advective Transport**. Academic Press, Inc., 381p., London. 1992.
- ANDERSON, M. P. & WOESSNER, W. W. **Applied Groundwater Modeling: simulation of flow and advective transport**. Academic Press, 381p., 2002.
- ANDERSON, M. P. & WOESSNER, W. W. **Applied Groundwater Modeling: Simulation of Flow and Advective Transport**. Academic Press, Inc., 533p., London. 2015.
- ARYAFAR A.; ARDEJANI F. D. Anisotropy and bedding effects on the hydro geological regime in a confined aquifer to design an appropriate dewatering system. **International Journal of Environmental Science & Technology**, 6(4):563–570. 2009.
- AZMY, K.; VEIZER, J.; MISI, A.; OLIVEIRA, T. F. de.; SANCHES. A. L.; DARDENNE, M. A. Dolomitization and isotope stratigraphy of the Vazante Formation, São Francisco Basin, Brazil. **Precambrian Research**, v. 112, p. 303-329, 2001.
- BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO PARACATU. **Portal dos Comitês, Instituto Mineiro de Gestão das Águas (IGAM)**. Disponível em: <http://comites.igam.mg.gov.br/conheca-a-bacia-sf7>>. Acesso em: 14 out. 2017.
- SILVA, A. B.; NETO, A. F. S.; BERTACHINI, A. C. Avaliação da utilização de Modelos Numéricos de Simulação em meio aquífero fraturado. **Águas Subterrâneas**, 1994.
- BÖGLI, A. **Karst hydrology and physical speleology**. Springer Science & Business media, 2012.

- BOURDET, D.; WHITTLE, T. M.; DOUGLAS, A. A.; PIRARD, Y. M. A new set of type curves simplifies well test analysis. **World Oil**, 196:95–106, 1983.
- BREDEHOEFT, J; HALL, P. Ground-water models. **Ground Water**, v. 33, n. 4, p. 530-532, 1995.
- BUTLER J. J.; HEALEY, J. M. Relationship between pumping-test and slug-test parameters: scale effect or artifact? **Ground Water**, 36 (2) (1998), pp. 305-313. 1998a.
- BUTLER J. J.; HEALEY, J. M. Discussion of papers: **authors' reply Ground Water**, 36 (6) (1998), pp. 867-868. 1998b.
- BROWN K.; TROTT S. Groundwater Flow Models in Open Pit Mining: Can We Do Better? **Mine Water and the Environment**, 33(2):187–190. 2014.
- CAMPOS NETO, M. C. Litoestratigrafia e evolução paleogeográfica dos Grupos Canastra e Paranoá (Região Vazante-Lagamar, MG). **Revista Brasileira de Geociências**, v. 14, n 2, p. 81-91, 1984.
- CLAUSER, C. Permeability of crystalline rocks. **Eos, Transactions American Geophysical Union**, v. 73, n. 21, p. 233-238, 1992.
- CHAPADEIRO, E., BANTON, D., LOUREIRO, C., ESPER, J. M., & AMARAL, R. D. Estudos Hidrogeológicos na mina Morro Do Ouro, Paracatu-Mg. **Águas Subterrâneas**. 2006.
- CLARCK, I.; FRITZ, P. **Environmental isotopes in hydrology**. 1997.
- CUNHA, I. de A. **Estudos de inclusões fluidas e de isótopos de enxofre dos corpos de minério de Morro Agudo, Minas Gerais**. 1999. Tese de Doutorado. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal da Bahia.
- CUNHA, IONÁ DE ABREU; COELHO, CARLOS EDUARDO SILVA; MISI, AROLD. Fluid inclusion study of the Morro Agudo Pb-Zn deposit, Minas Gerais, Brazil. **Revista Brasileira de Geociências**, v. 30, n. 2, p. 318-321, 2017.
- CVIJIĆ, J. **Das karstphänomen: Versuch einer morphologischen monographie**. Hölzel, 1893.
- DARDENNE, M. A. & FREITAS-SILVA, F. H. Modelos genéticos dos depósitos de Pb e Zn nos grupos Bambuí e Vazante. **Workshop Depósitos Minerai s Brasileiros de Metais Base**, Salvador, CPGG-UFBA/ADIMB, p. 83-96, 1998.

