



**UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA  
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM GEOCIÊNCIAS APLICADAS**

**Dissertação de Mestrado Nº 091**

**MODELO CONCEITUAL E NUMÉRICO DO AQUÍFERO HOSPEDEIRO DE  
DEPÓSITO POLIMETÁLICO - CAÇAPAVA DO SUL: RELAÇÕES ENTRE  
LAVRA E RECURSOS HÍDRICOS SUBTERRÂNEOS**

**Área de Concentração: Hidrogeologia e Meio Ambiente**

**Gustavo Catão Silva Nascimento**

**Orientador: José Eloi Guimarães Campos**

**BRASÍLIA, DEZEMBRO DE 2015.**



**UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA  
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM GEOCIÊNCIAS APLICADAS**

**Dissertação de Mestrado Nº 091**

**MODELO CONCEITUAL E NUMÉRICO DO AQUÍFERO HOSPEDEIRO DE  
DEPÓSITO POLIMETÁLICO - CAÇAPAVA DO SUL: RELAÇÕES ENTRE  
LAVRA E RECURSOS HÍDRICOS SUBTERRÂNEOS**

**Gustavo Catão Silva Nascimento**

Banca Examinadora:

Prof. Dr. **José Eloi Guimarães Campos** (IG/UnB)

Prof. Dr. **Luiz de Almeida Prado Bacellar** (UFOP)

Prof. Dr. **Luciano Soares da Cunha** (UnB)

**BRASÍLIA, DEZEMBRO DE 2015.**

## AGRADECIMENTOS

Ao Professor Eloi Campos, que me “suportou” em todos os momentos e de todas as formas possíveis. Pela simplicidade no trato do dia-a-dia, por me receber em sua casa quando necessário e por sempre me estimular, fazendo de tudo quanto possível, para que eu chegasse ao final desta dissertação.

Ao professor Jérémie Garnier pela disponibilidade de realização das análises químicas mesmo com todos os infortúnios.

Ao recém “Dr” Paulo Charbel, por uma lista de coisas que se as colocassem neste texto, este tópico provavelmente ficaria maior que toda a dissertação. Não tenho palavras para agradecer sua amizade e companheirismo.

À Aparecida Dias, pela paciência nos meus momentos “mais ranzinza” (que não foram poucos) e pelo carinho que me foi dedicado até este momento.

À Votorantim Metais, que me ajudou na disponibilização dos dados, e na logística para desenvolvimento deste trabalho. Aos colegas Samuel Lago, Rodrigo Travassos, Paul Cézanne e Alessandro Santos por sempre se mostrarem solícitos para com meus pedidos e me ajudarem sempre, em tudo que fosse possível. Aos técnicos Lisandro, e Victor Facundo por absorverem em suas rotinas tarefas extras que forneceram dados indispensáveis para realização desta Dissertação. À Debora Fernandes, nas fases iniciais, pelo estímulo de desenvolver o trabalho juntamente com sua equipe. Aos meus gerentes, Apolo e Vanio e aos colegas de setor que foram cúmplices nos dias em que precisei faltar ao serviço e sempre tiveram total disposição em me ajudar. Ao técnico Daniel Pereira, por se disponibilizar a ir à área do projeto em algumas campanhas de campo. À Camila Afonso, pela ajuda já na reta final. À todos os funcionários da Votorantim Vazante que de alguma forma, direta ou indiretamente, me ajudaram.

Aos funcionários da Hidrovia Hidrogeologia e Meio Ambiente que proporcionaram em alguns momentos discussões sobre a hidrogeologia da área.

À minha família, por entender os momentos em que estive ausente.

## RESUMO

Este trabalho constituiu um Estudo de Reconhecimento e procurou fornecer informações relevantes para o gerenciamento dos recursos hídricos com a instalação de uma mina de zinco e chumbo pela Votorantim Metais S/A no município de Caçapava do Sul, estado do Rio Grande do Sul. Foi concebido um modelo conceitual para área de estudo utilizando-se metodologias não clássicas e foi também implementado um modelo matemático numérico para simulação do máximo rebaixamento que poderá ser aplicado na área, tendo em vista o plano de lavra fornecido pela empresa e o modelo conceitual proposto. As simulações foram realizadas no software FEFLOW<sup>®</sup>, que utiliza solução numérica pelo método de elementos finitos.

Foram realizadas análises em duas abordagens, uma determinística em que foram considerados os valores médios dos parâmetros coletados em campo, e outra probabilística segundo o Método das Estimativas Pontuais.

A integração de todos os dados e resultados permitiu propor um modelo aquífero do tipo fraturado e que apresentam recargas e valores de condutividade hidráulica modestos, respectivamente, da ordem de 5% da precipitação e  $10^{-8}$  m/s.

Além disto, foi possível determinar a área de influência do rebaixamento chegando a um valor de 7 a 11km<sup>2</sup> oriundo de um bombeamento de cerca de 80m<sup>3</sup>/h estimado pelo método determinístico e de 42m<sup>3</sup>/h pelo Método das Estimativas Pontuais. Verificou-se ainda que o impacto se restringirá às pequenas microbacias de entorno do local onde pretende-se instalar a cava principal da mina, foi estimada uma redução de vazão nos cursos d'água de cerca de 40%, pelo método determinístico e 32% pelo método probabilístico.

**Palavras-chave:** água subterrânea e mineração, modelo conceitual, modelo numérico, elementos finitos.



## ABSTRACT

The present research constitutes a Initial Study and looks forward to provide relevant information for the Water Resources Management with the possibility of installation of a zinc and lead mine by the Votorantim Metais S/A in the city of Caçapava do Sul, Rio Grande do Sul state. A conceptual model was designed to the studied area using non-classic methods and a mathematical numerical model was implemented in order to simulate the maximum water table drawdown that may be applied in the area, owing to the mining plan provided by the company and conceptual model proposed. The simulations were done with the software FEFLOW® by the finite element method.

Two different approaches were performed, one deterministic which considered the average values for the parameters collected on the field, and the other probabilistic according to the Point Estimate Method.

The integration of all data and outcomes resulted in a fractured aquifer model. This model presents recharges and low hydraulic conductivity values, around 5% of precipitation and  $10^{-8}$  m/s, respectively.

Furthermore, it was possible to determine the water drawdown influence area, that goes from 7 up to 11 km<sup>2</sup> resulted from an estimated pumping of 80m<sup>3</sup>/h provided by the deterministic method and 42m<sup>3</sup>/h by the Point Estimate Method. In addition, it was possible to verify that the impact will be restricted to the micro basins surrounding the pit area. The flow reduction in streams is around 40% by the deterministic method and 32% by the probabilistic method.

**Keywords:** Groundwater and mining, conceptual model, numerical model, finite elements.

## SUMÁRIO

<b>CAPÍTULO 1- APRESENTAÇÃO E FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA .....</b>	<b>1</b>
1.1 Apresentação .....	1
1.2 Objetivos .....	3
1.3 Justificativa .....	4
1.4 Fundamentação Teórica .....	4
1.4.1 <i>Modelagem de Aquíferos</i> .....	4
1.5 Análise Sobre Gestão de Recursos Hídricos em Contexto de Áreas De Mineração .....	17
<b>CAPÍTULO 2- CONTEXTUALIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO .....</b>	<b>21</b>
2.1 Contexto Geológico .....	21
2.2 Hidrografia .....	31
2.3 Solos .....	33
2.4 Geomorfologia .....	35
2.5 Clima .....	36
<b>CAPÍTULO 3- MODELO CONCEITUAL DOS AQUÍFEROS .....</b>	<b>40</b>
3.1 Considerações Gerais .....	40
3.2 Caracterização Do Aquífero .....	41
3.3 Medição de Vazão Em Cursos D'água .....	43
3.4 Inventário de Nascentes .....	45
3.5 Porosidade .....	53
3.6 Condutividade Hidráulica .....	57
3.7 Nível D'água .....	60
3.8 Síntese do Modelo Conceitual .....	63
<b>CAPÍTULO 4- MODELAGEM MATEMÁTICA NUMÉRICA DO AQUÍFERO .....</b>	<b>66</b>
4.1 Implementação do Modelo Numérico .....	66
4.2 Discretização do Meio Físico .....	68
4.3 Condições de Contorno .....	70
4.4 Condutividade Hidráulica .....	71
<b>CAPÍTULO 5-DISCUSSÃO E INTEGRAÇÃO DOS DADOS .....</b>	<b>76</b>
5.1 Calibração em Regime Permanente .....	76
5.2 Simulação do Máximo Rebaixamento .....	84
5.2.1 <i>Vazão e Área de Influência do Rebaixamento Do N.A.</i> .....	83
5.2.2 <i>A Questão da Vazão em Cursos D'água</i> .....	90

<b>CAPÍTULO 6-CONSIDERAÇÕES FINAIS, CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES .....</b>	<b>92</b>
<b>6.1 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	<b>97</b>
<b>7 ANEXO .....</b>	<b>101</b>
ANEXO 7.1 - Dados das estações fluviométricas	
ANEXO 7.2 - Dados das nascentes Inventariadas	
ANEXO 7.3- Lâminas MLA	
ANEXO7.4 - Gráficos - Slug Test	

## LISTA DE FIGURAS

<b>Figura 1.1-</b> Localização da área no contexto geográfico do estado do Rio Grande do Sul. ....	2
<b>Figura 2.1</b> - Figura representando a geologia regional da região estudada. Modificado de Almeida (2005). ....	22
<b>Figura 2.2</b> -Mapa geológico local da área de estudo. ....	24
<b>Figura 2.3</b> -Seção esquemática integrada incluindo a seção superior do Grupo Santa Bárbara nas proximidades da localidade de Minas do Camaquã. ....	28
<b>Figura 2.4</b> -Exposição de conglomerados clasto-suportado e matriz-suportado estratificados com arenitos maciços da Formação Rincão dos Mouras. ....	28
<b>Figura 2.5</b> - Fácies de conglomerado clasto-suportado com fragmentos subarredondados de granito, gnaiss, quartzito, quartzo de veio e basalto. ....	29
<b>Figura 2.6</b> - Exemplo de testemunho de sondagem que intercepta conglomerados, arenitos e grauvacas em diferentes profundidades. ....	29
<b>Figura 2.7</b> -Detalhe de fácies de conglomerado com acamamento difuso e mal selecionamento (clasto de basalto maior que 10 cm na porção central da imagem associado a outros fragmentos líticos sub centimétricos). ....	30
<b>Figura 2.8</b> -Exposição de arenito do Grupo Guaritas, com mergulho de cerca de 12°, cor rosada avermelhada típica de <i>redbeds</i> , intenso fraturamento e exposições com esfoliações esferoidais devido ao elevado grau de compactação mecânica da rocha. ....	30
<b>Figura 2.9</b> -Hidrografia da área de estudo. ....	31
<b>Figura 2.10</b> -Distribuição dos tipos de solos na região. Modificado de Hansen & Fensterseifer (2000). ....	33
<b>Figura 2.11</b> -Aspecto do solo típico do local onde será instalado o empreendimento. Neossololítico em contato lítico ou com sequência de horizontes A-C-R entre exposições rochosas. ....	34
<b>Figura 2.12</b> - Frequência de ocorrência da precipitação anual total. ....	37
<b>Figura 2.13</b> -Representação gráfica da distribuição da precipitação ao longo dos meses de 1977 a 2008. ....	37
<b>Figura 2.14</b> -Precipitação diária e mensal de 14/04/2014 a 24/08/2015. ....	38
<b>Figura 2.15</b> -Precipitação mensal no período entre julho/2014 a Jun/2015 ....	38
<b>Figura 3.1</b> -Localização e quantificação das vazões nos cursos d'água de entorno da área do projeto. ....	43
<b>Figura 3.2</b> -Ilustração de uma seção idealizada de um canal natural com distribuição de área para realizar medidas de vazão. Modificado de Diego (2007), onde: <b>Loc</b> - Subdivisão unitária da seção do rio (limite das estações de medida); <b>Vel</b> - Ponto onde deve ser medida a velocidade; ....	44
<b>Figura 3.3</b> -Distribuição das nascentes inventariadas. ....	45
<b>Figura 3.4</b> - Nascente NA-24b cadastrada na área do projeto com relativa alta vazão. Modificado de Hidrovia (2014). ....	46
<b>Figura 3.5</b> - Nascente NA-62 cadastrada na área do projeto com relativa alta vazão. Modificado de Hidrovia (2014). ....	46
<b>Figura 3.6</b> -Nascente NA-31 com vazão relativamente elevada cadastrada na área do projeto. Modificado de Hidrovia (2015). ....	47
<b>Figura 3.7</b> - Nascente NA-64 com vazão relativa pequena cadastrada na área do projeto. Modificado de (Hidrovia 2015) ....	47
<b>Figura 3.8</b> - Distribuição das nascentes bem como os dados interpolados de Condutividade Elétrica - 2ª Campanha. Modificado de Hidrovia (2015). ....	51
<b>Figura 3.9</b> -Distribuição das nascentes bem como os dados interpolados de pH - 2ª Campanha. Modificado de Hidrovia (2014). ....	52
<b>Figura 3.10</b> - Imagens MLA da amostra PCA37910 171 referente ao furo PC-A3-79-10 em uma profundidade inclinada de 171m. ....	54
<b>Figura 3.11</b> -Frequência distribuída e frequência acumulada de valores de porosidade intergranular encontrada em lâminas de vinte amostras de rocha retirada do maciço estudado. ....	56
<b>Figura 3.12</b> -No centro da figura encontra-se um furo usado para monitoramento de nível d'água instalado na área do projeto. A boca do furo foi revestida com tubo de PVC. ....	56
<b>Figura 3.13</b> -Esquema de cálculo de condutividade hidráulica modificado de Gilg & Gavard (1957). ....	57
<b>Figura 3.14</b> -Exemplo de dados de nível de água monitorado durante os ensaios de "Slug Test". Os gráficos dos demais ensaios constam do Anexo 7.4. ....	58
<b>Figura 3.15</b> -Dispositivo para averiguação da profundidade desobstruída de um furo da rede de monitoramento. ...	59
<b>Figura 3.16</b> - Dados de nível d'água dos indicadores de nível d'água (furos transformados em medidores de nível). ....	60
<b>Figura 3.17</b> - Dados de nível d'água dos indicadores de nível d'água (furos transformados em medidores de nível) ....	61
<b>Figura 3.18</b> -Distribuição da superfície potenciométrica na área de estudo. Potenciometria construída a partir de poços de monitoramento e cotas de nascentes (Maio de 2015). ....	62
<b>Figura 3.19</b> -Bloco diagrama do modelo conceitual de fluxo. Setas de diferentes tamanhos mostram os sistemas de fluxo locais (pequenas) e fluxo intermediário (maiores). ....	64
<b>Figura 4.1</b> - Vista 2D da malha do modelo na qual se distribuem mais de 18.000 elementos. ....	68

<b>Figura 4.2-</b> Vista tridimensional do modelo, considerando o relevo e as variações de espessuras obtidas a partir de dados de RQD de sondagens rotativas. ....	68
<b>Figura 4.3</b> - Principais condições de contorno do modelo. ....	69
<b>Figura 4.4-</b> Disposição em planta dos Elementos Discretos, bidimensionais. ....	71
<b>Figura 4.5</b> - Diagrama de caixas referente aos valores de condutividade hidráulica coletados em campo e Histograma de distribuição dos dados de condutividade hidráulica .....	74
<b>Figura 5.1</b> - Gráfico representando os ajustes encontrados nas diferentes calibrações. ....	76
<b>Figura 5.2</b> - Nível d'água resultante da calibração de $K_{\mu}$ .....	78
<b>Figura 5.3</b> - Cotejo entre os níveis d'água estimado pelos instrumentos e nascentes e o calculado pelo modelo numérico. ....	78
<b>Figura 5.4-</b> Zonas onde foram aplicadas a rotina Taxa de Balanço para calculo do quanto é retirado do modelo pela condição de condição de contorno Tipo 1 (Dirichlet-type BC).....	81
<b>Figura 5.5-</b> Vazões totais das nas vertentes E e W da zona mineralizada. ....	82
<b>Figura 5.6-</b> Cargas hidráulicas resultantes do modelo, calibração e da simulação respectivamente. Exemplo referente ao modelo com valor $k=k_{\mu}$ . ....	84
<b>Figura 5.7-</b> Vazão de bombeamento para desaguamento da Cava 3. ....	85
<b>Figura 5.8-</b> Representação gráfica do risco de ocorrência de descarga na Cava 3. ....	86
<b>Figura 5.9-</b> Nível d'água resultante e área de influência do rebaixamento. ....	87
<b>Figura 5.10</b> - Cotejo entre às áreas de influência do rebaixamento do nível d'água simulado nos três modelos ( $k_{\mu}$ , $k+$ e $k-$ ).....	88
<b>Figura 5.11-</b> Percentuais de supressão nas vertentes oeste e leste da zona mineralizada. ....	90
<b>Figura 5.12-</b> Percentuais e volumes horários suprimidos considerando todas microbacias avaliadas. ....	90
<b>Figura 6.1</b> - Furos de drenagem usualmente realizados por dentro de válvulas chumbadas à rocha, para desaguamento de mina (Mina de Zinco de Vazante - Votorantim Metais S/A). ....	93

# CAPÍTULO 1

## APRESENTAÇÃO E FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

### 1.1 APRESENTAÇÃO

A área alvo do estudo consiste de um depósito polimetálico (Pb+Zn+Ag(Cu±Au)) localizado na porção sul do Escudo Sul Rio Grandense, denominado de Projeto Santa Maria no qual predominam unidades de rochas vulcânicas e sedimentares, formadas entre o Neoproterozoico e o Eopaleozoico, pertencentes ao Supergrupo Camaquã. A região em apreço encontra-se a 5 km das Minas do Camaquã (atualmente desativadas), no município de Caçapava do Sul, estado do Rio Grande do Sul (Figura 1.1).

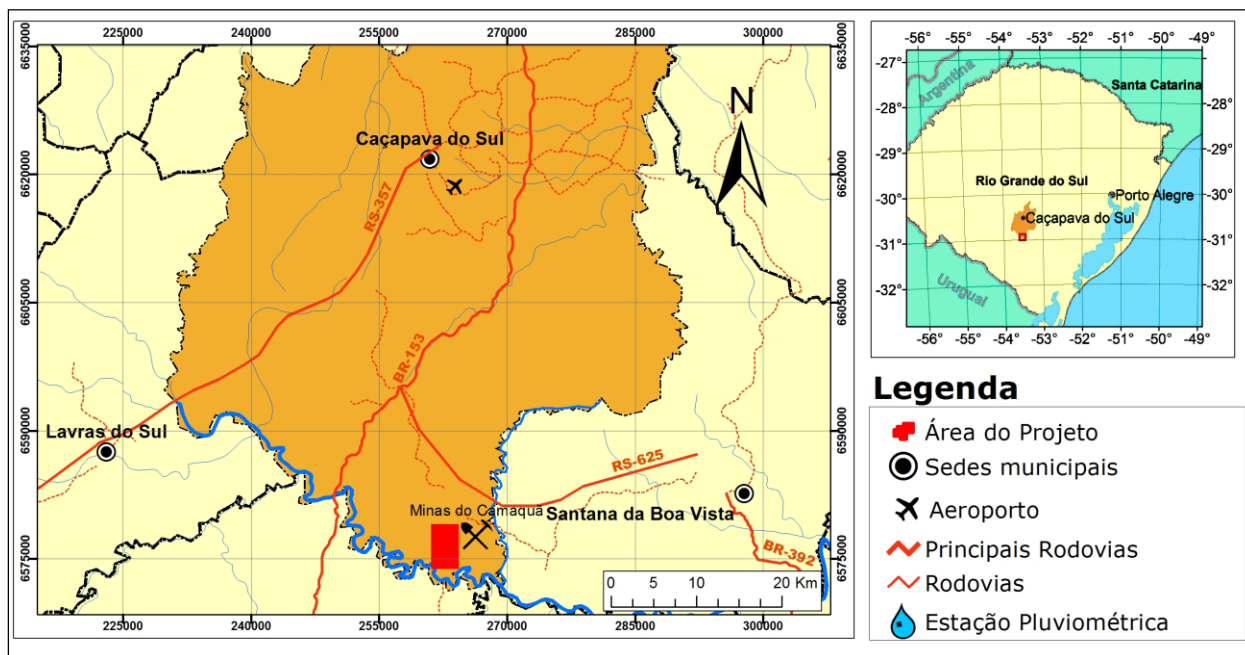
A ocorrência de depósitos metálicos nesta região são conhecidos desde 1870, período em que jazimentos de cobre foram descobertos por garimpeiros ingleses que outrora prospectavam naquela região. Em 1888 deu-se o início da extração de cobre por mineiros ingleses e belga sem um prolongamento do corpo de minério a que viriam a serem lavrados posteriormente nas Minas do Camaquã, atualmente inativas. Em 1942 as atividades exploratórias ficaram a cargo da recém criada CBC (Companhia Brasileira de Cobre) resultante de uma parceria entre o Governo do Estado do Rio Grande do Sul e o Grupo Pignatari.