DARDENNE, M. A. The Brazilian Fold Belt. In: CORDANI, U. G.; THOMAS FILHO, A.; CAMPOS D. A. (eds). **Tectonic evolution of South America**, Rio de Janeiro; INTERNATIONAL GEOLOGICAL CONGRESS, 31, p. 231-263, 2000.

DARDENNE, M. A.; SCHOBENHAUS, C. **Metalogênese do Brasil**. UNB; CPRM, 2001.

DARDENNE, M. A. Litostratigraphic sedimentary sequences of the Vazante Group. In: MISI, A. & TEIXEIRA, J. B. G. (org.) **Proterozoic base metal deposits of Africa and South America. Contributions presented at the first Field Workshop, International Geological Correlation programme 450**, Belo Horizonte, CNPq/ UNESCO/IUGS, p. 48-50, 2001.

DIERSCH, H.J.G. **FEFLOW finite element subsurface flow and transport simulation system - user's manual**, Release 5.0. Wasy, Berlin, Germany. 2002.

FAURE, G.; MENSIN, T. M. **Isotopes: principles and applications**. Wiley-Blackwell, 2005.

FEDERAL, BRASIL–Governo. Minas Gerais–Governo do Estado. Distrito Federal. **Plano diretor de recursos hídricos da bacia do rio Paracatu–PLANPAR**. SI, v. 1, 1996.

FEITOSA, F. A. C.; COSTA FILHO, W. D. **Execução de testes de bombeamento em poços tubulares: manual prático de orientação**. CPRM, 1998.

FETTER, C. W. **Applied Hidrogeology**, 4a edicao, Prentice Hall, New Jersey, 598 f, 2001.

FLOWTRACKER:

Disponível em: <http://www.clean.com.br/Produto/Detalhe/53>

Acesso em: 30/09/18.

FORD, D. C.; WILLIAMS, P. W. **Karst geomorphology and hydrology**. London: Unwin Hyman, 1989.

FREEZE, A.; J. A. CHERRY. **Groundwater**. Prentice Hall, Inc., Eaglewood Cliffs, New Jersey, 604 p., 1979.

FREITAS-SILVA F. H. & DARDENNE M. A. Pb/Pb isotopic patterns of galenas from Morro do Au (Paracatu Formation), Morro Agudo/Vazante (Vazante Formation) and Bambuí Group deposits in **South American Symposium on Isotope Geology**, I, Campos de Jordão, Extended Abstracts, p 118-120. 1997.

FUCK, R. A. A Faixa Brasília e a compartimentação tectônica da Província Tocantins. In: SIMPÓSIO DE GEOLOGIA DO CENTRO-OESTE, 4., Brasília, 1994. **Anais**. Brasília, SBG, p. 184-187, 1994.

GASPAR, M. T. P. **Sistema Aquífero Urucua: Caracterização Regional e Propostas de Gestão**. Tese de Doutorado. Instituto de Geociências da Universidade de Brasília. 158p. 2006.

GONÇALVES, R. D. **Simulação numérica de fluxo de águas subterrâneas na bacia do Rio Grande (BA)**. Trabalho de Conclusão de Curso. 2013.

HSIEH, P.A. Scale effects in fluid flow through fractured geologic media. In: **Sposito, G. (Ed.), Scale Dependence and Scale Invariance in Hydrology**. Cambridge University Press, Cambridge, pp. 335–353. 1998.

ILLMAN, W.A., Strong field evidence of directional permeability scale effect in fractured rock. **J. Hydrol.** 319, 227–236. 2006.

IYER, S, S.; HOEFS, J.; e KROUSE, H. Sulfur and lead isotope geochemistry of galenas from Bambui Group, Minas Gerais, Brazil – Implication for ore genesis: **Econ. Geol.**, 87, 437-443. 1992.