A descoberta do depósito de Santa Maria remonta ao período de 1974 a 1988, ocasião em que a direção das citadas minas ficava sob a responsabilidade do BNDS.

O encerramento das atividades mineiras se deu em 1996. Neste período as operações da mina estavam sendo conduzidas por antigos funcionários da CBC (Grupo Bom Jardim).

Em 2008 com os direitos minerários adquiridos pela Votorantim Metais novas campanhas de exploração foram desenvolvidas no alvo denominado de Projeto Santa Maria (cuja localização encontra-se em fazenda homônima). A partir de então, foi concebido um novo modelo de mineralização com base no adensamento dos dados adquiridos das antigas detentoras dos direitos minerários e com isto foi constatada viabilidade econômica do projeto.

Devido ao posicionamento do corpo mineralizado no maciço, será necessário para sua extração o rebaixamento do nível d'água para permitir o desaguamento do aquífero local.



**Figura 1.1-** Localização da área no contexto geográfico do estado do Rio Grande do Sul.

Neste contexto, são propostos estudos para reconhecimento das variáveis intervenientes no fluxo subterrâneo natural dos sistemas aquíferos nos quais se insere a mineralização, bem como a previsão de possíveis impactos que poderão ocorrer em uma condição de *stress* futura ocasionada pelo processo de desaguamento do aquífero que deverá ser necessário.

Assim com base no sistema de monitoramento desenvolvido será possível compreender como se dá e quais são os controles dos fluxos d'águas superficiais e subterrâneos. Os dados ainda serviram para construção do modelo numérico computacional desenvolvido pela metodologia de elementos finitos, com auxílio do software FEFLOW®.

Em mineração, o conhecimento dos fluxos subterrâneos é fundamental para dar subsídio tanto na implantação de um projeto quanto no decorrer de sua operação. A modelagem matemática de aquíferos é utilizada como ferramenta auxiliar no gerenciamento dos recursos hídricos subterrâneos e oferecer meios de realizar previsões sobre as consequências das ações que serão aplicadas sobre os recursos de forma a alertar sobre detalhes não considerados previamente (Cabral *et al.* 2008).

Dois aspectos principais podem ser levados em conta na concepção destes modelos aplicados à mineração. O primeiro aspecto a ser considerado são os operacionais. Um bem mineral pode encontrar-se abaixo do nível freático o que torna necessária a implantação de um sistema de rebaixamento do nível d'água para desaguamento do aquífero de forma a permitir que sua exploração ocorra em "meio seco". A realização do modelo hidrogeológico da área onde se pretende instalar o empreendimento minerário pode fornecer dados para aprimorar o dimensionamento do sistema de rebaixamento. Isto evitaria desperdício com superdimensionamento do sistema de bombeamento ou surpresas desagradáveis, como uma

entrada de água no sistema acima do previsto, o que poderia prejudicar o desenvolvimento das atividades.

Os modelos podem ser de dois tipos, conceituais ou matemáticos computacionais. O primeiro tem um caráter qualitativo e se aplica à representação dos fluxos subterrâneos de forma simplificada com base nas informações coletadas em campo, tais como, sistemas aquíferos existentes, levantamentos dos pontos de recarga e descarga, nível d'água, etc.

Já os modelos numéricos computacionais são representações, através de equações matemáticas, do meio hídrico subterrâneo. Este tipo de modelo pode ser muito útil em análises mais complexas dos aquíferos e tem a finalidade de expandir a capacidade do hidrogeólogo no gerenciamento dos recursos hídricos superficiais/subterrâneos. São dois os principais objetivos: o de previsão e o de interpretação. No primeiro caso, o modelo é usado para prever a resposta do aquífero a uma determinada situação de stress. No segundo, procura-se entender o funcionamento do aquífero (Cabral *et al.* 2008). Cabe ressaltar que o modelo computacional, só vai representar com fidelidade a realidade física se o modelo conceitual for bem construído, ou seja, este tipo de modelo não existe (ou não deve existir) sem o primeiro.

## 1.2 OBJETIVOS

O objetivo central deste trabalho é apresentar um modelo conceitual e um modelo numérico para o aquífero da futura área de lavra.

Para se alcançar o objetivo será necessário desenvolver metas específicas incluindo:

- Determinar os tipos de porosidade dos meios geológicos, além de seu valor médio;
- Determinar a condutividade hidráulica da zona saturada do aquífero;
- Verificar as condições de circulação de água no aquífero com a definição dos diferentes sistemas de fluxo hidrogeológico;
- Determinação das condições de contorno e recarga para a implementação do modelo numérico.

A concepção de um modelo conceitual/numérico para a área do Projeto Santa Maria tem como finalidade primordial a de apresentar, por meio de simulação computacional, um prognóstico dos impactos gerados em cursos e pontos d'água de entorno do futuro empreendimento com o início do desaguamento de mina e rebaixamento do nível d'água. Além disto, servirá para quantificar o volume de água a ser bombeado de forma a subsidiar a concepção de um sistema de rebaixamento.



### **1.3 JUSTIFICATIVA**

A questão da configuração e disponibilidade do recurso hídrico subterrâneo poderá ser uma variável relevante, ou até mesmo fundamental, no que tange à sustentabilidade de um empreendimento minerário. A relação entre a mina e o meio hídrico subterrâneo pode se dar de forma direta, seja pela necessidade nos processos e atividades do empreendimento em si, em caso de baixa disponibilidade e/ou dificuldade de captação das águas superficiais, seja pela sua interação do ponto de vista operacional/ambiental, no caso em que houver a necessidade de desaguamento da mina para viabilizar a produção.

Não há dúvida que o reconhecimento prévio do meio hídrico subterrâneo deve ser desenvolvido desde o Estudo de Viabilidade e Engenharia Conceitual até o encerramento do empreendimento, pois deverá ficar bem definido como será a melhor maneira e qual será o custo do gerenciamento deste recurso até o término de suas atividades.

Assim, a realização deste trabalho deverá determinar os controles do fluxo no entorno do empreendimento em função do desaguamento de mina além de servir de guia no gerenciamento hídrico local de forma a se mitigar os impactos que podem intervir de forma negativa na disponibilidade hídrica na região.

Servirá ainda para auxiliar no dimensionamento do sistema de rebaixamento a ser implantado no empreendimento. O principal ganho previsto é o de garantir a otimização do investimento de recursos, uma vez que serão feitas diferentes simulações com diferentes conceitos e configurações do sistema de rebaixamento até que se consiga o mais satisfatório.

Deste modo, pode-se concluir que este projeto possui alta relevância do ponto de vista ambiental, bem como para a fase operacional da futura lavra.

### **1.4 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA**

#### **1.4.1 MODELAGEM DE AQUÍFEROS**

Usualmente os profissionais do ramo da Hidrogeologia são solicitados para descrever e/ou prever tendências, com máximo grau de assertividade em um âmbito espacial e temporal, o comportamento futuro e/ou pretérito, de sistemas hídricos subterrâneos, com diferentes complexidades. Para tal, são concebidos modelos hipotéticos que os representem com o maior grau de fidedignidade possível.

A modelagem numérica de aquíferos é uma ferramenta utilizada neste sentido. Ela auxilia no gerenciamento dos recursos hídricos subterrâneos e oferece meios para realizar previsões sobre as consequências das ações que serão aplicadas sobre estes recursos de forma a alertar sobre detalhes não considerados previamente (Cabral & Demétrio 2008).

O termo modelo em hidrogeologia refere-se há uma representação de uma situação real. Quando é realizada uma descrição ou efetuado um estudo analítico dos dados referentes a um sistema hidrogeológico, utiliza-se o termo *Modelo Conceitual* que por sua vez, pode ser considerado uma análise estática, que descreve a situação atual do sistema hidrogeológico sem levar em consideração suas variações na dimensão temporal. Um modelo nunca representará a realidade em todas suas nuances, mesmo com intensos trabalhos de campo, um grande número de variáveis ficará por ser descrito ou será amostrado de forma incompleta. No entanto, esta etapa do trabalho é indispensável para o entendimento do regime de fluxo subterrâneo e suas interações com os sistemas superficiais (Fetter 2001).

Bear *et al.* (1996) definem modelo hidrogeológico como uma simplificação dos sistemas que compõe o mundo real, os quais devem ser suficientes para responder o problema que está sendo investigado. Por se tratar de uma simplificação, não existe um modelo único que possa oferecer a resposta para o problema abordado. Vários modelos podem seguir linhas de raciocínios completamente diferentes e chegar a respostas semelhantes.

Para estes autores, o modelo conceitual seria uma descrição verbal das características do sistema e deve ser concebido de forma simplificada com foco em um problema específico dos vários que compõe o sistema. Ele deverá fornecer as características necessárias e delimitará as simplificações que poderão ou não ser aplicadas na construção do modelo numérico. O modelo será construído levando-se em conta somente aqueles aspectos tidos como relevantes e que influenciam, do ponto de vista do analista, naquela questão para o qual o modelo está sendo criado.

O entendimento da evolução de um sistema hidrogeológico só pode ser conseguido com precisão utilizando-se modelos dinâmicos. Com este tipo de ferramenta pode-se fazer predições ou determinar sua configuração pretérita. Segundo Fetter (2001), os tipos mais recorrentes de modelos dinâmicos são os *Modelos Físicos em Escala*, *Modelos Analógicos* e *Modelos Matemáticos*.

Os Modelos Físicos em Escala são representações em menor escala do sistema hidrogeológico. São construídos com materiais similares aos observados em campo. Geralmente são estruturados utilizando-se tanques preenchidos com camadas de areia e cascalho, por exemplo, de forma a retratar a condutividade hidráulica de algum sistema existente na natureza. Para medir a distribuição de carga hidráulica no sistema simplificado, são instalados pequenos piezômetros nos pontos de interesse. Estes modelos são usualmente utilizados para exibir os princípios básicos que regem o fluxo hídrico subterrâneo (Fetter 2001).

Já na construção de Modelos Analógicos são considerados dois métodos distintos. O primeiro, parte do princípio de que alguns fenômenos podem ser representados a partir de outros em menor escala por analogia entre as leis físicas que regem os dois fenômenos. Diversos fatos na

natureza obedecem a princípio físicos semelhantes e são, portanto, matematicamente equivalentes. Por exemplo, Lei de Darcy, Lei de Ohm e Lei de Fourier. A similaridade das formulações matemáticas que descrevem o fluxo de corrente elétrica (Lei de Ohm) com aquelas que descrevem o fluxo de água subterrânea (Lei de Darcy) permite que modelos sejam construídos com base na primeira lei (Lei de Ohm) para serem utilizados na simulação de fluxo. Os modelos usualmente são construídos utilizando-se circuitos elétricos onde o fluxo elétrico é o que representa o fluxo de água em um aquífero.

O segundo método considerado analógico é denominado Modelo de Fluidos Viscosos ou modelo de Hale-Shaw. Este tipo de modelo é utilizado para estudo de fluidos imiscíveis de diferente viscosidade, os quais são colocados entre duas placas paralelas com espaçamento capilar, que podem ser utilizados para simulações bidimensionais de fluxo em regime estacionário ou transitório de aquíferos livres (Jahagirdar *et al.* 1997).

Os Modelos Matemáticos são construídos tendo como arcabouço a resolução das equações básicas de fluxo subterrâneo, transporte de calor e transporte de massa e serão descritos com maior detalhe no item subsequente.

### **Modelos Numéricos de Aquíferos**

Como já mencionado, *Modelos Matemáticos* são construídos tendo como arcabouço a resolução das equações básicas de fluxo subterrâneo, transporte de calor e transporte de massa. O modelo matemático mais simples é a aplicação da Lei de Darcy que seria um exemplo de modelo matemático analítico. Para o emprego deste tipo modelo é necessário conhecimento prévio das características do aquífero, das propriedades do fluido bem como das condições hidrodinâmicas iniciais e de contorno do sistema no qual ele está inserido. São de certa forma, de fácil resolução e utilizam-se ferramentas relativamente simples, tais como o uso de planilhas e algum conhecimento de programação (Fetter 2001).

Para Walton (1979), os modelos analíticos são ferramentas importantes para investigações hidrogeológicas, mas possuem aplicações limitadas. Geralmente são utilizados para análise de testes de aquífero; avaliação de aquíferos simples; desenvolvimento e calibração ou verificação de modelos numéricos.

Quando a resolução do problema envolve condições de contorno mais complexas ou há uma variabilidade muito grande nos parâmetros hidrodinâmicos da área foco do estudo, pode ser necessária a utilização de Modelos Numéricos. Em modelos mais complexos há a necessidade de recalcular inúmeras vezes as equações até que se atinja uma resposta da questão retratada no problema. Estes cálculos se constituem de resolução de matrizes complexas fazendo-se necessária

a utilização de computadores para os cálculos (devido a isso alguns autores também chamam este tipo de Modelos Numéricos Computacionais) (Zheng & Bennett 1995).

Inicialmente os modelos numéricos foram desenvolvidos para atender a engenharia do petróleo e utilizados nas décadas de 50 e 60 para simulação de fluxo em reservatórios de hidrocarbonetos. A diversificação do uso dos modelos numéricos se deu a medida que os computadores foram se tornando cada vez mais poderosos e mais baratos. O início da utilização na simulação de fluxos subterrâneos de água iniciou-se na década de 70. Hoje é amplamente utilizado pela indústria e academia para diversos fins (Bredehoeft 2003). Para Cabral & Demétrio (2008), este tipo de modelo seria muito útil em análises muito complexas de aquíferos e teria por finalidade a de expandir a capacidade do hidrogeólogo no gerenciamento dos recursos hídricos superficiais/subterrâneos através destas análises.

No entanto, Walton (1979) faz uma ressalva, indicando que apesar dos modelos numéricos serem bem mais realísticos quando comparados aos modelos analíticos, aqueles dependem de uma forma bastante ampla da disponibilidade de dados básicos e de boa qualidade. Em muitos casos os dados de campo não são suficientes para a descrição completa do aquífero sendo necessária a utilização de modelos analíticos juntamente com os modelos computacionais.

Outra questão observada é a utilização indiscriminada dos modelos numéricos. Com o advento de interfaces mais amigáveis dos softwares utilizados na modelagem numérica e com a capacidade deste tipo de instrumento de processar um grande número de dados da área de interesse, o analista tende a solucionar suas questões partindo diretamente para a modelagem numérica. No entanto a realização destes modelos despende de uma grande quantidade de tempo e “energia” do usuário (Brown & Trott 2014).

Uma alternativa para a resolução de problemas em menores escalas seria a utilização de modelos analíticos superpostos. Este tipo de abordagem é uma ferramenta eficaz de gestão local, em substituição aos modelos numéricos, mais complexos e cuja resposta é lenta, e deveriam ser utilizados em questões mais amplas e intrincadas (Brown & Trott 2014).

Do ponto de vista da aplicabilidade, os modelos numéricos podem ser divididos, de um ponto de vista mais amplo, em dois grandes grupos. Modelos de fluxo, utilizados na resolução de problemas visando ao reconhecimento da distribuição das cargas hidráulicas em um sistema hidrogeológico; e modelos empregados na investigação de transporte de solutos, que se aplicam a distribuição e evolução da concentração de um determinado soluto. Para este tipo levam-se em conta os mecanismos físicos de advecção e dispersão, e reações químicas que envolvem o processo de transformação do soluto considerado (Anderson & Woessner 2002).

São três os principais objetivos de utilização de modelagem matemática numérica de previsão, o de interpretação e o de descrição de forma genérica. No primeiro caso, o modelo é

usado para prever a resposta do aquífero a uma determinada situação de *stress* no âmbito temporal. No segundo, procura-se entender os mecanismos de funcionamento do aquífero; e no último a modelagem numérica é muito utilizada em análises de situações hidrogeológicas hipotéticas (Anderson & Woessner 2002, Cabral & Demétrio 2008, Fetter 2001).

Além destas três distinções, Bredehoeft (2005) sugere uma separação dos modelos de predições em dois tipos. Predições de futuro imediato e as predições de longo prazo. Esta última utilizada para previsões da ordem de milhares de anos. Segundo o autor, há uma distinção nas metodologias de investigação e resolução do problema, uma vez que diferentemente dos modelos de previsão de curto prazo, no de longo prazo, são realizados para amplitudes temporais da ordem de milhares de anos e não existem bancos de dados com registros históricos desta magnitude que serviriam para calibrar o modelo antes da realização da simulação. Ele cita como exemplo de aplicação deste tipo de modelagem, aquela utilizada na seleção de áreas para disposição de resíduos nucleares.

Segundo o autor, a modelagem aplicada para períodos de tempos muito extensos estaria em desacordo com o que ele denomina de “Regra de Ouro” e que foi proposta pelos precursores da modelagem numérica, os Engenheiros de Petróleo, e que deveriam ser seguidas na confecção de modelos aplicados as águas subterrâneas. De acordo com esta regra não deveria, ou não se poderia confiar em resultados de simulação para um período de tempo muito além da amplitude de tempo dos dados que foram utilizados na calibração do modelo numérico. No comportamento real do sistema, algumas tendências ou variáveis seriam perceptíveis somente em amplos espaços de tempo, caso não se tenham dados desta magnitude utilizados na sua calibração, o modelo poderia atingir resultados errôneos, reflexo de tendências secundárias, contidas nos dados de curto prazo.

### **Modelagem Conceitual e Numérica**

A construção de um modelo conceitual bem estruturado é fundamental para a resolução do problema abordado na modelagem numérica. O primeiro tem um caráter qualitativo e se aplica à representação dos fluxos subterrâneos de forma simplificada com base nas informações coletadas em campo, tais como, sistemas aquíferos existentes, levantamentos dos pontos de recarga e descarga, nível d’água e etc. O modelo conceitual é a ideia básica de como os sistemas ou processos operam no meio hidrogeológico. O modelo computacional, só vai resultar numa aproximação confiável da realidade física se o modelo conceitual for bem estruturado, ou seja, este tipo de modelo não deveria existir sem um modelo conceitual confiável (Anderson & Woessner 2002, Bredehoeft 2005).

A formulação do modelo conceitual do problema a ser investigado é nas palavras de Bredehoeft (2005), uma das etapas mais “espinhosas” no processo da modelagem numérica de aquíferos. Ela é feita baseada no julgamento e na subjetividade do analista. Este e o fato do modelo numérico funcionar como uma ferramenta para refinamento do modelo conceitual é em alguns casos negligenciados. Neste sentido, Anderson & Woessner (1992) alertam para o fato de que os modelos podem funcionar, como uma “viseira” a depender da forma como o analista deixa-se influenciar pelos resultados obtidos pelo modelo.

O modelo conceitual tem influência para o numérico e do mesmo modo, o inverso também pode acontecer. O segundo pode contribuir na reformulação do primeiro alertando ao analista sobre fenômenos no meio físico, não percebidos anteriormente e que fora destacado durante a simulação no modelo numérico. Outra questão, é que ele pode funcionar como uma linha guia para determinar onde e quais dados devem ser coletados em campo para refinamento do modelo conceitual que é o ponto de partida do numérico (Bredehoeft 2005).

Ainda, Oreskes *et al.* (1994) são mais drásticos em suas afirmações e alertam que mesmo que o modelo numérico represente o que foi proposto ou concebido pelo analista durante a concepção do modelo conceitual, do ponto de vista científico/filosófico não se poderia dizer que o mesmo representa uma aproximação da realidade modelada, mas sim poderia se limitar a dizer que ele representa uma aproximação do modelo conceitual proposto uma vez que a realidade em si, também não é conhecida pelo analista.

Com o advento da modelagem computacional e o crescimento de seu uso nas geociências, cada vez mais cientistas têm proposto técnicas para verificação e validação dos modelos numéricos. Para Oreskes *et al.* (1994) não existe a possibilidade de verificação e validação do modelo. A verificação seria impossibilitada pelo sistema não ser totalmente fechado o que implica na possibilidade de manifestação de alguma variável não considerada anteriormente. A validação do modelo na verdade é a validação dos dados existentes, que são incompletos e com diferentes graus de qualidade.

Os autores alertam que modelos conceituais/numéricos possuem uma parcela de observação do fenômeno em si e uma parcela de julgamento e conveniência de quem o criou. Ao se analisar um modelo deve-se ter cautela ao considerar seus resultados, principalmente no que tange a políticas públicas. Pois o modelo é manipulado de acordo com o entendimento do analista sobre o sistema e não pode ser considerado como um resultado independente e conclusivo sobre questões político/ambientais.