KARMANN, I. **Carste e cavernas no Brasil: distribuição, dinâmica atual e registros sedimentares, breve histórico e análise crítica das pesquisas realizadas no âmbito do IGC USP**. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo. 1994.

KIRALY, L. **La notion d'unité hydrogéologique dans le Jura (essai de définition)**. Thèse Doct. Sciences. University of Neuchâtel. 1978.

KIRÁLY, L. Rapport sur l'état actuel des connaissances dans le domaine des caractères physiques des roches karstiques. Hydrogeology of karstic terrains (Hydrogéologie des terrains karstiques) **International Union of geological sciences**, n. 3, p. 53-67, 1975.

KOLM, K. E. Conceptualization and characterization of ground-water systems using Geographic Information Systems. In: **Remote Sensing and GIS for Site Characterization: Applications and Standards**. ASTM International, 1996.

LAMOUREUX, M. **Étude de sols formés sur roches carbonatées: pédogenèse fersiallitique au Liban**. Tese de Doutorado. Orstom. 1972.

LE BORGNE, T., BOUR, O., PAILLET, F.L., CAUDAL, J.-P. Assessment of preferential flow path connectivity and hydraulic properties at single-borehole and crossborehole scales in a fractured aquifer. **J. Hydrol.** 328 (1–2), 347–359. 2006a.

MARÉCHAL, J.C., DEWANDEL, B., SUBRAHMANYAM, K. Use of hydraulic tests at different scales to characterize fracture network properties in the weathered fractured layer of a hard rock aquifer. **Water Resour. Res.** 40, W11508. 2004.

MARÉCHAL, J. C. et al. Interpretation of pumping tests in a mixed flow karst system. **Water Resources Research**, v. 44, n. 5, 2008.

MARTINEZ-LANDA, L.; CARRERA, J. An analysis of hydraulic conductivity scale effects in granite (Full-scale Engineered Barrier Experiment (FEBEX), Grimsel, Switzerland). **Water Resources Research**, v. 41, n. 3, 2005.

MISI, A.; IYER, S. S.; TASSINARI, C. C. G. Boquira (2.5 GA) and Morro Agudo (0.65 GA) Lead-Zinc Deposits, Brazil New SEDEX Subtypes? In **XXXIX Congresso Brasileiro de Geologia**, IGCP Project 342 Ages and Isotopes of South American Ores. Resumos extendidos v p251-253. 1996.

MISI, A.; VEIZER, J.; KAWASHITA, K.; DARDENNE, M. A. The age of the Neoproterozoic carbonate platform sedimentation based on $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ determinations, Bambuí and Uma Groups, Brazil. **SOUTH AMERICAN SYMPOSIUM ON ISOTOPE GEOLOGY**, 1., Campos do Jordão, 1997. **Extended abstracts**. Campos do Jordão, p. 199-200, 1997b.

MISI, A. **Geological and isotopic constraints on the metallogenic evolution of the Proterozoic sediment-hosted Pb-Zn (Ag) deposits of Brazil**. 1999.

MOENCH, A. F. Double-porosity models for a fissured groundwater reservoir with fracture skin. **Water Resources Research**, v. 20, n. 7, p. 831-846, 1984.

MONTEIRO, L. V. S. **Modelamento metalogenético dos depósitos de zinco de Vazante, Fagundes e Ambrósia, associados ao Grupo Vazante, Minas Gerais**. 2002, Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo.

NASCIMENTO, G. C. S. **Modelo conceitual e numérico do aquífero hospedeiro de depósito polimetálico – Caçapava do Sul: relações entre lavra e recursos hídricos subterrâneos**. Tese de Mestrado. Brasília, 2015.

NEUMAN, S. P. Theory of flow in unconfined aquifers considering delayed response of the water table. **Water Resources Research**, v. 8, n 4, p. 1031-1045, 1972.

NEUMAN, S. P.; WINTER, C. L.; NEWMAN, C. M. Stochastic theory of field-scale Fickian dispersion in anisotropic porous media. **Water Resources Research**, v. 23, n. 3, p. 453-466, 1987.