Nesta mesma linha, Faust *et al.* (1981) fazem suas ressalvas na utilização de modelagem computacional aplicada às decisões políticas. Os autores citam diversas normas norte americanas atreladas aos modelos. Os autores enfatizam que a modelagem deve ser considerada uma

ferramenta e não a resposta em si de uma determinada questão, e que o risco disto ocorrer poderia estar ligado ao atrelá-la a políticas públicas. Algumas questões devem ser levadas em conta, segundo os autores, e que estão intimamente ligadas ao modelo conceitual proposto. A primeira questão que deve ser levantada é se o analista tem experiência em hidrogeologia e também em modelagem; se o modelo proposto é compatível com os dados presentes e os objetivos do estudo; se o modelo foi minuciosamente avaliado e pode ser utilizado para outro estudo de caso; se os limites do modelo foram bem estabelecidos e se pode ser extrapolado para os dados históricos. Só o fato de um modelo explicar os dados analisados não quer dizer que ele deve ser considerado como a resposta correta e conclusiva sobre o problema. A sua correta aplicação é dependente do analista que o está utilizando, ou seja, de seu conhecimento do sistema hidrogeológico e do conhecimento das limitações da modelagem computacional.

O modelo em si é incapaz de determinar a validade dos resultados obtidos. A solução para uma mesma questão não é única. Podem-se chegar ao mesmo resultado por caminhos diversos. Além disto, os resultados podem ser influenciados por incertezas intrínsecas ao objeto modelado. O analista de posse do modelo conceitual tem um papel fundamental no processo de avaliação de seus resultados (Oreskes *et al.* 1994, Faust *et al.* 1981).

A adoção imediata da modelagem numérica como ferramenta para solução de problemas em hidrogeologia é cada vez mais crescente, uma vez que, a interface usuário *software* vem melhorando a cada dia.

Segundo Brown & Trott (2014), este tipo de abordagem afeta o processo científico aplicado na tratativa das questões hidrogeológicas. O método científico obriga o analista a observar os dados, fazer generalizações através de um modelo conceitual, selecionar uma solução de modelo apropriada, testar a hipótese replicando em um modelo matemático. Só com a constatação de que foi utilizado o modelo apropriado é que deveria ser realizada(s) previsão(ões) de cenários futuros. Deveria ser investida uma maior quantidade de energia na construção do modelo conceitual.

Um problema comum na modelagem é quando se tentar aplicá-los em problemas excessivamente complexos. Quanto a esta questão, Kelson *et al.* (2002) advogam que um modelo complexo nem sempre é necessário para resolver determinadas questões e o aumento de sua complexidade não fornecerá necessariamente um melhor entendimento do meio físico. Em muitos casos, para se entender processos hidrogeológicos complexos, paradoxalmente, pode ser necessária a redução de complexidade do modelo, uma vez que a atenção do analista deverá estar voltada somente para os fatores que são realmente relevantes e que influenciam na parte do sistema que está sendo analisada.

Existe uma crença equivocada de pessoas que trabalham com modelagem de que quanto maior a quantidade de detalhes inseridos no modelo numérico, melhor será sua representação da

realidade. Isto pode indicar uma falta de perspectiva de como os sistemas hidrogeológicos funcionam (Voss 2011). Na visão deste autor é importante reconhecer com o maior detalhamento possível o sistema a ser modelado, no entanto é necessário delimitar aqueles parâmetros que são realmente intervenientes nas questões a serem solucionadas.

Muitas vezes é utilizado o artifício de maior detalhamento, de subzonas de características diferentes em um mesmo corpo, para garantir um melhor ajuste dos dados modelados aos observados, sem que haja uma campanha adicional de campo. Neste caso o modelo está funcionando puramente como um exercício de busca de uma simples correlação entre parâmetros “existentes” e imputados no *software* e a realidade observada, o que pode ser facilitado por esta conduta. Há uma preocupação excessiva do simples ajuste dos valores imputados no *software* em detrimento de identificar se houve alguma negligência em relação aos dados coletados em campo. O que resultaria da falta de conhecimento das variáveis reais e do comportamento de cada uma individualmente. Isto estaria em desacordo com o ato de modelar, que por definição é um exercício implícito e assistemático que se baseia no julgamento e intuição científica (Voss 2011).

Numa linha cada vez mais crescente, alguns autores sugerem, sobretudo para modelos de transporte de contaminante, como forma de contornar ou de amortizar as incertezas inerentes à modelagem, a estratégia de criação de modelos conceituais alternativos para abordar um mesmo problema. Neuman & Wierenga (2003) ressaltam que há a necessidade de prever vários cenários e posteriormente determinar aquele que mais se aplicam ao modelo conceitual proposto. Segundo os autores o resultado aproximado tradicional, que leva em conta um único modelo determinístico, por se tratar de uma pequena amostra dos modelos hidrogeológicos plausíveis, não é suficiente para satisfazer o gerenciamento envolvido na investigação hidrogeológica.

De forma análoga (Beven 2000, James & Oldenburg 1997) sugerem a realização de vários modelos empregando algumas ferramentas estatísticas. Segundo estes autores devem-se realizar o que eles chamam de mapeamento de campo difuso das variáveis a serem inseridas no modelo. Assim o modelo deve ser construído considerando a amplitude estatística de suas incertezas (decorrente da amplitude de valores que as variáveis podem assumir em campo) em modelos diversos.

Por exemplo, em um trabalho intitulado de “*A Model-Averaging Method for Assessing Groundwater Conceptual Model Uncertainty*”, Ye *et al.* (2010) propõem a realização de vinte cinco modelos conceituais distintos para a região norte de Yucca, área no âmbito do Sistema Aquífero Regional do Vale da Morte, USA. Foram propostos em uma combinação de cinco valores de distribuição de recargas diferentes estimadas por metodologias diversas e cinco interpretações geológicas diferentes.



Segundo os autores, a utilização de cinco modelos geológicos e cinco estimativas de recarga foram necessários devido a complexidade da área. Assim estariam sendo incorporadas as incertezas relativas a estas variáveis. As cinco distribuições de valores de recargas consideradas foram estimadas tendo em vista três diferentes técnicas. As primeiras estimativas de distribuição de valores de recarga foram realizadas por métodos de aproximação empírica que relaciona elevação e precipitação. A segunda e terceira estimativas de distribuição de recarga foram realizadas baseadas em estudo da zona não saturada do aquífero e o quarto e quinto o cálculo de distribuição de recarga foi feito com base em estudo de saturação do aquífero.

Como resultado, chegou-se a dois modelos plausíveis contra vinte e três, pouco plausíveis. No entanto, segundo os autores, neste tipo de estudo deve ser feita uma análise probabilística levando-se em conta todos os vinte e cinco modelos e desta forma estariam sendo levadas em conta as incertezas inerentes ao estudo desenvolvido.

Em um trabalho intitulado “*The importance of alternative conceptual models for simulation of concentrations in a multi-aquifer system*” Troldborg *et al.* (2007) propuseram um estudo de caso com a utilização de vários modelos conceituais para um único problema. Este estudo foi desenvolvido para modelo de fluxo e transporte de solutos. Foram criados quatro modelos conceituais distintos para um aquífero pouco espesso localizado na Dinamarca e foram construídos, tendo em vista quatro interpretações geológica/hidrogeológicas, diferentes propostas para a área. A modelagem considerou o Trítio,  $^3\text{He}$ , e moléculas de clorofluorcarbono CFC-11, CFC-12 e CFC-113. Os resultados mostram diferenças significativas para cada modelo. Apesar da carga hidráulica e vazões serem similares, a variação de concentração dos traçadores foi bastante contrastante.

Neste estudo os autores alertam para o fato de diferentes calibrações gerarem resultados diferentes em virtude das incertezas relativas ao modelo conceitual. Estas incertezas são oriundas de diferentes interpretações dos dados coletados e, sobretudo da subjetividade do analista em relação aos possíveis modelos hidrogeológicos vigentes e que devem ser consideradas parte integrante da construção de modelos conceituais.

Já para Bredehoeft (2005), a modelagem numérica e conceitual devem ser tratadas como um processo iterativo. Baseado em estudos de casos este autor argumenta que o modelo numérico pode ser entendido como uma forma para verificação do modelo conceitual. Ele funcionaria como uma ferramenta que serviria para melhorar o modelo conceitual, ou seja, não seria necessária a criação de uma coleção de modelos numéricos para um sistema hidrogeológico.

O autor define o termo “Surpresa” em modelagem conceitual/numérica, como o surgimento de novos dados do local de pesquisa que podem invalidar o modelo conceitual proposto, levando ao analista a revisá-lo ou até mesmo descartá-lo. Isto somente indica que o

hidrogeólogo não possuía, naquele momento, informações necessárias para criar um modelo adequado. Este tipo de incerteza é inerente à investigação científica e a construção de um conjunto de modelos conceituais não ajudaria a resolver o problema da “surpresa” na modelagem. As modificações devem ser aplicadas ao primeiro modelo. Assim os modelos só seriam modificados em face de novos dados, estando em acordo com a premissa de evolução do conhecimento em investigações científicas.

### **Modelagem Aplicada à Mineração**

Em mineração, o conhecimento dos fluxos subterrâneos é fundamental para dar subsídio tanto na implantação de um projeto quanto no decorrer de sua operação. Dois aspectos principais podem ser levados em conta na concepção destes modelos aplicados à mineração.

O primeiro aspecto a ser considerado é o operacional. Um bem mineral pode encontrar-se abaixo do nível freático o que torna necessária a implantação de um sistema de rebaixamento do nível d'água para desaguamento do aquífero de forma a permitir que sua exploração ocorra em “meio seco”. A construção do modelo hidrogeológico da área onde se pretende instalar algum empreendimento minerário pode fornecer dados para otimização do dimensionamento do sistema de rebaixamento. Isto evitaria desperdício com superdimensionamento ou surpresas desagradáveis, como uma entrada de água súbita nas escavações, o que seria indesejado no decorrer das atividades.

As duas aplicações mais comuns de modelagem na mineração, segundo Krčmář & Sracek (2014), é na determinação de entrada de água em escavações e na quantificação de descargas de entrada de água após o descomissionamento do empreendimento.

Para Singh & Reed (1988), a descrição e previsão de entrada de água em uma mina utilizando-se modelagem numérica é uma importante variável a ser considerada na fase ainda de projeto e tem diversas implicações operacionais, econômicas e relacionadas à segurança. Afluxos súbitos de água podem comprometer a produção, causar danos a vidas e máquinas além de impactar na viabilidade de um projeto. São importantes também para que o setor de engenharia possa projetar o sistema de rebaixamento para manutenção da escavação em meio seco, e projetar, caso necessário, instalações de armazenamento que devem ser dimensionadas para vazões compatíveis com o aquífero em questão.

Nesta mesma linha, Aryafar & Ardejani (2009) pontuam que a antecipação dos mecanismos de fluxo de água para a mina e a concepção de um sistema de rebaixamento são os desafios mais urgentes em hidrogeologia aplicadas à mineração. Modelos analíticos são amplamente utilizados, mas estes utilizam condições de contorno muito simplistas e devem ser utilizados nos estágios

iniciais do empreendimento. Em estágios mais avançados, a modelagem numérica seria o único método para prever com o grau de exatidão requerida os afluxos de água para a escavação.

De maneira análoga Rapantova *et al.* (2007) ressaltam a importância da modelagem computacional para a resolução de problemas associados à mineração tanto na fase de operação como em seu descomissionamento. A modelagem pode ser útil no desenvolvimento de estratégias de desaguamento de mina, e também no controle dos efluentes a partir do empreendimento.

Os autores acrescentam ainda a seguinte ressalva: “*a aplicação de modelagem em mineração requer um conhecimento profundo deste tipo de ambiente*”. Neste trabalho, Rapantova *et al.* (2007) através de estudo de casos levantam algumas especificidades na aplicação de modelagem na mineração, sendo o principal delas a consideração do fluxo turbulento gerado na interface aquífero e vazios abertos pelas escavações (galerias/cavas de mina). Outra especificidade seria o balanço hídrico, que diferentemente do utilizado nos modelos convencionais, apresentam variáveis particulares deste tipo de ambiente. No balanço hídrico, tem-se como volumes de entrada a serem considerados aqueles provenientes da recarga, uma parte da precipitação direta e volumes de saída, pela evapotranspiração e também pelo sistema de ventilação da mina. Existe ainda aquele montante retirado como umidade no transporte do minério produzido e a água acumulada nos reservatórios ao longo das escavações (pisos de galerias/cavas/reservatórios). Questões deste tipo podem ter importância fundamental, em alguns casos, no fechamento do balanço hídrico que só quem conhece bem este tipo de ambiente é que poderia fazê-lo com maior propriedade.

Para Brown & Trott (2014), em um contexto de mineração é comum ter um modelo conceitual acompanhado de um modelo numérico determinístico, sem que haja o processo de escolha do modelo mais apropriado para a solução das questões hidrogeológicas, o que seria uma etapa fundamental, inerente ao método científico.

Um exemplo típico em modelagem aplicada à mineração de forma desnecessária, é quando não é levada em conta a escala de abordagem do modelo. Segundo os autores, modelos desenvolvidos para quantificação de impactos ambientais no entorno do empreendimento são desenvolvidos em escalas regionais. Já modelos para determinação de estratégias de desaguamento de mina normalmente são desenvolvidos em menores escalas, sendo assim nem sempre é necessário o desenvolvimento de um modelo numérico para este tipo de análise. A utilização de modelos analíticos pode ser suficiente para tal. Em um estudo de caso proposto pelos autores, as duas abordagens são aplicadas em um mesmo contexto de mineração encontrando-se baixa discrepância dos resultados obtidos pelas duas abordagens (numérica e analítica).

Alguns erros comuns na aplicação em minerações são enumerados por Brown & Trott (2014). Dentre eles está a investigação hidrogeológica insuficiente; modelo conceitual insuficiente

e/ou falta de conceituação alternativa do problema abordado; a crença de que o modelo é que dará todas as respostas as questões específicas da mina; uso de modelo excessivamente complexo.

O outro aspecto, não menos importante, no que se refere a modelagem computacional empregada em mineração é sua aplicação nas questões ambientais. Em um modelo hidrogeológico bem estruturado, é possível fazer determinações e previsões de impactos nos recursos hídricos superficiais e subterrâneos que poderiam ocorrer na área de influência do empreendimento a ser implantado. Assim, podem-se gerar informações que servirão de subsídio na tomada de decisões adequadas de modo a minimizar resultados negativos, amortizando assim os efeitos da implantação do empreendimento no âmbito do meio hídrico.

Conforme apontado por Kaden *et al.* (1985), as minas podem gerar diversos impactos causando assim conflitos socioeconômicos na região de seu entorno. Grande parte destes impactos é oriunda do rebaixamento do nível freático necessário para as operações do empreendimento. Umadasvariáveis mais afetadas são as demandas de água destinadas as indústrias e agricultura locais. Devido ao rebaixamento aplicado ao aquífero, pode haver uma diminuição das disponibilidades deste recurso tanto na superfície quanto em subsuperfície.

O rebaixamento do nível freático pode ainda prejudicar a ascensão capilar de fluidos, recurso significativo para manutenção de algumas espécies vegetais localizadas na superfície. O impacto gerado neste mecanismo natural de interação entre o subsolo e as plantas, pode exigir que sejam aplicadas melhorias por parte dos produtores rurais, nos sistemas de irrigação para que sua produção não seja fortemente impactada e, por conseguinte, causandoumaumento no custo de produção.

Outros aspectos levantados por Kaden *et al.* (1985) quanto aos impactos gerados pela mineração aos recursos hídricos subterrâneos é a qualidade das águas no entorno, subsidência do terreno e o equilíbrio ecológico no entorno do empreendimento.

Com o rebaixamento do nível freático, há ampliação da zona aerada no subsolo. Isto promove uma maior capacidade de lixiviação da água liberando os elementos mais oxidados, tornando-a mais ácida. Este fato terá maior ou menor relevância a depender do bem mineral explorado bem como a natureza geoquímica do minério, da ganga e das encaixantes.

Os autores ressaltam que para fazer uma avaliação dos impactos gerados nos recursos hídricos subterrâneos (e superficiais) ao longo do tempo é fundamental a utilização da modelagem computacional. No estudo de caso apresentado, Kaden *et al.* (1985) propõem a utilização de modelagem computacional como ferramenta complementar na gestão socioambiental de áreas em que há rebaixamento do nível freático para desaguamento de mina.

Grande parte dos trabalhos desenvolvidos utilizando modelagem numérica de fluxo subterrâneo aplicado à mineração tem como foco o estudo de contaminantes. Em um trabalho

apresentado por Brunetti *et al.* (2012) é mostrado um estudo de caso em que foi utilizada modelagem numérica aplicada à análise de impacto focado no quantitativo de restituição dos aquíferos para os sistemas superficiais.

Foi constatada em uma bacia chamada *Acque Albule*, uma localizada a 10 km de Roma, Itália. Ficou constatado a redução, bem como a interrupção das descargas de importantes nascentes termais localizadas no entorno do empreendimento proporcionado pelo rebaixamento do nível freático aplicado por uma mina instalada no local. Somado a isso, ficou constatada subsidência de terreno causando impactos na infraestrutura urbana.

Neste trabalho a modelagem numérica foi utilizada com o intuito de avaliar, e propor estratégias de intervenção e remediação eficazes. Como resultados obtidos, os autores tiveram a validação do modelo conceitual proposto para a área e puderam propor como forma de remediação e restauração parcial das nascentes termais afetadas, a redução de 30% do bombeamento.

De um modo geral a modelagem numérica aplicada a recursos hídricos subterrâneos tem um importante papel atualmente no que se refere a seu gerenciamento. É uma ferramenta que permite uma análise mais apurada de suas questões temporais (futuro e/ou pretérito).

Existe uma tendência de se acreditar que o modelo pode fornecer a respostas aos problemas os quais se está tentando resolver, no entanto este papel cabe exclusivamente ao analista. A modelagem numérica, na verdade, funciona como uma ferramenta que permite que o hidrogeólogo examine com maior grau de detalhe do ponto de vista espacial, temporal, qualitativa e quantitativamente como funciona o sistema por ele imaginado.

A construção de um modelo conceitual bem estruturado constitui-se de uma etapa (talvez a mais) importante na realização de um modelo numérico. A boa fundamentação é altamente dependente da experiência do analista que o concebe, bem como da disponibilidade e confiabilidade dos dados existentes do objeto modelado.

Atualmente existem técnicas de construção de modelos numéricos que se baseiam em modelos conceituais distintos. A justificativa desta abordagem se dá pela não unicidade dos modelos numéricos, em que se pode chegar ao mesmo fim utilizando-se caminhos diferentes. Os resultados são alcançados através de análise conjunta de probabilidade de ocorrência de todos os modelos conceituais plausíveis para o evento estudado.

A indústria da mineração é um campo fértil para aplicação de modelagem numérica, uma vez que em muitos casos é necessário para a exploração do bem mineral o rebaixamento do nível freático. Dois aspectos importantes podem ser focos da modelagem, o operacional e o ambiental. A realização do modelo pode fornecer dados para otimização do dimensionamento do sistema de rebaixamento evitando desperdício de recursos econômicos ou surpresas desagradáveis no que se refere à segurança do empreendimento e das pessoas que nele atuam. Em um modelo

hidrogeológico bem estruturado, é possível fazer determinações e previsões de impactos qualitativos e quantitativos nos recursos hídricos superficiais e subterrâneos na área de influência do empreendimento.

## **1.5 ANÁLISE SOBRE GESTÃO DE RECURSOS HÍDRICOS EM CONTEXTO DE ÁREAS DE MINERAÇÃO**

A água pode ser considerada o mais importante dos bens minerais. A sua disponibilidade é um insumo fundamental tanto nas atividades industriais de um modo geral, quanto na manutenção do ecossistema global.

De acordo com ONU (1995), "A água é necessária em todos os aspectos da vida. O objetivo geral é assegurar que se mantenha uma oferta adequada de água de boa qualidade para toda a população do planeta, ao mesmo tempo em que se preservem as funções hidrológicas, biológicas e químicas dos ecossistemas, adaptando as atividades humanas aos limites da capacidade da natureza e combatendo vetores de moléstias relacionadas com a água. Tecnologias inovadoras, inclusive o aperfeiçoamento de tecnologias nativas, são necessárias para aproveitar plenamente os recursos hídricos limitados e protegê-los da poluição".

Ha uma forte conexão entre a extração de bens minerais e a questão da água presente no meio, seja em termos de disponibilidade ou a interação desta com aquela. Não há dúvida que, conforme constatado por (Mercer 2006), para atendimento de nossas necessidades é imprescindível que tenhamos uma oferta adequada de bens minerais essenciais ao agronegócio, à construção civil e à indústria, às artes, ou seja, a todas as cadeias produtivas e manifestações culturais da humanidade: por exemplo, o avião, o carro, o computador, as igrejas, as esculturas, os instrumentos musicais e tantos outros nada mais são que bens minerais transformados.

Para a mineração a água tem sua importância ou é até mesmo indispensável para a sustentabilidade do empreendimento, além de possuir uma relação dual com este. Por um lado a sua disponibilidade é absolutamente necessária para sua operação e processos, por outro, podem se apresentar como um problema a ser tratado tanto do ponto de vista operacional/ambiental e desta forma, pode-se agregar custos adicionais importantes (Rubio 2006) e do ponto de vista da disponibilidade daquele recurso pode até mesmo gerar conflitos com os usuários localizados nas cercanias do empreendimento.

A gestão dos recursos hídricos aplicada à mineração tem diversas peculiaridades no que tange aos aspectos específicos desta modalidade de empreendimento. De um lado têm-se as empresas mais modernas e eventualmente de grandes dimensões, com dispositivos de controle, nas mesmas proporções. Por outro, tem-se empreendimentos modestos, com iguais ou nenhum controle ambiental. Neste último encontram-se os garimpos, pequenas pedreiras, extratores de

areia entre outros. Ocorrem ainda em outros casos algum grau de processamento primário do minério extraído, tais como concentração, separação, lavagem, e outros que requerem grandes obras para manuseio de rejeitos (barragem, por exemplo). Por último, existem aqueles projetos (não raros) que exigem o rebaixamento do nível freático a fim de permitir a extração do bem mineral em meio seco (Romano *et al.* 2006).

Três pontos devem ser levados em conta para melhor apreensão do tema (Romano *et al.* 2006):

- A necessidade da extração de minerais para atender a demandas crescentes da sociedade;
- Os impactos ambientais inerentes às atividades minerárias;
- A eficiência comprovada de processos de controle ambiental.

Segundo Lambooy (2011), em um contexto industrial, torna-se importante melhorar a gestão dos recursos hídricos, pois além de motivos que satisfazem a interesses próprios do ponto de vista de economia e manutenção da disponibilidade hídrica podem ser citados também riscos ligados ao meio social no qual o empreendimento está inserido, dos quais se destacam a imagem institucional da empresa frente a sociedade e que pode levar a pressões da comunidade frente as autoridades locais.

Romano *et al.* (2006) pontuam que a opinião pública estará mais sensível às questões relacionadas aos impactos sobre os recursos hídricos, o que geraria uma "consciência empresarial" no ramo da mineração, de que sua adaptação social e ambiental é fundamental para a sua sustentabilidade.

A implantação de uma mina pode acarretar em diversas modificações no meio físico tais como invasão das águas subterrâneas, impactos nos sistemas de drenagem, abatimento do nível freático regional, desenvolvimento localizado de um cone de depressão, abatimento de solo, recuperação do nível freático pós-empreendimento, deterioração da qualidade das águas de entorno, fatores estes que podem colocar, como já dito, em conflito a operação da mina e a vida social local (Aryafar & Ardejani 2009).

Em termos de rebaixamento do nível freático, aspecto abordado neste trabalho, pode-se destacar como ponto fundamental de conflito, a exaustão do manancial no qual a mina está instalada.

O desaguamento de mina é essencial e um fator limitante para operação de algumas minas, pois permite o acesso à mina por pessoas e maquinário de um modo geral. Alguns impactos referentes a este aspecto são apontados por Younger & Wolkersdorfer (2004):

- Decaimento de volume que verte em rios, áreas úmidas e lagos;

- Abatimento do nível freático com impacto em mananciais e em poços utilizados na irrigação, que em primeira instância, pode contribuir para o aumento de custo de bombeamento;
- Subsidência de terreno;
- E em último caso, poluição das águas superficiais ou subterrâneas em caso de descarte e bombeamento de água de baixa qualidade.

Para Younger & Wolkersdorfer (2004), os impactos a serem gerados podem ser antecipados e as empresas podem tomar medidas para mitigá-los. Para a gestão eficiente dos impactos no meio hídrico em uma bacia, há alguns pontos a serem considerados.

O rebaixamento no contexto de uma bacia, apesar de pouca literatura a respeito, pois em muitas das minas o desaguamento não é de responsabilidade de um hidrogeólogo, deve ser bem entendido, pois aquele altera diretamente a condição natural que envolve os recursos hídricos superficiais e subterrâneos. Desta forma deve ser realizado tendo-se a preocupação em manter o que os autores chama de "Estado Ecológico Ótimo" da bacia hidrográfica. Apesar de usualmente a magnitude do bombeamento não ser o suficiente para gerar impactos duradouros, quando se pensa em desaguamento de mina, este fato ocorre em alguns empreendimentos e deve ser previsto.

O rebaixamento do nível freático em si, em muitos casos pode ir muito além do empreendimento que pode acarretar em impactos generalizados sobre os recursos hídricos, a estabilidade do solo e ecologia. Existem muitos casos em que o rebaixamento não gera tais impactos negativos. Para garantir este fato os autores sugerem que sondagens exploratórias sejam projetados de modo que os furos possam ser mantidos como ponto de monitoramento de água subterrânea num contexto anterior a abertura do empreendimento (Younger & Wolkersdorfer 2004).

Em termos de descarte dos efluentes provenientes do bombeamento, Younger & Wolkersdorfer (2004) destacam que nem todas as minas são fontes potenciais de poluentes, e que em alguns casos uma alternativa para mitigar os impactos na disponibilidade hídrica local, provenientes do rebaixamento é que parte do volume retirado do subsolo pode ser destinada a irrigação ou para o abastecimento público, desde que seja garantida a qualidade desta água para tais fins. Em função do contexto, é possível o descarte desta água em cursos d'água locais desde que seja estudada a necessidade ou não de algum tratamento anterior garantindo que a quantidade não modifique o regime de fluxo natural do curso d'água, não aumente excessivamente a velocidade de fluxo, o que poderia acarretar em aumento de erosão e por último a qualidade da água não altere seu equilíbrio geoquímico. Assim, o descarte da água proveniente do desaguamento da mina poderia ser uma alternativa promissora na regularização de regime de escoamento de cursos d'água impactados.



## CAPÍTULO 2

### CONTEXTUALIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO

#### 2.1 CONTEXTO GEOLÓGICO

##### Geologia Regional

A área em estudo está situada na porção sul da Província Mantiqueira que se constitui como uma faixa móvel de idade neoproterozoica que se estende desde o paralelo 15° Sul, no Brasil até o paralelo 33° Sul, no Uruguai. Esta faixa é constituída por unidades formadas e/ou afetadas por processos orogênicos cujos picos metamórficos ocorreram entre 630 - 620 Ma e que estão intimamente ligados ao orógeno Brasileiro/Panafricano, ocorridos no processo de amalgamação do supercontinente Gondwana.

O contexto geológico é alicerçado em um mosaico de terrenos neoproterozoicos, que em conjunto configuram-se como diversos sistemas de orógenos, e preservam alguns terrenos arqueanos remanescentes (Silva *et al.* 2005).

Na porção sudeste da plataforma sul-americana foram identificados importantes elementos que compõem a história evolutiva da Província Mantiqueira e que são os sistemas de pequenas bacias constituídas no Ediacariano Médio até o Cambriano tardio, preenchidas por uma sucessão de sedimentos siliciclásticos não metamorfisados com maior ou menor volume de rochas vulcânicas e vulcanoclásticas ácidas a intermediárias. A Bacia do Camaquã se constitui um exemplar de terreno desta natureza (Almeida *et al.* 2010).

Diferentes modelos genéticos são conjecturados e não raramente mais de um modelo é considerado para uma mesma bacia (Almeida *et al.* 2010). Estas interpretações podem ser agrupadas em três modelos distintos: (i) Cenário Sin-orogênico, principalmente para as bacias periféricas; (ii) Tardi-orogênico, pós-colisional; (iii) Origem extensional não diretamente correlacionada ao evento orogênico anterior. Segundo os autores, o conflito entre as interpretações e proposições de modelos distintos, se deve a interpretações realizadas com base em rochas metamórficas e plutônicas das adjacências e não necessariamente naquelas circunscritas no interior destas bacias.

Diversos corpos plutônicos, no Brasil e no Uruguai, especialmente e cronologicamente relacionados com estas bacias têm sido interpretados, do ponto de vista de modelagem tectônica, como núcleo de um arco magmático. Estudos recentes questionam este tipo de interpretação (ex. Philipp & Machado 2005; Silva *et al.* 2005; Oyhantçabalet *et al.* 2007; in Almeida *et al.* 2010).

Tem-se observado que grande parte destes granitos é do Tipo A, e que em alguns casos estão associados a sienitos que apresentam idades similares e ocorrem desde o Uruguai até o estado

de São Paulo. A ocorrência destes corpos pode ser interpretada como o registro da ambientação destas bacias em um contexto orogênico de transição até anorogênico como proposto por diversos autores (ex. Philipp & Machado 2005; Oyhantc,abal *et al.* 2007; Veevers 2007; in Almeida *et al.* 2010).

Para alguns autores (Paim *et al.* 2000 e Paim & Chemale 2014), a Bacia do Camaquã pode ser definida como um encadeamento de diversas bacias independentes, vinculadas aos estágios finais do Brasiliano, no estado do Rio Grande do Sul. Este complexo de bacias desenvolveu-se sob o domínio de esforços compressivos / transpressivos de início; e distensivo / transtrativos ao final. Assim podem ser identificadas bacias tardi-orogênicas com bacias de retroarco e transcorrentes associadas a bacias pós-orogênicas, do tipo rift. Além disto, ela seria o exemplar mais bem preservado e exposto do mencionado modelo (Almeida *et al.* 2010 e Paim & Chemale 2014).

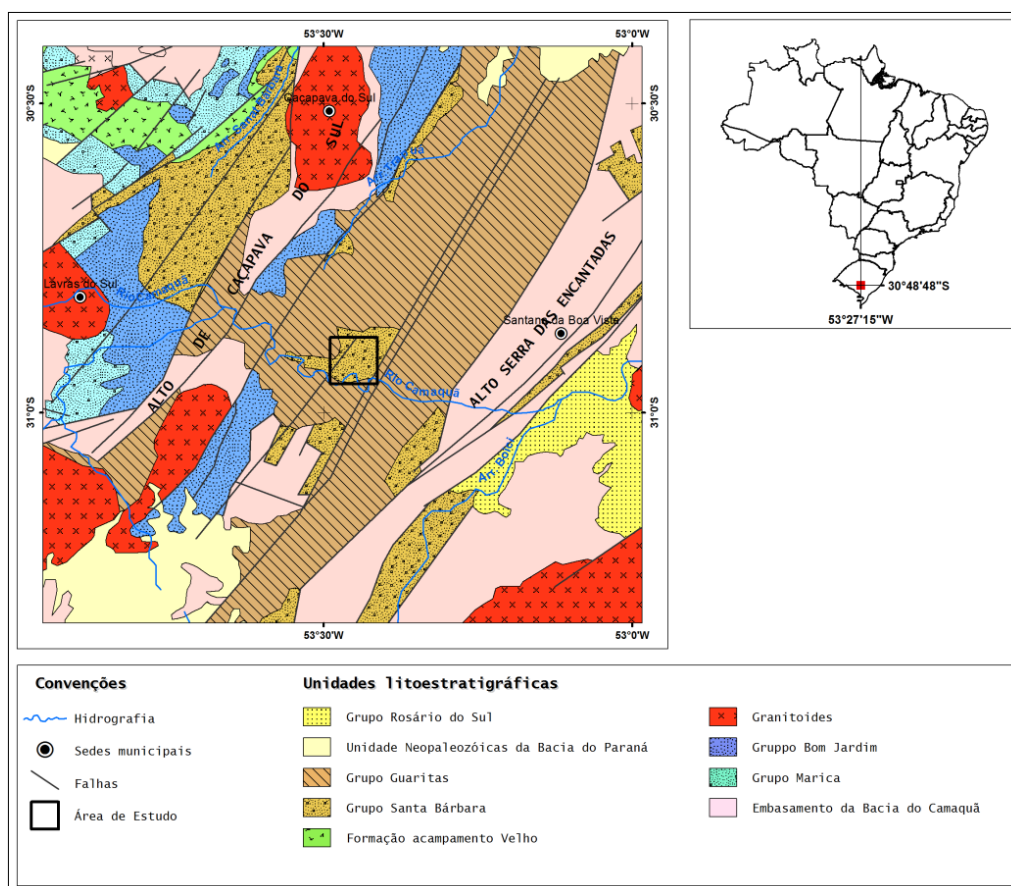
Esta bacia localiza-se na borda norte do Cráton Rio De La Plata, na paleojunção dos crátons São Francisco e Kalahari e apresenta em sua assembleia litológica, rochas siliciclásticas provenientes de ambientes aluviais, costeiros e deltaicos (Fambrini *et al.* 2007). O Supergrupo Camaquã tem exposições controladas por falhas de direção NNE que isolam três sub-bacias separadas pelos altos de Caçapava do Sul e da Serra das Encantadas: as sub-bacias Camaquã Ocidental, Central e Oriental.

O Supergrupo Camaquã, como é denominada a unidade litoestratigráfica maior que preenche esta bacia, é constituída da base para o topo pelas unidades: Grupo Maricá, Grupo Bom Jardim, Formação Acampamento Velho, Grupo Santa Bárbara, Grupo Guaritas e a Suíte Intrusiva Rodeio Velho (Almeida *et al.* 2010). Paim *et al.* (2000) propõem uma avaliação da bacia dividindo-a em termos de unidades aloestratigráficas definidas da base para o topo como: Alogrupo Maricá, Alogrupo Bom Jardim, Alogrupo Santa Bárbara e Alogrupo Guaritas.

O Grupo Maricá ocorre a noroeste da área de estudo (**Figura 2.2**). É composto por arenitos fluviais e arenitos seixosos, arenitos finos e siltitos marinhos (Almeida *et al.* 2010). Esta unidade foi depositada em ambiente costeiro incluindo aporte fluvial até marinho raso, com alguma contribuição vulcânica. Tem a sua espessura estimada em cerca de 2.500m (Almeida *et al.* 2012) a 4000m (Paim *et al.* 2000). Estudos mostram idade U-Pb *SHRIMP* máxima de deposição de cerca de  $630,2 \pm 3,4$  Ma para esta unidade (Borba *et al.* 2008). A definição da natureza de seu contato com o embasamento é de difícil determinação (inconformidade ou por falha mento inverso) devido ao relevo rebaixado, solos espessos, vegetação e a presença de corpos intrusivos na sua base (Almeida *et al.* 2012).

Em faixas a noroeste (Figura 2.1), oeste e sudoeste da região em estudo ocorrem rochas pertencentes ao Grupo Bom Jardim com espessura de cerca de 2.000m (Paim *et al.* 2000). Esta unidade representa um ambiente lacustre profundo a raso, com forte contribuição vulcânica. O

conteúdo litológico inclui arenito, conglomerado, retinto, La mito, além de rochas vulcânicas intermediárias, básicas e ácidas em sua assembleia litológica (Almeida *et al.* 2010). Estudos de datação resultaram em idades de deposição máxima (U/Pb TIMS) de cerca de  $600,5 \pm 2,4$  Ma para a deposição desta unidade (datação em diques graníticos que introduzem o topo desta unidade) (Janikian *et al.* 2008).



**Figura 2.1** - Figura representando a geologia regional da região estudada. Modificado de Almeida (2005).

A Formação Acampamento Velho ocorre em alguns pontos no extremo noroeste da área (Figura 2.2) sendo representada basicamente por rochas vulcânicas e vulcanoclásticas em sua composição (Almeida *et al.* 2010). Apresenta contatos de inconformidade com o Grupo Maricá. Para o evento vulcânico gerador desta unidade foram estimadas idades UFPB TIMS de  $574 \pm 7$  Ma (Janikian *et al.* 2008).

O Grupo Santa Bárbara está presente na área de estudo e nas porções noroeste sudeste, leste e nordeste da área (Figura 2.2). Esta unidade apresenta uma espessura maior que 2.500m. Possui sedimentos de origem deltaica, e sedimentos formados por correntes de turbeis (Janikian *et al.* 2012). São descritos arenitos de origem aluvial, conglomerados e ritmitosareno-argilosos (Almeida *et al.* 2010). Idades U-Pb *SHRIMP* máximas de deposição de cerca de  $566 \pm 6,9$  Ma foram encontradas para esta unidade (Bicca *et al.* 2013).

O Grupo Guaritas ocorre em uma extensa faixa na porção central (Figura 2.2) e aflora na área de estudo. Representa o último grande evento deposicional da Bacia do Camaquã. Este se deu em um ambiente desértico de dunas crescentes. Nas feições interdunas, são percebidas alternância entre períodos secos e úmidos (Paim 2000). Segundo Paim (2000) o Grupo Guaritas apresenta cerca de 800 m de espessura e constitui-se por arenitos e conglomerados de origem aluvial e arenitos de origem eólica. Apresenta contato tipo inconformidade com as unidades subjacentes. Foram encontradas idades (pelo método Ar-Ar MAP-215-50) de cerca de  $535,2 \pm 1,1$  Ma (idade relativa a *Sills* que intrudem esta unidade e que, segundo o autor, mostram indicativos no contato com os arenitos do Grupo Guaritas de que a deposição se deu em idades próximas ao evento intrusivo) (Almeida *et al.* 2010).

Além disto, estão presentes rochas de composição básica a intermediária da Suíte Intrusiva Rodeio Velho que corta todo o Supergrupo Camaquã, e que são frequentemente encontradas na forma de *sills* no interior do Grupo Guaritas.

A Figura 2.2 mostra a área de desenvolvimento do projeto, na sub-bacia Guaritas como definida por Paim *et al.* (2000) equivalente a sub-bacia Camaquã Central definida por Almeida (2005). Esta área constitui um importante setor da Bacia do Camaquã, na porção central do escudo Riograndense, classicamente denominada “Janela Bom Jardim” onde são expostas por tectonismo, seqüências estratigraficamente abaixo do Grupo Guaritas (Bicca *et al.* 2013). Importantes depósitos metálicos são conhecidos e explorados desde o século IX, como as Minas do Camaquã, importante depósito de Cu (Au, Ag) e o Depósito de Santa Maria, Pb-Zn (Cu, Ag) (Remus *et al.* 2000).

Na área do projeto, podem ser identificadas as seguintes unidades do Supergrupo Camaquã: Grupo Santa Bárbara, Grupo Guaritas e Formação Rodeio Velho.

Existem divergências quanto ao contexto da deposição do Grupo Santa Bárbara, unidade preponderante na área abrangida neste estudo.

Para Paim *et al.* (2000), Borba *et al.* (2008) e Paim & Chemale Jr. (2014), a Formação Santa Bárbara, denominação original, mantida por Borba *et al.* (2008), ou Alogrupo Santa Bárbara (Paim *et al.* 2000, Paim, & Chemale 2014), tem como características gerais, predomínio de estratos tabulares de coloração castanha avermelhada, imaturidade textural e abundância de feições de ressecamento. Neste trabalho foram reconhecidas cinco associações de fácies: leques aluviais, frente deltaica aluvial, lacustre, canais fluviais entrelaçados arenosos e canais fluviais entrelaçados de leito cascalhoso. Não foi verificada qualquer contribuição marinha em sua sedimentação.



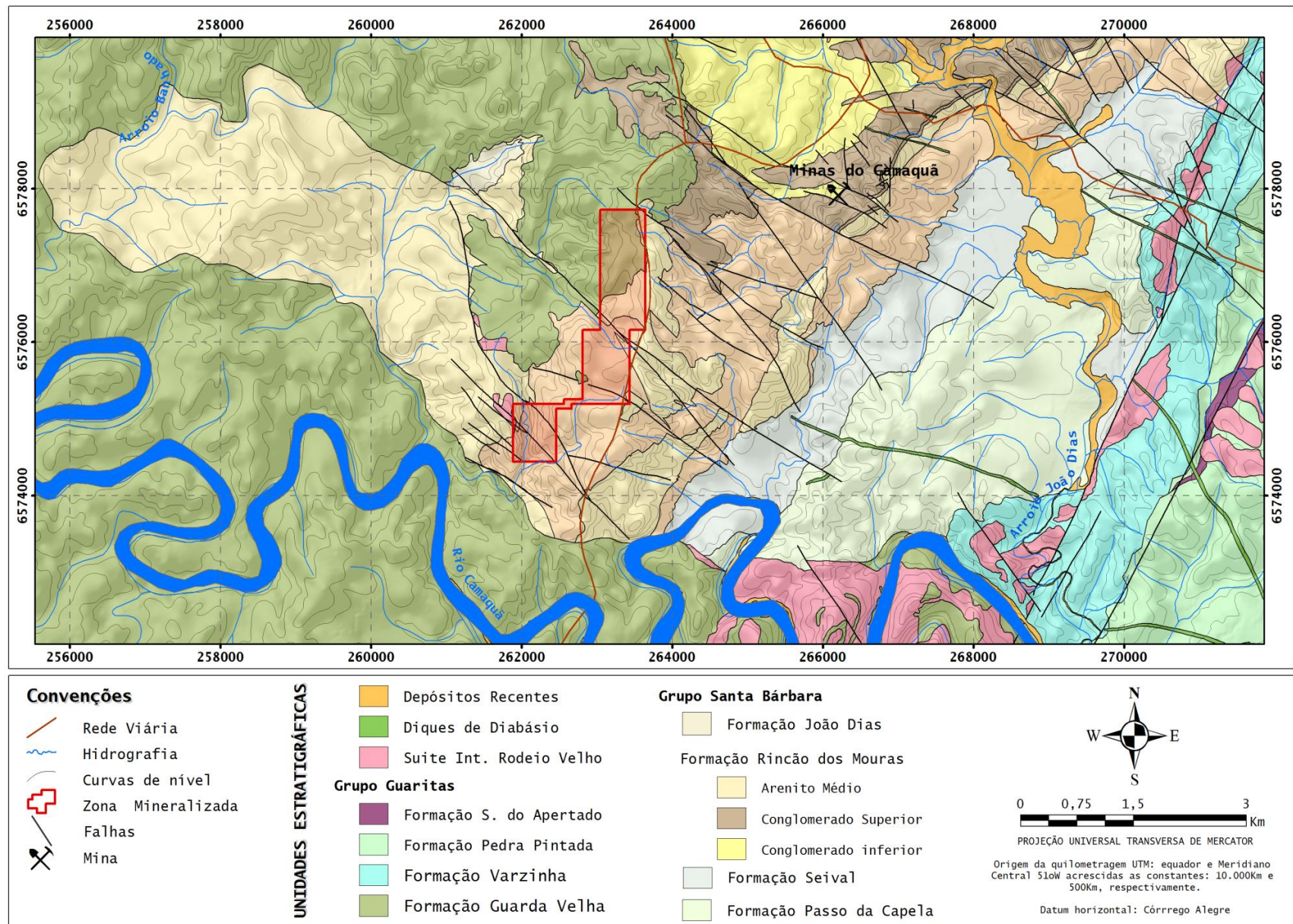


Figura 2.2 -Mapa geológico local da área de estudo.