NEUMAN, S.P., DI FEDERICO, V. Multifaceted nature of hydrogeologic scaling and its interpretation. **Rev. Geophys.** 41 (3), 1014. 2003.

NEUMAN, S.P., Comment on ‘Some comments on the scale dependence of the hydraulic conductivity in the presence of nested heterogeneity’ by A.G. Hunt. **Adv. Water Resour.** 26, 1213. 2003.

PALMER, A. N. Origin and morphology of limestone caves. **Geological Society of America Bulletin**, v. 103, n. 1, p. 1-21, 1991

PANKOW, J. F. et al. An evaluation of contaminant migration patterns at two waste disposal sites on fractured porous media in terms of the equivalent porous medium (EPM) model. **Journal of Contaminant Hydrology**, v. 1, n. 1-2, p. 65-76, 1986.

REILLY, Thomas E.; HARBAUGH, Arlen W. **Guidelines for evaluating ground-water flow models**. US Department of the Interior, US Geological Survey, 2004.

RENARD, P. Hydraulics of well and well testing. In: Anderson MG (ed) **Encyclopedia of hydrological sciences**. Wiley, New York, pp 2323–2340, 2005b.

RENSHAW, C.E. Sample bias and the scaling of hydraulic conductivity in fractured rock. **Geophys. Res. Lett.** 25. 1998.

RIGOBELLO, A. E.; BRANQUINHO, J. A.; DANTAS, M. G.; OLIVEIRA, T. F. de; NEVES FILHO, W. Mina de Zinco de Vazante. In: SCHOBENHAUS, C. & COELHO, C. E. S. (coords). **Principais depósitos minerais do Brasil**. DNPM, v. 3, p. 101-110, 1988.

RUBIO R. F. 2006. A Gestão dos recursos hídricos e a mineração: visão internacional, in Domingues, A.F., Helena, P., and Bóson, G. eds., **A Gestão dos recursos hídricos e a mineração**, ANA, Brasília - DF, p. 337.

SHOEMAKER, W. Barclay et al. Effects of turbulence on hydraulic heads and parameter sensitivities in preferential groundwater flow layers. **Water resources research**, v. 44, n. 3, 2008.

SPITZ, K.; MORENO, J. A **Practical Guide to Groundwater and Solute Transport Modeling**. John Wiley & Sons, New York, 461 p., 1996.

THOMAZ FILHO, A.; KAWASHITA, K.; CORDANI, U. G. A origem do Grupo Bambuí no contexto da evolução geotectônica e de idades radiométricas.. **Anais da Academia Brasileira de Ciências**, v. 70, p. 527-548, 1998.

WANG, H. F. e ANDERSON, M. P. **Introduction to Groundwater Modeling: Finite Difference and Finite Element Methods**. San Diego, California, USA: Academic Press. 237 p., 1982.

WHITE, W. B. **Conceptual models for karstic aquifers**. 1977.

WILLIAMS, P. W. Subcutaneous hydrology and the development of doline and cockpit karst. **Zeitschrift fur Geomorphologie**, v. 29, n. 4, p. 463-482, 1985.

YOUNGER P.; WOLKERSDORFER C. Mining Impacts on the Fresh Water Environment: Technical and Managerial Guidelines for Catchment Scale Management. **Mine Water and the Environment**, 23(1):s2–s80. 2004.

WORTHINGTON, M. H.; LUBBE, R. The scaling of fracture compliance. Geological Society, London, **Special Publications**, v. 270, n. 1, p. 73-82, 2007.

ZLOTNIK, V.A., ZURBUCHEN, B.R., PTAK, T., TEUTSCH, G., Support volume and scale effect in hydraulic conductivity: experimental aspects. In: Zhang, D., Winter, C.L. (Eds.), Theory, Modelling, and Field Investigation in Hydrogeology: A Special Volume in Honor of Shlomo P. Neuman's 60th Birthday: Boulder, CO **Geological Society of America Special Paper** 348, pp. 191–213. 2000.