Por outro lado, Fambriniet al. (2007)propõem pelo menos a alternância de cinco padrões de empilhamento de conjuntos de parassequências condicionadas por variações relativas do nível do mar e um evento tectônico de grande magnitude e que condicionou a deposição do Grupo Santa Bárbara.

Segundo os autores pode ser verificado um primeiro ciclo retrogradacional registrado nas porções inferiores da Formação Passo da Capela materializada pela evolução de turbiditos proximais para turbiditos distais característicos de trato de sistema de mar baixo. Um segundo ciclo progradacional definido na mesma unidade, caracterizado por tempestitos de mar aberto que evoluem para tempestito litorâneo. O terceiro ciclo é agradacional e corresponde ao pacote de sedimentos relativos à planície de maré da Formação Seival. A Formação Rincão dos Mouras caracteriza um ciclo progradacional de rápida inundação, evidenciado pela passagem de sedimentos depositados em leques aluviais médio a distais para leques aluviais proximais. Os sedimentos conglomeráticos de topo desta última unidade caracterizam um evento tectônico de soerguimento de um alto situado a sudeste. O sexto e último ciclo deposicional é retratado pela Formação João Dias representados por depósitos litorâneos e tempestitos que sobrepõem o pacote anterior.

Assim, tem-se na visão de Fambrini et al.( 2007) que esta unidade caracteriza-se por uma sucessão de depósitos arenosos e ritmitos marinhos transitacionais e depósitos conglomeráticos de leques aluviais e pode apresentar uma espessura maior que 2.000 m. Por outro lado, para Paim et al.(2000) a unidade é caracterizada como depositada em ambiente lacustre raso com deltas e leques aluviais associados. As idades U-PbSHRIMP máximas de deposição encontradas para esta unidade é de cerca de  $566 \pm 6,9$  Ma (Bicca et al. 2013).

A Formação Passo da Capela caracteriza-se por depósitos gerados por correntes de turbidez em franjas externas de leques submarinos e pode ser observada a sudeste da área do projeto (**Figura 2.2**). Esta unidade apresenta uma espessura de aproximadamente 4.000m.

Os depósitos turbidíticos desta unidade caracterizam-se pela presença de ritmitospsamo-pelíticos que mostram gradação normal das seguintes fácies (da base para o topo): arenitos médios com fragmentos esparsos; arenitos médios a finos maciços (dispostos em camadas amalgamadas); arenitos médios a finos com laminações cruzadas cavalgantes; siltitos deformados em camadas lenticulares decimétricas e por fim, siltitos e argilitos laminados de espessura centimétricas (Fambriniet al. 2005). Além disto, são encontrados pacotes de conglomerados que correspondem às franjas internas e intermediárias de leques subaquosos.

A Formação Seival ocorre na região leste da área (**Figura 2.2**). Esta unidade é constituída por pacotes tabulares de ritmitospsamo-pelíticos interpretados como oriundos de depósitos litorâneos de planície de marés com espessura aflorante de cerca de 600m (Fambrini et al. 2007).

Em sua constituição, próximo a área do projeto, são percebidas alternâncias bruscas de três fácies: uma delas caracterizadas por arenitos médios a finos, maciços, comumente de base erosiva. Outra fácies intermediária é caracterizada por arenitos médios a finos, micáceos, com laminação plano-paralela. E uma última fácies, composta por uma delgada película de argila na interface entre as camadas arenosas (Fambrini *et al.* 2007).

A Formação Rincão dos Mouras pode ser verificada em um setor a nordeste da área (Figura 2.2). Esta unidade ocorre como espessos pacotes de conglomerados com padrão granodecrescente para o topo e tem sido interpretada como depósitos de leques aluviais. Localmente, ocorrem arenitos conglomeráticos e com estratificações cruzadas acanaladas relacionadas a sistemas fluviais entrelaçados (Fambrini *et al.* 2005).

A Formação João Dias é composta por espessos (>500m) depósitos de arenitos marinhos costeiros. Esta unidade está presente na porção centro e a noroeste da área (Figura 2.2). A origem deste pacote tem sido interpretada como proveniente de um evento transgressivo sobre leques aluviais. Petrograficamente é caracterizada por predomínio de arenitos médios bem selecionados, com presença local de arenitos finos e conglomerados finos em camadas pouco espessas.

O Grupo Guaritas ocorre na porção oeste, noroeste, sul e leste da área do projeto (Figura 2.2). Esta unidade repousa sobre as unidades que compõem o Grupo Santa Bárbara. Ela é constituída por espessa sucessão de arenitos conglomeráticos, conglomerados, ritmitospsamo-pelíticos e arenitos finos a médios com estratificação cruzada de grande porte (Almeida 2005).

Almeida (2005) propõe uma revisão do empilhamento estratigráfico do Grupo Guaritas com base em um estudo que contou com descrições de campo e dados geofísicos (a partir do método de eletrorresistividade, compondo perfis de tomografia elétrica). Nesta proposta o Grupo Guaritas foi subdividido em seis formações: Guarda Velha, Varzinha, Pedra da Arara, Pedra Pintada, Pedra das Torrinhas e Serra do Apertado.

Na área do projeto, com base nos dados de Almeida (2005) podem ser identificadas as seguintes unidades do Grupo Guaritas: Formação Guarda Velha, Formação Varzinha, Formação Pedra Pintada e Formação Serra do Apertado.

A Formação Guarda Velha ocorre nas porções noroeste e sudoeste da área (Figura 2.2) e é constituída por arenitos conglomeráticos com estratificação cruzada ou estratificação plano-paralela, além de lentes de conglomerados. Possui uma espessura mínima de 500m e sua relação de contato com as unidades adjacentes é do tipo discordância angular por sobre o Grupo Santa Bárbara e contado gradacional com a Formação Varzinha (Almeida 2005). Sua sedimentação foi interpretada como ocorrendo predominantemente em depósitos de sistemas de leques aluviais. Tectonicamente esta unidade é associada a um estágio pré-rifte ou ao estágio precoce do rifte da bacia Guaritas (Almeida *et al.* 2009).

A Formação Varzinha está presente em uma faixa SW-NE na porção leste da área (Figura 2.2). É composta por arenitos laminados, intercalados a siltitos gretados e arenitos conglomeráticos e apresenta espessura mínima de 200 m (Almeida 2005). São descritas duas associações de fácies para esta unidade: planície de inundação efêmera associada com canais efêmeros que foram depositados em um momento de alta taxa de subsidência da bacia associado a baixo aporte de sedimentos (Almeida *et al.* 2009).

A Formação Pedra Pintada apresenta espessura variada devido a sua relação de contato erosivo com a unidade a ela sobreposta, a Formação Serra do Apertado. Possui um contato basal abrupto com a unidade Formação Pedra das Araras, não preservado na área em estudo e ocorre na porção extremo sudeste da área (Figura 2.2). A espessura mínima desta unidade é de 130 m e é composta por arenitos finos a médios com estratificação cruzada de grande porte, arenitos com estratificação plano-paralela com intercalações esparsas de pelitos com gretas de ressecamento (Almeida 2005). Constitui depósitos de campos de dunas eólicas com retrabalhamento de sedimentos aluviais. Subordinadamente aos campos de dunas é possível identificar a coexistência de canais efêmeros indicado por fácies de inundações entre dunas. Esta unidade é interpretada como depositada em condição de diminuição da taxa de subsidência da bacia com sua progressiva denudação até culminar com a instalação de ambiente eólico (Almeida *et al.* 2009).

A Formação Serra do Apertado é a unidade de topo do Grupo Guaritas e é constituída por arenitos conglomeráticos com seixos arredondados e lentes de conglomerados, semelhantes aos da Formação Guarda Velha. Sua espessura preservada é da ordem de 200 m. Possui contato marcado por uma superfície erosiva com a unidade subjacente (Almeida 2005). Sua deposição se deu em estágio pós-rifte e é marcada por sedimentos oriundos de rios efêmeros. Não há evidência de falhamento ativo o que indica uma subsidência termal, gradual e homogênea neste estágio (Almeida *et al.* 2009).

Na área em estudo podem ser identificadas duas sequências psamíticas de origens distintas. A Formação Varzinha corresponde a uma sequência de origem fluvial dominada por cargas mistas, enquanto a unidade Pedra Pintada a uma sequência originada em ambiente de dunas eólicas com interdunas fluviais. São também verificados na base destas unidades, derrames basálticos com afinidade a magma oriundo de um manto modificado por metassomatismo e/ou fluido derivados de subducção com alguma contaminação crustal denominados de Formação Rodeio Velho (Borba 2006)

A Suíte Intrusiva Rodeio Velho corresponde a derrames de basaltos alcalino que ocorrem como intercalações com os depósitos aluviais e eólicos pertencentes aos grupos Guaritas e Santa Bárbara. Sua colocação na crosta remonta ao desenvolvimento do hemi-gráben Guaritas (Almeida *et al.* 2005). Segundo estes autores, observações de campo indicam que sua formação é

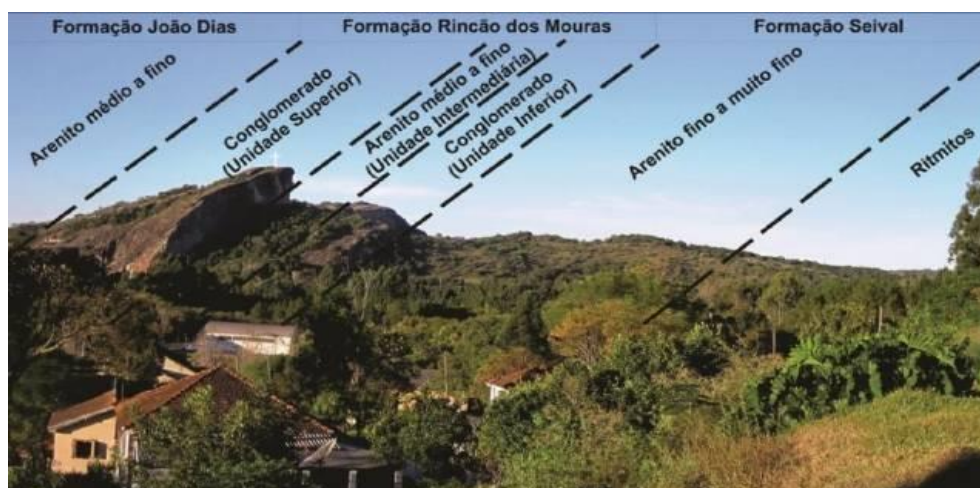


contemporânea à deposição da fácies aluvial e eólica do Alogrupo Guaritas. Na área este magmatismo é representado por uma sucessão de três derrames de composição andesítica, com um grande número de vesículas em geral preservadas no topo dos eventos vulcânicos individuais.

## Geologia Local

No presente trabalho utilizou-se a subdivisão do Grupo Santa Bárbara proposta por Fambrini *et al.* (2005), uma vez que a empresa que pretende instalar o empreendimento de extração mineral trata seus dados a partir das denominações propostas por estes autores e esta é considerada a divisão mais apropriada para a região. Assim na área de estudo o Grupo Santa Bárbara é dividido nas seguintes unidades formais: Formação Passo da Capela, Formação Seival, Formação Rincão dos Mouras e a Formação João Dias.

Na área em estudo foram reconhecidas rochas atribuídas às seguintes unidades: Formação Passo da Capela, Formação Seival, Formação Rincão dos Mouras do Grupo Santa Bárbara, além de arenitos do Grupo Guaritas. A Figura 2.3 apresenta uma seção esquemática que associa as unidades geológicas do Grupo Santa Bárbara ao relevo local da região de Minas do Camaquã.



**Figura 2.3** -Seção esquemática integrada incluindo a seção superior do Grupo Santa Bárbara nas proximidades da localidade de Minas do Camaquã.



**Figura 2.4** -Exposição de conglomerados clasto-suportado e matriz-suportado estratificados com arenitos maciços da Formação Rincão dos Mouras.



**Figura 2.5** - Fácies de conglomerado clasto-suportado com fragmentos subarredondados de granito, gnaisse, quartzito, quartzo de veio e basalto.

As fácies de conglomerados se intercalam verticalmente com arenitos e grauvasas laminadas ou maciças que marcam típicos ciclos de interdigitação lateral de leques aluvionares depositados por fluxos de detritos subaéreos (Figura 2.6).



**Figura 2.6** - Exemplo de testemunho de sondagem que intercepta conglomerados, arenitos e grauvasas em diferentes profundidades.

As fácies de conglomerados são maciças ou exibem acamamento difuso e são mal selecionadas, contendo na mesma camada clastos maiores que 10 cm associados a clastos subcentimétricos (Figura 2.7)



**Figura 2.7** -Detalhe de fácies de conglomerado com acamamento difuso e mal selecionamento (clasto de basalto maior que 10 cm na porção central da imagem associado a outros fragmentos líticos sub centimétricos).

O Grupo Guaritas na área da futura lavra é representado por arenitos, finos até grossos, rosados, fortemente cimentados por cimentos de sílica e óxidos e intensamente fraturados por um padrão ortogonal e denso de fraturas verticalizadas (Figura 2.8).



**Figura 2.8** -Exposição de arenito do Grupo Guaritas, com mergulho de cerca de 12°, cor rosada avermelhada típica de *redbeds*, intenso fraturamento e exposições com esfoliações esferoidais devido ao elevado grau de compactação mecânica da rocha.

## 2.2 HIDROGRAFIA

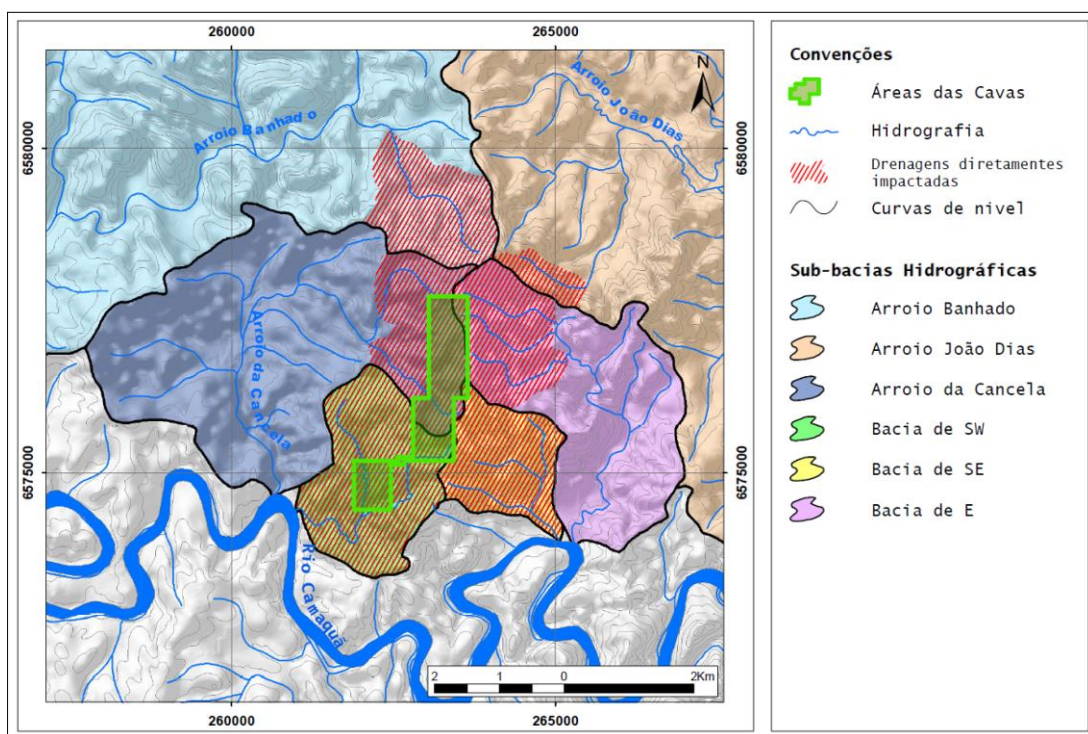
Á área em questão encontra-se situada na margem esquerda do rio Camaquã, que se constitui o divisor entre os municípios de Caçapava do Sul, no qual a área está localizada, e o município de Bagé.

A mineralização ocorre em uma elevação alongada na direção aproximadamente norte-sul que funciona como um divisor entre drenagens de leste e oeste desta estrutura, estando parcialmente na área de abrangência de sub-bacias de expressão localizada.



Somente a norte da área ocorrem drenagens que vertem para as bacias hidrográficas do Arroio João Dias e Arroio Banhado, que são as bacias de maior expressividade localizadas no entorno da área e que se encontram para leste e oeste, respectivamente. No entanto são afetadas áreas de proporções diminutas tanto em se tratando de descargas provenientes da região abordada, como em termos de percentual de área das citadas bacias (Figura 2.9). Convém mencionar que a área de abrangência, destas duas últimas se estende quase que totalmente no extremo a oeste e a leste da área, e fora da área de maior influência do empreendimento a ser instalado. Estas sub-bacias, em relação à bacia dos arroios João Dias e Banhado, representam 0,2 e 4,0%, respectivamente.

Na Figura 2.9 estão discriminadas as sub-bacias citadas no parágrafo anterior, bem como a quota de drenagens que será influenciada diretamente pelo empreendimento. As bacias como um todo somam uma área de aproximadamente 35,4 km<sup>2</sup> e que representa 0,16% da área da Bacia Hidrográfica do Rio Camaquã (que possui uma área de 21.623,15 km<sup>2</sup>), no entanto se forem contabilizadas somente às sub-bacias que terão franca influência pelo empreendimento, este percentual reduz-se a 0,08%.



**Figura 2.9** -Hidrografia da área de estudo.

As sub-bacias de um modo geral são recobertas por uma vegetação campo-arbustiva e vassourais, que se concentra nas encostas dos morros. Junto aos córregos e sangas há o adensamento da vegetação formando florestas de porte considerável. Do ponto de vista de escoamento hídrico, as sangas e arroios são de relevância localizada o que é um reflexo das

características hidráulicas dos aquíferos nos quais estão inseridas (o que será discutido em capítulo posterior).

A sub-bacia de sudoeste da área é representada por pequenas sangas de direções aproximadamente NS. Repousa por sobre um substrato rochoso constituído por arenitos finos. Na sua porção mais a sul, onde o córrego corre com menor energia, o substrato é predominantemente silto-argiloso.

A sub-bacia de noroeste, denominada Sanga da Cancela e que se estende para oeste da área de estudo, é representada por pequenas drenagens de direção preferencialmente NW, na sua porção mais próxima ao empreendimento e preferencialmente EW, em sua porção a jusante, além do empreendimento. Na porção que drena áreas mais elevadas e que verte a partir da área do projeto é percebido um forte controle estrutural que imprime uma configuração NW na direção de escoamento das drenagens. Percebe-se um substrato pedregoso, com a vegetação predominantemente de porte arbustivo e que se torna mais densa nas linhas de drenagem. Já na porção mais a jusante, onde o terreno adquire mais baixa declividade e cujas drenagens possuem orientações aproximadamente EW.

A sub-bacia de sudeste é constituída por drenagens de pequenas extensões até seu o desemboque no rio Camaquã. Drenam a porção sul da área e repousa por sobre um substrato rochoso, composto por arenitos finos. Na sua porção mais a sul e de mais baixa energia, o substrato é predominantemente silto-argiloso.

A nordeste e a leste da área de estudo ocorrem drenagens de direção NW-SE de pouca expressão e que vertem para um pequeno curso d'água que corre no fundo de um vale e que escoam com menor energia até seu desemboque no Rio Camaquã. A área de abrangência de sua bacia é de cerca de 9 km<sup>2</sup>. A configuração desta drenagem é condicionada por descontinuidades de mesma direção que ocorrem na área. Possui relevo relativamente íngreme quando comparados às bacias adjacentes. Percebe-se um substrato saprolítico, pouco desenvolvido nas encostas, encoberto com vegetação de porte arbustivo. Concentrados no alinhamento das drenagens há um solo já mais bem desenvolvido que sustenta uma vegetação de porte arbóreo.

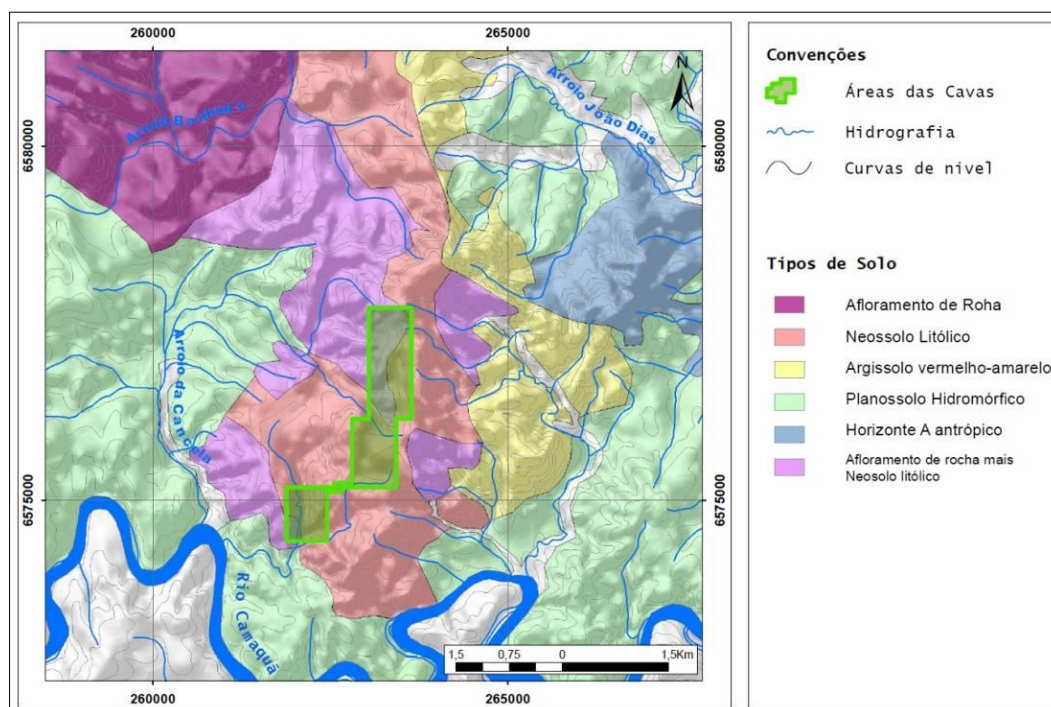
A sub-bacia de sudeste é constituída por drenagens de pequenas extensões com direções predominantemente EW. Grande parte delas apresentava-se seca nos períodos de realização dos trabalhos de campo. Suas cabeceiras drenam uma região de mais alta declividade que é constituída por um saprolito de arenitos finos. Na sua porção mais a sul onde o curso d'água atinge as mais baixas energias, situado em uma depressão suavemente inclinada que por fim, deságua no rio Camaquã.

## 2.3 SOLOS

A caracterização dos solos na região foi realizada pelo cotejo entre o que foi observado em campo, imagens de satélite e o trabalho desenvolvido por Hansen & Fensterseifer (2000) para a bacia do Arroio João Dias, bacia hidrográfica contígua à área estudada (Figura 2.10). As duas bacias possuem características geológicas e geomorfológicas bastante similares.

A área onde será instalado o empreendimento propriamente dito, está em uma região mais elevada com encostas relativamente íngremes. Comumente ao longo da área, caminha-se sobre afloramento de rocha pouco alterada ou sobre um solo muito pouco desenvolvido. Esta região é caracterizada por Neossolos Litólicos com ou sem afloramento de rocha sã. Percebe-se um horizonte A fraco, com uma tendência de transporte dos horizontes A e B para as porções mais baixas. O perfil característico destas áreas é de um horizonte A que repousa diretamente sobre a rocha (contato lítico) ou sobre o horizonte C (Figura 2.11).

Na porção leste da área podem ser observados, segundo Hansen & Fensterseifer (2000), Argilossolos Vermelho-Amarelos que ocorre em relevo de colinas e platôs. Estes solos correm associados a depósitos coluvionares e eluvionares e a regiões de relevo ondulado a forte ondulado. Verificou-se a presença de horizonte A1 (0 a 15 cm de profundidade), A2, B textural mais argiloso que o A. No sub-horizonte B2 ocorrem fragmentos líticos, cerosidade e é diretamente sobreposto ao horizonte C.



**Figura 2.10** -Distribuição dos tipos de solos na região. Modificado de Hansen& Fensterseifer (2000).



**Figura 2.11** -Aspecto do solo típico do local onde será instalado o empreendimento. Neossololítico em contato lítico ou com sequência de horizontes A-C-R entre exposições rochosas.

Nas porções SE e W da área verifica-se uma morfologia plana ou suave ondulada onde ocorrem Planossolos Hidromórficos. Este tipo de solo está associado a regiões de várzea. A espessura média do horizonte A é em torno de 70 cm. Possui um B com textura argilosa com argila de alta atividade. De um modo geral possuem texturas variadas de média arenosa a argilosa (Hansen & Fensterseifer 2000).

Na região a NE da área onde será implantado o empreendimento verifica-se a presença de um solo com Horizonte A antrópico. Esta região é marcada pela presença das antigas instalações da CBC (Companhia Brasileira do Cobre), bem como pela supressão da vegetação, constante presença de aterro e de construções. Apesar de não fazer parte da Classificação Brasileira de Solos, esta tipologia é aqui citada, conforme proposto e justificado sua discriminação por Hansen & Fensterseifer (2000), devido a sua grande abrangência na área do projeto.

Associadas à relevos planos ou suave ondulados, localizados ao longo de planícies de inundação dos sistemas que drenam a área estão presentes os Neossolos Flúvicos.

Na região mais a noroeste da área da mesma forma como no parágrafo anterior, a tipologia Afloramento de Rocha não compõe uma classe inerente à Classificação Brasileira de Solos, entretanto esta tipologia é aqui citada, também conforme proposta e justificada sua discriminação por Hansen & Fensterseifer (2000). Esta é uma unidade de mapeamento e serve para discriminar em relação as classes de solos identificadas. Esta unidade de mapeamento corresponde a conglomerados e arenitos friáveis do Grupo Guaritas.

## 2.4 GEOMORFOLOGIA

De acordo com classificação proposta pelo IBGE (IBGE 2009), do ponto de vista regional, a área encontra-se situada no domínio morfoestrutural Cinturões Móveis Neoproterozoicos que são representadas por planaltos, alinhamentos serranos e depressões interplanálticas elaborados

em terrenos dobrados e falhados. Em termos mais específicos a área encontra-se na Região Geomorfológica Planalto Sul - Rio Grandense, dentro das unidades Planaltos Residuais Canguçu (porção mais central e noroeste) e Planalto Rebaixado Marginal (restante)(IBGE 2003)

A região possui uma amplitude topográfica de cerca de 220 m em que as cotas mais elevadas podem ser encontradas na porção centro norte da área, lugar onde será implantado o empreendimento. As elevações máximas encontradas podem chegar a cerca de 340 m. No setor sul da área estão presentes as menores elevações, que têm cota mínima na ordem de 120 m. A declividade relevo mais frequente na região é de cerca de 5% chegando até 16%.

Segundo classificação proposta por Ross (1992), a paisagem caracteriza-se no setor central como uma Colina com Crista Alongada na direção aproximadamente NS. Esta estrutura sustentada pelas unidades areníticas e conglomeráticas do Grupo Santa Bárbara (Formação Rincão dos Mouras, predominantemente), capeada nos pontos mais elevados pelos arenitos e conglomerados do Grupo Guaritas (Formação Guarda Velha). Neste setor, percebe-se o predomínio de Neossolos Litólicos e afloramento de rocha.

Na porção sudeste e sudoeste ocorre o compartimento geomorfológico Áreas Planas que se caracteriza por regiões com denudação pronunciada, aplainada levemente ondulada por relevo relativamente arrasado causado pela erosão diferencial, e pela acumulação de material proveniente das vertentes adjacentes, quando da ocorrência de episódios pluviométricos mais intensos. A sudoeste esta tipologia ocorrem, sobretudo, no contexto de rochas da Formação João Dias que é composta por arenitos fino. Na porção sudeste esta paisagem ocorre, sobretudo sobre rochas da Formação Seival (Grupo Santa Bárbara) com arenitos médios a finos, às vezes micáceos e com uma delgada película de argila na interface entre as camadas arenosas, onde ocorrem Planossolos Hidromórficos.

Na região a noroeste a tipologia Morrotes Alongados ocorre como afloramentos de rocha da Formação Guaritas compondo a paisagem formando Platôs ruineformes. Possui um forte controle estrutural determinado pela erosão diferencial, potencializada pelas famílias de descontinuidades de direção N-S e NW-SE. Camadas de solos são quase inexistentes na área de ocorrência deste compartimento.

## **2.5 CLIMA**

A área de estudo está inserida em um contexto climático de transição entre o clima temperado e tropical denominado de Subtropical. Entende-se que o clima é do tipo mesotérmico, não possuindo estação chuvosa ou seca bem definida (Nimer 1989 *apud* Britto 2004). De acordo com a classificação de Köppen (1931 *in* Kuinchtner & Buriol 2001), o clima desta região pode ser classificado como tipo *Cfa*. Este tipo climático é comumente referenciado como temperado quente



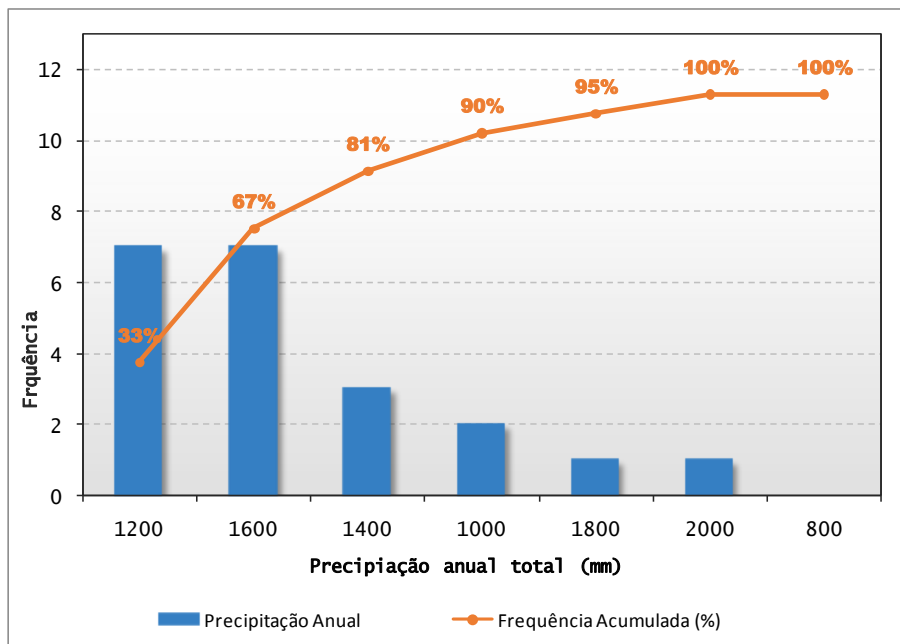
que é entendido como transicional entre o tropical chuvoso e o clima continental mais severo dos polos. Possui como características um verão quente e úmido e clima frio e úmido durante o inverno. Os dados de precipitação apresentados mostram bem esta característica. Observam-se alta umidade ao longo de todo ano hidrológico propiciado pelas chuvas ocorrentes durante todo o período.

Os dados pluviométricos apresentados na Tabela 2.1 referem-se a estação pluviométrica Passo do Cação. Esta estação era localizada a cerca de 5 km da área do projeto, teve suas operações iniciadas no ano de 1976 e encerradas no ano de 2009.

Na Figura 2.12 são apresentados dados de precipitação do período de 1977 a 2008. Foram suprimidos os anos cujos dados estavam incompletos. A precipitação média anual é de 1.302 mm com máxima de 1.845 e mínima de 883, sendo as precipitações mais frequentes em torno de dois valores, 1200 mm e de 1600 mm.

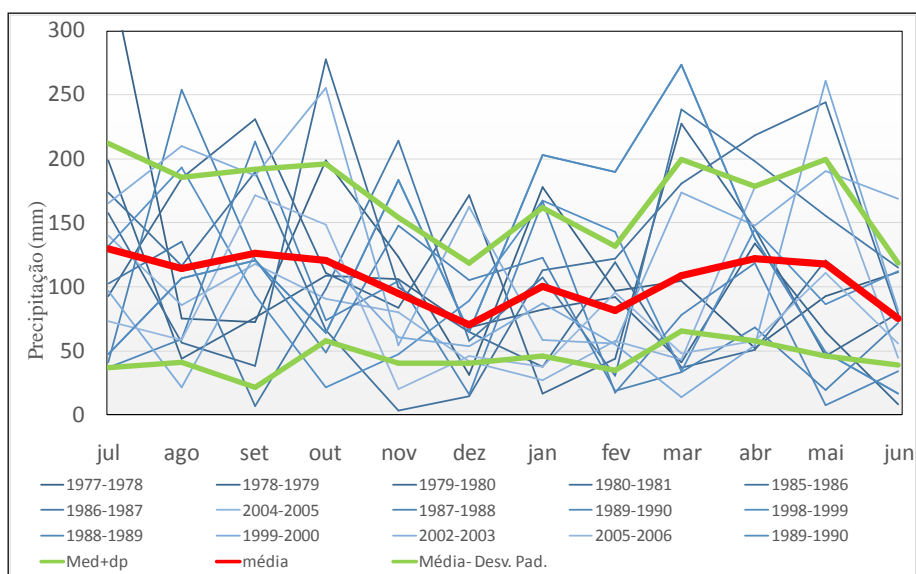
Anos	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Total
<b>1977-1978</b>	354.3	75.3	72.2	199.0	123.7	31.2	178.0	97.1	104.5	52.0	92.9	111.9	1492.1
<b>1978-1979</b>	198.7	43.8	76.2	108.8	106.3	68.3	82.6	92.2	41.3	133.8	65.0	8.4	1025.4
<b>1979-1980</b>	92.5	185.1	230.6	110.9	83.6	171.3	16.7	43.6	227.8	145.1	46.2	79.4	1432.8
<b>1980-1981</b>	157.5	56.7	38.1	277.4	99.7	65.1	37.8	119.2	36.6	51.1	120.9	76.0	1136.1
<b>1985-1986</b>	173.5	116.2	190.1	66.1	3.1	14.7	113.2	122.0	181.0	218.2	244.0	78.9	1521.0
<b>1986-1987</b>	102.8	135.5	7.2	98.4	213.9	58.1	107.1	30.4	238.6	198.2	155.8	115.0	1461.0
<b>1987-1988</b>	40.9	254.2	121.4	48.9	147.9	105.3	122.6	18.6	33.4	68.4	19.8	72.1	1053.5
<b>1988-1989</b>	37.1	59.3	213.4	73.6	104.5	15.7	167.0	17.6	78.2	118.4	7.7	33.8	926.3
<b>1989-1990</b>	47.6	106.4	120.6	64.1	183.6	64.8	203.1	189.5	273.7	137.8	49.0	17.0	1457.2
<b>1998-1999</b>	131.7	193.3	93.3	21.9	47.5	89.5	167.4	142.7	34.4	145.0	86.3	112.4	1265.4
<b>1999-2000</b>	97.2	21.8	125.4	121.5	60.9	53.6	87.2	55.0	14.1	54.3	261.2	81.9	1034.1
<b>2002-2003</b>	165.0	209.7	187.2	255.5	54.1	162.4	58.3	56.1	173.5	147.9	190.4	168.8	1828.9
<b>2004-2005</b>	140.5	85.9	117.6	90.9	80.4	41.7	27.1	58.1	43.1	178.1	200.4	44.3	1108.1
<b>2005-2006</b>	73.5	58.5	171.3	148.7	20.4	45.7	37.6	95.8	47.9	57.7	111.0	55.9	924.0
<b>Média</b>	129.5	114.4	126.0	120.4	95.0	70.5	100.4	81.3	109.2	121.9	117.9	75.4	1261.9
<b>Mínima</b>	37.1	21.8	7.2	21.9	3.1	14.7	16.7	17.6	14.1	51.1	7.7	8.4	924.0
<b>Máxima</b>	354.3	254.2	230.6	277.4	213.9	171.3	203.1	189.5	273.7	218.2	261.2	168.8	1828.9

**Tabela 2.1** - Total mensal precipitado. Estação Passo do Cação.



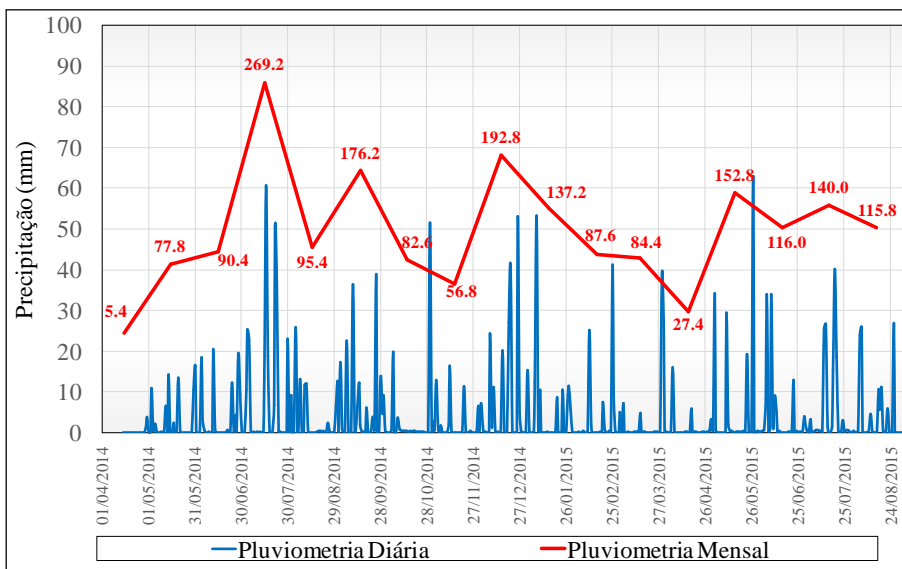
**Figura 2.12** - Frequência de ocorrência da precipitação anual total.

A Figura 2.13 mostra a representação gráfica de dados pluviométricos monitorados na estação Passo do Cação, bem como a precipitação média e seu desvio padrão. Os meses foram organizados de julho em acordo para facilitar a comparação com o pluviômetro instalado no local.



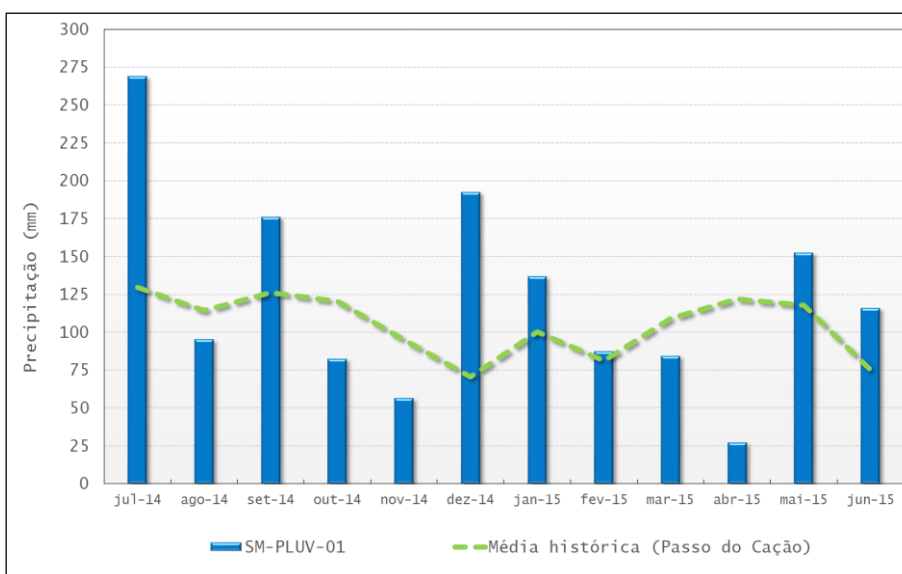
**Figura 2.13** - Representação gráfica da distribuição da precipitação ao longo dos meses de 1977 a 2008.

Em abril de 2014 foi instalada uma estação pluviométrica automatizada na área do projeto. A seguir na **Figura 2.14** está representado o gráfico com os volumes de precipitação mensal diária e mensal ocorrida no período de 14/04/2014 a 24/08/2015.



**Figura 2.14** -Precipitação diária e mensal de 14/04/2014 a 24/08/2015.

Na Figura 2.15 está representado o cotejo dos dados de precipitação mensal na estação SM-PLUV-01 instalada na área do projeto e a média mensal histórica monitorada na estação Passo do Cação.



**Figura 2.15** -Precipitação mensal no período entre julho/2014 a Jun/2015

## CAPÍTULO 3

### MODELO CONCEITUAL DOS AQUÍFEROS

#### 3.1 CONSIDERAÇÕES GERAIS

Na visão de Feitosa & Feitosa (2008), para a compreensão ampla e aprofundada de um conjunto de sistemas aquíferos, não basta conhecer de forma pontual (no tempo e espaço) as variáveis a eles associadas. Deve-se compreender a sua resposta à exploração da água subterrânea. Assim para a compreensão holística de um reservatório subterrâneo é indispensável o seu monitoramento ao longo do tempo, ficando a exploração e exploração de água estruturalmente vinculadas. Entretanto, conforme já mencionado, para Bredehoeft (2005) nem mesmo o monitoramento seria capaz de fornecer uma visão integral do reservatório, uma vez que a compreensão de seu comportamento só fica efetivamente determinada, na ordem de grandeza do período avaliado. Desta forma, a disponibilidade de dados de um determinado aquífero da ordem de alguns anos, poderia não ser suficiente para fornecer com precisão a sua condição em décadas ou séculos no futuro, dada a complexidade associada às variáveis intrínsecas ao meio, que em muitas vezes tem o seu conhecimento impreciso, ou em alguns casos até mesmo considerado desconhecido em um estágio pouco avançado.

Para Feitosa & Feitosa (2008), de modo geral, existem estágios de estudo a serem empregados na exploração hidrogeológica e que são balizado pelo conjunto de dados disponíveis e/ou a fase e o grau de conhecimento desejado da área. Para citação, têm-se as fases de conhecimento proposta por estes autores que consideram: Estudos Preliminares ou de Reconhecimento, Estudos Gerais e Estudos Detalhados.

De forma sucinta, a primeira fase visa reconhecer os aquíferos mais importantes presentes na área, delimitar as zonas de recarga, avaliar a qualidade das águas, e fazer uma primeira estimativa dos parâmetros hidrodinâmicos. Pelo fato de não exigirem dados geofísicos e de poços de pesquisa, a fase dos Estudos Preliminares é considerada relativamente de baixo custo. A segunda fase deve conter pelo menos itens como inventário detalhado de pontos d'água no entorno da área de pesquisa, perfuração de poços de pesquisa para teste de aquífero e análises químicas. Por fim, na visão dos autores, na fase dos Estudos Detalhados, aplicam-se métodos já citados e qualquer outro que se julgar necessário para ampliar o conhecimento do aquífero com grau de detalhe suficiente para subsidiar, com segurança, um plano de produção do aquífero, para a finalidade almejada.

Na visão clássica, tendo em vista conceitos de evolução dos estudos, como os propostos por Feitosa & Feitosa (2008) é necessário o desenvolvimento de técnicas e procedimentos e

aplicação de diferentes métodos de estudos citados nas diferentes fases de estudos mencionadas nos parágrafos precedentes.

Neste trabalho, por se encontrar em fase inicial de avaliação de viabilidade de para instalação de uma mina de zinco e, por conseguinte, dispondo-se de poucas fontes de dados hidrogeológicos foi proposta uma metodologia de avaliação não clássica, a partir da utilização de recursos e dados disponibilizados e dados gerados durante sua evolução.

Em uma escala macro, foram realizadas análises e integração de dados geológicos de detalhe disponibilizados pela empresa Votorantim Metais mapeados na escala 1:25.000, e dados regionais disponibilizados pela Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais na escala 1:250.000. Além disto, foi realizada a análise de lineamentos, integrando com os dados fornecidos pela mineradora, verificação da distribuição de precipitação em estações pluviométricas oficiais. Em meso escala, foi realizado um cadastro de pontos d'água, medição de vazão nos principais cursos d'água, análises hidroquímicas em amostras de água dos poços e algumas nascentes, estudo de distribuição de dados de RQD (*Rock Quality Designation*) obtidos de testemunhos de sondagem rotativa distribuídos na área alvo de exploração mineral, monitoramento de níveis estáticos, realização de ensaios do tipo "Slugtest" em alguns destes furos, e instalação de um pluviômetro e medição das chuvas durante o período de um ano. Em micro escala, foram feitas análises em seções delgadas utilizando microscópio óptico e análise de dados fornecidos pela Votorantim Metais, oriundos de estudos mineralógicos realizados de forma automatizada, em seções polidas, utilizando software MLA (Mineral Liberation Analyser- FEI) acoplado a um microscópio eletrônico de varredura.

### **3.2 CARACTERIZAÇÃO DO AQUÍFERO**

A área de estudo é constituída, sobretudo, por rochas dos grupos Santa Bárbara e Guaritas que, em consonância ao constatado por Machado & Freitas (2005), se manifestam na área por conglomerados imaturos e arenitos imaturos finos a médios muito endurecidos pelos cimentos calcínicos, silicosos e ferruginosos que proporcionam baixa porosidade residual às rochas. O produto dos processos hidrotermais e diagenéticos resulta em um maciço pouco permeável, com baixo potencial para produção de água, com poços secos ou com vazões insignificantes. Os referidos autores realizaram o mapeamento hidrogeológico do estado do Rio Grande do Sul e de acordo com a classificação proposta, a área em questão está situada na região denominada Aquicludes Eo-Paleozoicos.

Em campo, verificou-se que as citadas unidades possuem baixo grau de alteração com média a baixa densidade de descontinuidades. Trata-se de um sistema aquífero com alto grau de preenchimento do que seria a porosidade primária resultando em um conjunto com porosidade

atual relativamente baixa, o que lhe confere uma reduzida capacidade de armazenamento e baixa capacidade de conduzir água.

Apesar de conceitualmente se apresentarem como rochas granulares clássicas, são amplamente litificadas pelos cimentos calcínicos, silicosos e ferruginosos que lhes confere características similares a um aquífero fraturado, uma vez que o fluxo apenas é possível através das descontinuidades presentes na rocha. Dessa maneira, o potencial de armazenamento de água desses sistemas e a condutividade hidráulica são dependentes de características, como a densidade e interconexão das descontinuidades rochosas, sua abertura e persistência. Em geral, a capacidade de armazenamento é baixa e a condutividade pode ser alta em zonas de cisalhamento e em fraturamentos abertos, mas pode apresentar valores muito modestos em regiões de fraca interconexão dos sistemas de juntas, chegando mesmo a ser praticamente nula em zonas de rocha maciça isentas de fratura. Mais comumente apresenta valores reduzidos desses parâmetros hidrodinâmicos.

Esses sistemas aquíferos dominam amplamente a região central da área de estudo, nas porções mais elevadas, que se caracteriza por uma cobertura, extremamente delgada, constituída por solos autóctones ou não, de natureza granular comumente arenoso, em geral, com algumas dezenas de centímetros de espessura excetuando nas zonas mais rebaixadas e ao longo dos lineamentos de drenagens.

Na parte central da área por sob a delgada camada de caráter intergranular ocorre uma zona aquífera considerada como de natureza fraturada, constituída por rocha praticamente sã, onde a circulação de água é governada pelas descontinuidades rochosas. A zona granular superior é responsável pela alimentação da zona inferior fraturada, e que se dá na mesma proporção de sua espessura, de um modo geral muito restrita, fato este intensificado pela declividade moderada a elevada nesta porção. Ademais, podem ocorrer partições localizadas do fluxo subterrâneo condicionadas por ocorrência subordinadas de diques e *sills* da Suíte Intrusiva Rodeio Velho que possuem características de aquíclode.

No âmbito geral a área é marcada por rede de drenagens bem encaixadas condicionadas por lineamentos (fraturas e falhamentos). A intensa dissecação ao longo dos lineamentos favorece a formação de solos ao longo das drenagens e acúmulo de camadas espessas de sedimentos transportados de porções mais elevadas para a porção mais baixas destes cursos de drenagem. Nestes locais tem origem muitas nascentes de contato, intermitentes de pequenas vazões, que se deslocam jusante ao longo das drenagens, para porções mais rebaixadas do terreno em prolongados períodos de estiagem. A magnitude de restituição do manancial ficou bem documentada nas duas campanhas de inventário de nascentes e medição de vazão nos cursos d'água locais.

No entorno desta área, nos setores SE e W verifica-se uma morfologia plana a suave ondulada que se desenvolve sobre arenitos laminados sendo que estes tipos petrográficos são mais susceptíveis à erosão quando comparado aos litotipos adjacentes. Nestas regiões as recargas são mais eficientes, quando comparada à porção central, no entanto tem-se a circulação das águas subterrâneas abreviada, uma vez que estão próximas a níveis de base local, que correspondem aos cursos d'água e ao exutório regional representado pelo rio Camaquã.

### 3.3 MEDIÇÃO DE VAZÃO EM CURSOS D'ÁGUA

Devido ao prolongado período com elevadas precipitações durante a realização deste trabalho, cujas estações climáticas foram marcadas por sucessivos eventos pluviométricos ao longo de todo o ano, a caracterização das surgências como perenes ou intermitentes, não pode ser conclusiva. Além disto, este fato comprometeu a quantificação das vazões restituídas pelos aquíferos para os cursos d'água vertentes no entorno da área de estudo. Durante as duas campanhas de medição de vazão ocorreram precipitações antes ou até durante o monitoramento. Na Figura 3.1 estão representados os pontos onde foram medidas as vazões. No Anexo 7.1 estão representados os valores de vazão bem como os parâmetros físico-químicos coletados durante as duas campanhas de medição de vazão realizadas, respectivamente, em janeiro e setembro de 2014.

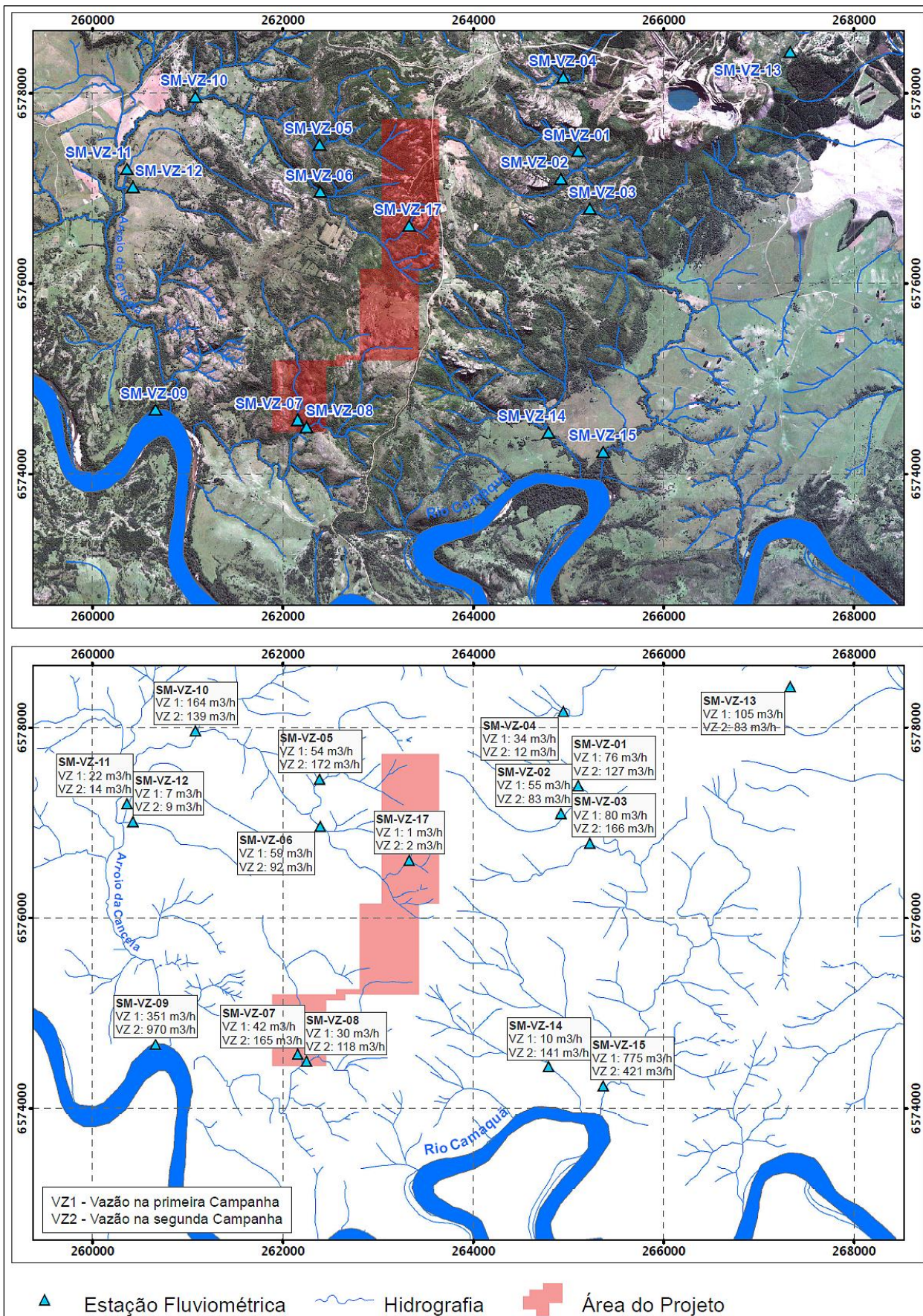
Pelo comportamento dos pontos d'água e pelas vazões relativamente pequenas pode-se inferir que a maior parte representa olhos d'água intermitentes e não nascentes perenes.

As medições foram realizadas utilizando-se “*Flow-Tracker*”. Trata-se de medidor de velocidade/fluxo com sensor acústico por efeito Doppler, processador e visor portátil.

Para medir vazão com o “*Flow-Tracker*”, o curso d'água é dividido em várias seções entre uma margem e outra e, em cada uma é realizada a medida de profundidade e velocidade em um ponto específico localizado a 60% da profundidade da estação (Diego 2007). Quando as seções são combinadas, a vazão total pode ser calculada. A **Erro! Fonte de referência não encontrada.** ilustra o método de Vazão Seção Média.

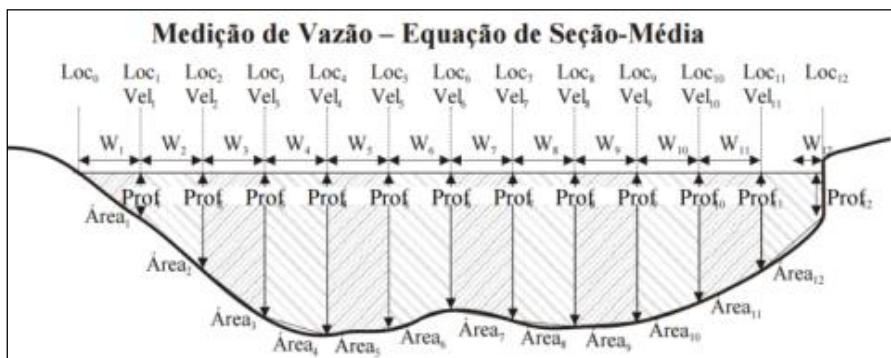
As duas campanhas de monitoramento de vazão tinham por objetivo a caracterização das descargas líquidas dos aquíferos em dois regimes de fluxo distintos, sendo a primeira em período chuvoso e a segunda em período mais seco. No entanto, devido a baixa previsibilidade de chuvas característica do clima local, e como pode ser percebido nas tabelas do Anexo 7.1, na segunda campanha houve um aumento médio de cerca 153% das vazões, quando comparadas as da primeira campanha, impossibilitando a caracterização efetiva do fluxo de base das microbacias que drenam a área. Isto se deveu à precipitação de 176,2 mm nos mês da campanha (setembro).





**Figura 3.1** -Localização e quantificação das vazões nos cursos d'água de entorno da área do projeto.





**Figura 3.2** - Ilustração de uma seção idealizada de um canal natural com distribuição de área para realizar medidas de vazão. Modificado de Diego (2007), onde: **Loc<sub>i</sub>**- Subdivisão unitária da seção do rio (limite das estações de medida); **Vel<sub>i</sub>**- Ponto onde deve ser medida a velocidade; **W<sub>i</sub>**- Largura da estação; **Prof<sub>i</sub>**- Profundidade da estação; **Área<sub>i</sub>**- Área da estação.

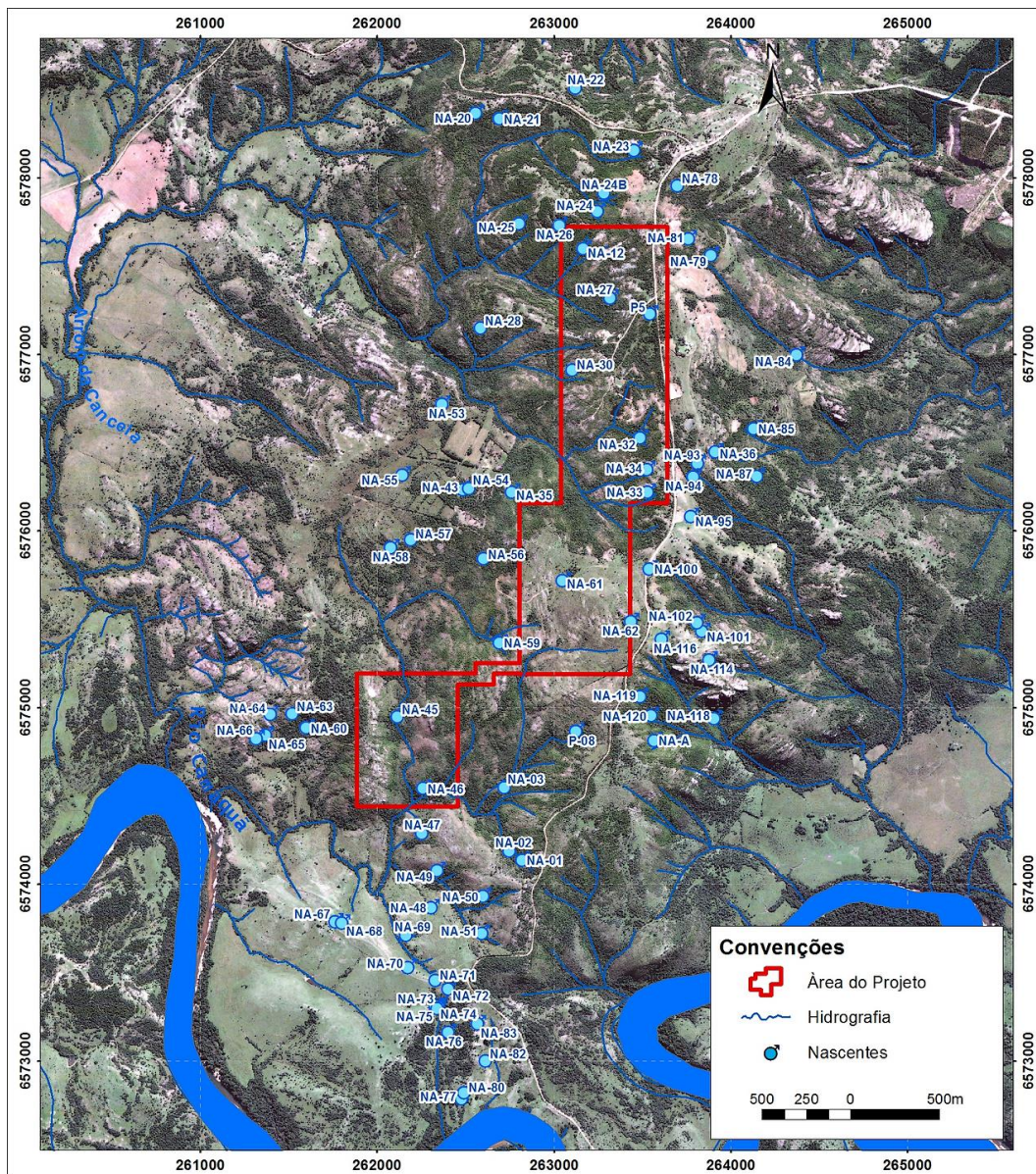
Quanto aos parâmetros físico-químicos encontrados para as águas superficiais, o pH médio ficou em torno de 6,9, e o Eh em 341mV. A condutividade elétrica ficou em torno de 85 $\mu$ S excetuando-se o ponto SM-VZ-13, por possuir valores anômalos de todos os parâmetros, por se tratar de um curso d'água que verte de uma antiga galeria de mina. A água proveniente desta galeria é altamente mineralizada que chega a promover a formação de precipitados cúpricos ao longo do seu leito, fato que se deve ao aumento da superfície de contato entre o maciço rochoso favorecido pelos vazios oriundos das escavações referentes a uma antiga mina de cobre. Por ser considerado um ponto de *outlier*, estes resultados foram retirados dos dados utilizados para a descrição dos aquíferos.

### 3.4 INVENTÁRIO DE NASCENTES

O inventário de nascentes foi fornecido pela Votorantim Metais e teve como fim a realização dos estudos ambientais do futuro empreendimento. Teve como foco a AID (Área de Influência Direta) do projeto. Foram realizadas duas campanhas de inventários de nascentes visto que após a primeira, foi realizada uma revisão do plano diretor do empreendimento o que requereu na necessidade de contemplar uma área adicional. Na segunda campanha, além de registrados pontos adicionais, foram revisitadas as nascentes inventariadas na primeira campanha. A Figura 3.3 apresenta a distribuição das nascentes cadastradas nas duas campanhas. Os dados de coordenadas e cotas topográficas das nascentes cadastradas estão resumidos na tabela do Anexo 7.2.

Na primeira Campanha (fev/2014) foram levantadas 37 nascentes. Do total 80% das nascentes apresentaram descargas líquidas menores do que 0,3L/s, apenas 12% apresentaram vazões superiores a 0,5L/s. De um modo geral, as águas apresentaram valor médio de condutividade elétrica de 53,3 $\mu$ S/cm sendo que 88% correspondem a valores que giram em torno

de 30 e 45 $\mu$ S/cm. O pH médio monitorado nesta campanha, foi de 5,43 e 54% com valores em torno de 5,5.



**Figura 3.3** -Distribuição das nascentes inventariadas.

Nesta campanha, as nascentes com maiores vazões foram a NA-24b (Figura 3.4) e NA-62 (Figura 3.5) com vazões de aproximadamente 2,5 e 1 L/s, respectivamente.





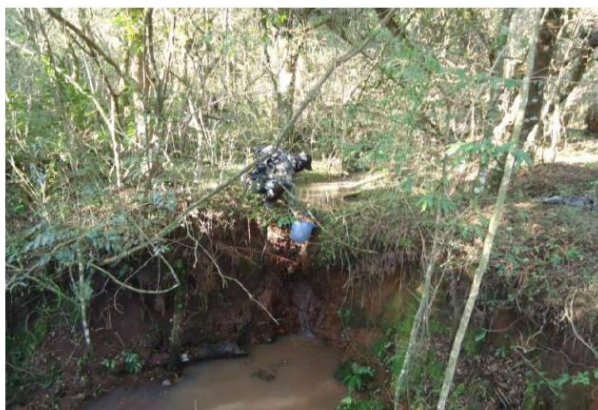
**Figura 3.4** - Nascente NA-24b cadastrada na área do projeto com relativa alta vazão. Modificado de Hidrovia (2014).



**Figura 3.5** - Nascente NA-62 cadastrada na área do projeto com relativa alta vazão. Modificado de Hidrovia (2014).

Na segunda Campanha (jun/2015) foram levantadas 74 nascentes, destas, metade (37) equivalente às levantadas na campanha anterior. Das nascentes inventariadas, 89% tiveram vazões com valores próximos ou menores que 0,3 L/s. Foi verificado um valor médio de condutividade elétrica de 32  $\mu\text{S}/\text{cm}$ , em que 43% das nascentes, possuíam valores em torno de 25 $\mu\text{S}/\text{cm}$ . A média do pH encontrado foi de 5,5, sendo que 41% das nascentes, possui pH com valores próximos a 5,25 e 30% próximos a 6,75.

Nesta campanha, as nascentes com maiores vazões foram a NA-31 (Figura 3.6) e NA-64 (Figura 3.7 **Erro! Fonte de referência não encontrada.**) com vazões no entorno de 1 L/s



**Figura 3.6** -Nascente NA-31 com vazão relativamente elevada cadastrada na área do projeto. Modificado de Hidrovia (2015).



**Figura 3.7** - Nascente NA-64 com vazão relativa pequena cadastrada na área do projeto. Modificado de (Hidrovia 2015)

Os dados físico-químicos medidos *in situ* com equipamento portátil e a vazão medida pelo método do volume aferido, obtida no local mais próximo ao ponto de afloramento da água são apresentados na Tabela 3.1.

A condutividade elétrica reflete o montante e as características das espécies químicas presentes na água, que por sua vez é resultante da interação desta com o meio. À medida que percola o maciço, a água remove e/ou dissolve parte do material que o compõe de forma a aumentar a sua quantidade de íons dissolvidos. Além de fatores como clima, composição inicial da água, o meio físico em si, o tempo de percolação é uma variável que tem influência bastante importante e que pode subsidiar o entendimento e configuração do fluxo subterrâneo. Quanto maior o tempo de percolação, ou seja, quanto maior o contato da água-rocha mais enriquecida em íons dissolvidos será a água do aquífero (Lima *et al.* 2014).

Valores de pH estão relacionados ao balanço dos íons  $\text{OH}^-$  e  $\text{H}^+$ . Da mesma forma como a condutividade, a concentração nas águas subterrâneas relaciona-se as características do meio que ela percola. Os fatores que tem mais influencia no pH, são o gás carbônico dissolvido e a alcalinidade que é a medida da capacidade da água de neutralizar ácidos (Irriga & Precisa 1999).

**Tabela 3.1** - Parâmetros coletados nas nascentes - 1ª e 2ª campanhas.

Nascentes	1ª Campanha							2ª Campanha						
	Q (L/s)	T <sub>Ar</sub> (°C)	T <sub>Água</sub> (°C)	CE (µS/cm)	OD mg/L)	pH	Eh (mV)	Q (L/s)	T <sub>Ar</sub> (°C)	T <sub>Água</sub> (°C)	CE (µS/cm)	OD mg/L)	pH	Eh (mV)
NA-01	-	-	-	-	-	-	-	0.361	13.77	13.81	37	6.62	5.82	383.2
NA-02	-	-	-	-	-	-	-	0.061	11.08	13.56	36	4.87	6.13	354.1
NA-03	-	-	-	-	-	-	-	0.02	13.33	15.52	0	9.21	6.23	325.9
NA-12	-	-	-	-	-	-	-	0.073	10.17	15.67	24	3.65	5.65	324.9
NA-20	0.02	22.56	20.13	36	3.72	4.94	108	0.224	12.25	17.68	25	3.18	5.11	299.8
NA-21	0.01	22.5	20.6	53	0.69	5.08	-61	0.207	8.94	14.69	20	5.18	5.26	240.3
NA-23	<0.01	22.15	20.72	31	0.57	5.22	-85.3	0.247	10.63	13.15	21	6.1	5.04	284.9
NA-24	0.786	23.32	20.96	22	2.83	4.74	89.8	0.058	15.93	15.91	17	5.96	4.66	314.2
NA-24B	2.55	23.4	22.5	21	2.96	5.25	175.9	0.362	15.86	17.15	22	7.08	4.88	322.6
NA-25	<0.01	24.42	22.34	33	3	5.27	23.3	0.261	9.57	14.91	24	8.47	5.4	309.4
NA-26	0.04	24.75	22.43	72	3.19	6.22	47.5	0.14	10.36	13.73	39	5.73	6.1	288.4
NA-27	0.14	22.81	20.57	21	4.66	5.31	-88.8	0.214	10.25	17.81	25	6.65	4.43	310.2
NA-28	<0.01	24.31	21.71	30	2.52	5.41	85.5	0.047	10.6	14.45	25	5.49	4.97	362.5
NA-30	<0.02	25.9	23.27	25	5.05	5.51	107.5	-	-	-	-	-	-	-
NA-32	0.2	23.11	20.32	28	2.85	5.09	25.8	1.017	12.12	15.18	23	3.13	5.09	306.3
NA-33	<0.01	29.07	21.39	40	2.22	5.36	52.7	0.233	12.06	13.87	29	6.17	5.21	333.3
NA-34	0.05	28.68	22.45	34	1.77	5.26	142.7	-	10.62	17.6	71	3.99	4.7	295.9
NA-35	0.24	26.66	22.96	21	4.6	4.99	196.8	0.031	14.66	15.21	28	4.18	4.64	322.4
NA-36	-	-	-	-	-	-	-	0.076	12.88	15.06	21	6.99	5.09	345.2
NA-43	-	-	-	-	-	-	-	0.031	15.35	16.16	22	5.41	4.41	291.5
NA-45	-	-	-	-	-	-	-	-	11.04	16.07	32	4.32	5.57	252.2
NA-46	-	-	-	-	-	-	-	0.104	9.19	13.91	23	5.92	4.94	348.5
NA-47	-	-	-	-	-	-	-	0.029	10.71	16.27	26	6.56	5.15	347
NA-48	-	-	-	-	-	-	-	-	12.63	13.6	56	9.79	6.25	314.3
NA-49	-	-	-	-	-	-	-	0.048	11.42	15.34	67	6.25	5.81	310.4
NA-50	-	-	-	-	-	-	-	-	10.16	14.06	90	7.67	6.31	294.8
NA-51	-	-	-	-	-	-	-	-	10.73	14.71	0	4.76	5.4	314.8
NA-53	-	29.58	28.42	57	2.49	5.55	155.6	-	16.58	14.74	33	5.92	5	253.2

**Tabela 3.1** - Parâmetros coletados nas nascentes - 1ª e 2ª campanhas.

Nascentes	1ª Campanha							2ª Campanha						
	Q (L/s)	T <sub>Ar</sub> (°C)	T <sub>Água</sub> (°C)	CE (µS/cm)	OD (mg/L)	pH	Eh (mV)	Q (L/s)	T <sub>Ar</sub> (°C)	T <sub>Água</sub> (°C)	CE (µS/cm)	OD (mg/L)	pH	Eh (mV)
NA-54	0.44	28.84	20.3	19	5.13	4.61	212.7	-	15.32	16.66	16	6.59	4.43	294.8
NA-55	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
NA-56	0.28	25.07	19.76	24	3.1	4.54	41.7	0.602	10.29	18	22	3.3	4.46	330.5
NA-57	0.1	25.34	21.95	41	1.36	5.48	138.9	0.273	11.61	11.76	22	5.99	5.02	250.1
NA-58	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
NA-59	0.04	25.55	20.37	22	1.36	4.57	168	0.012	9.14	17.02	22	5.73	4.62	321.6
NA-60	-	-	-	-	-	-	-	0.706	18.43	16.39	0	20.76	6.66	271
NA-61	0.3	24.65	21.14	27	3.9	4.63	-32.8	1.136	10.56	9.44	19	12.02	6.51	260.3
NA-62	0.9	30.25	31.09	34	4.03	6.04	-96.8	-	13.71	16.37	38	7.78	5.72	201.1
NA-63	-	-	-	-	-	-	-	0.3	14.98	12.94	27	10.48	6.87	239.7
NA-64	-	-	-	-	-	-	-	0.123	14.33	14.88	18	7.8	6.25	236.7
NA-65	-	-	-	-	-	-	-	0.072	14.2	15.35	26	6.23	5.2	283.1
NA-66	-	-	-	-	-	-	-	<0.01	13.88	14.8	25	8.18	5.28	285
NA-67	-	-	-	-	-	-	-	<0.01	12.42	12.91	38	9.61	7.08	200.1
NA-68	-	-	-	-	-	-	-	<0.01	11.98	12.1	43	9.9	6.28	193.3
NA-69	-	-	-	-	-	-	-	0.057	12.04	14.25	0	7.23	6.16	210.1
NA-70	-	-	-	-	-	-	-	0.655	15.64	15.36	0	9.78	5.79	181.2
NA-71	-	-	-	-	-	-	-	0.025	15.19	12.88	90	10.5	6.95	178.5
NA-72	-	-	-	-	-	-	-	0.014	14.2	13.54	45	7.32	6.01	217.3
NA-73	-	-	-	-	-	-	-	<0.01	14.23	15.13	13	6.8	5.79	235.7
NA-74	-	-	-	-	-	-	-	0.099	14.38	17.12	42	4.23	5.31	255.8
NA-75	-	-	-	-	-	-	-	0.024	16.2	13.93	23	11.3	6.05	240.3
NA-76	-	-	-	-	-	-	-	0.036	14.98	13.27	79	9.07	6.55	216.9
NA-77	-	-	-	-	-	-	-	<0.01	16	16.9	105	2.98	5.91	95.1
NA-78	0.1	27.25	21.04	26	2.19	4.84	157.9	0.534	18.33	17.32	6	3.64	4.3	327.3
NA-79	0.009	26.3	23.62	38	2.33	5.58	65.3	0.194	14.36	15.22	25	4.59	5.25	254.7
NA-80	-	-	-	-	-	-	-	<0.01	15.78	16.34	49	8.19	6.36	152.3
NA-81	<0.01	28.63	20.37	24	3.5	4.76	170.2	0.033	15.27	15.07	5	8.18	5.07	315.5

**Tabela 3.1** - Parâmetros coletados nas nascentes - 1ª e 2ª campanhas.

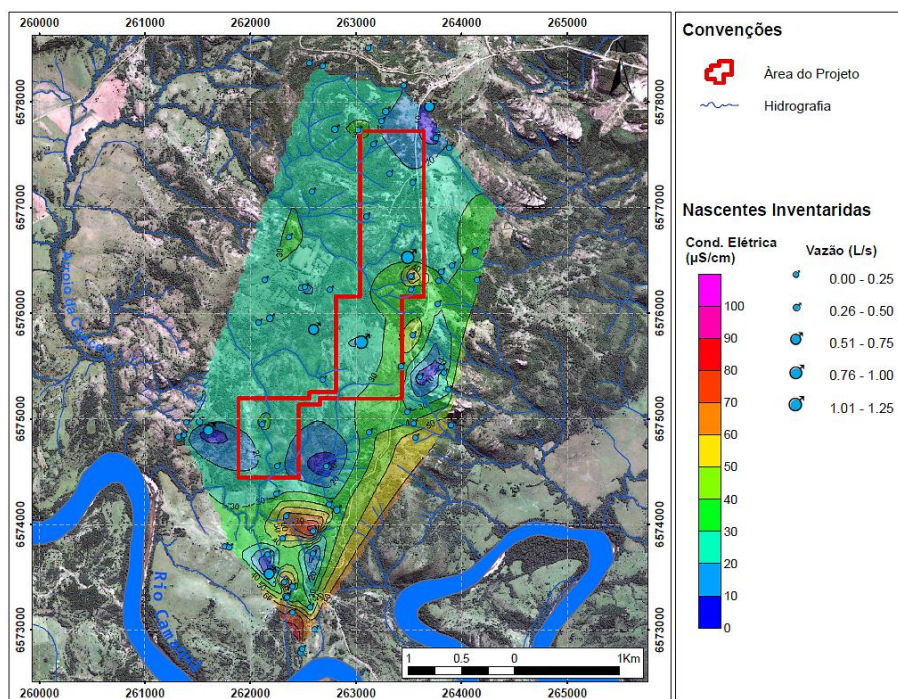
Nascentes	1ª Campanha							2ª Campanha						
	Q (L/s)	T <sub>Ar</sub> (°C)	T <sub>Água</sub> (°C)	CE (µS/cm)	OD mg/L)	pH	Eh (mV)	Q (L/s)	T <sub>Ar</sub> (°C)	T <sub>Água</sub> (°C)	CE (µS/cm)	OD mg/L)	pH	Eh (mV)
NA-82	-	-	-	-	-	-	-	<0.01	16.67	16.76	74	9.53	6.13	116
NA-83	-	-	-	-	-	-	-	0.094	17.31	13.69	31	11.05	6.33	175.2
NA-84	-	27.79	24.15	49	2.45	5.95	113.9	0.022	10.56	14.85	32	6.75	5.53	368.4
NA-85	0.12	23.52	21.04	46	1.15	5.22	138.8	0.14	10.79	15.89	38	3.25	4.97	368.8
NA-87	0.05	24.65	21.66	46	1.14	5.77	86.5	-	-	-	-	-	-	-
NA-93	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
NA-94	<0.01	30.25	23.31	66	1.09	5.94	69.7	0.077	13.29	16.76	32	2.86	4.88	345
NA-95	0.003	31.2	22.95	38	0.6	5.11	155.2	0.247	14.31	17.01	31	3.75	4.71	285
NA-100	0.05	28.88	22.35	39	0.44	5.02	135.07	0.006	15.42	15.96	49	5.61	4.9	334.7
NA-101	-	26.48	23.29	35	1.65	5.13	85.7	0.037	16.03	16.53	36	4.06	4.92	272.6
NA-102	-	-	-	-	-	-	-	0.127	14.45	17.22	0	9.16	5.37	269.4
NA-114	<0.01	27	22.59	23	3.79	5.66	79.6	0.028	14.81	15.03	26	6.58	4.94	314.4
NA-116	-	28.5	28.12	24	4.97	5.84	50.8	-	13.41	17.69	0	13.85	5.5	243.6
NA-118	-	28.97	19.61	73	3.66	5.69	94.8	0.043	10.57	16.19	60	6.07	5.73	249.4
NA-119	0.05	28.42	19.29	42	0.61	5.26	115.06	0.085	12.83	15.33	30	4.65	5.14	328.9
NA-120	-	-	-	-	-	-	-	<0.01	-	-	-	-	-	-
NA-A	<0.01	33.12	24.17	55	1.34	5.3	111.01	-	11.79	13.08	57	8.35	6.19	303.2
P-08	-	-	-	-	-	-	-	0.024	12.33	15.79	38	3.3	4.93	328.9
NA-22	0.092	22.38	20.96	62	5.47	5.51	-95.6	-	-	-	-	-	-	-
P5	-	28.12	28.39	49	2.6	6.02	92.1	-	16.67	13.75	24	8.92	5.9	328



Nas duas campanhas foram evidenciados baixos valores de condutividade elétrica e valores de pH em torno de 5,6, valor considerado típico para chuva quando em equilíbrio com gás carbônico atmosférico, quando não se tem incrementos anômalos, seja de forma natural ou antrópica, de compostos químicos na atmosfera. O que pode ser interpretado como uma resposta do regime de circulação mais rasa das águas subterrâneas inerente ao tipo de maciço presente na área além do fato das campanhas não terem sido feitas em um período totalmente seco o que poderia acarretar na coleta de água de fluxo mais profundo.

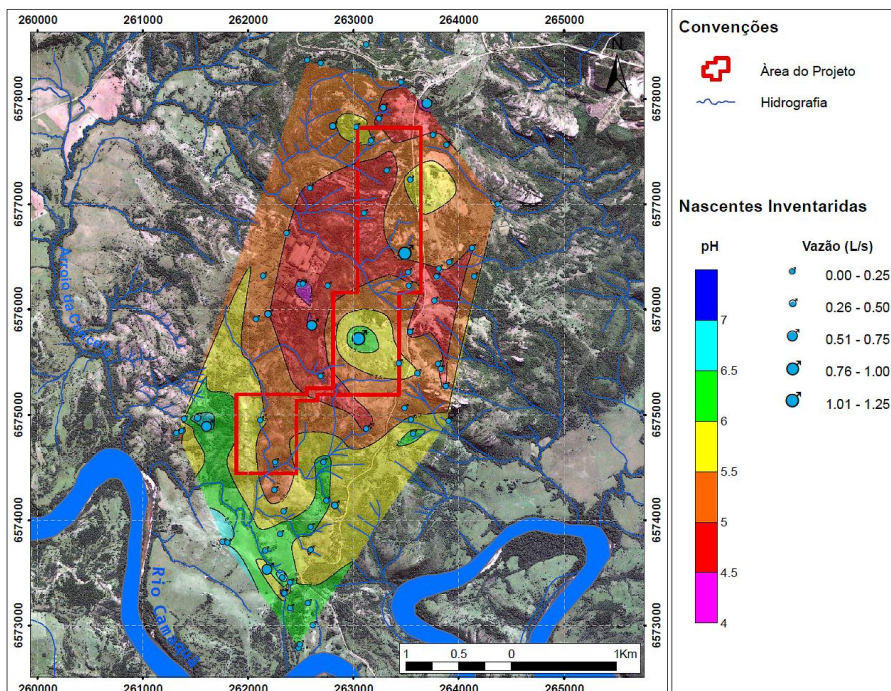
Na Figura 3.8 está representada a distribuição de condutividade elétrica referente a 2ª Campanha de inventário de nascentes. Optou-se por representar os dados da referida etapa, pois abrangeu maiores áreas. Percebe-se, pela imagem, que as nascentes com condutividade elétrica maiores que 30 estão presentes, sobretudo, na vertente leste e na porção sul do divisor de água que contém a zona mineralizada, que por sua vez consiste a área foco deste estudo.

Na Figura 3.9 está representada a distribuição de pH referente à 2ª Campanha conforme explicado no item anterior. Verifica-se que pH menos básicos perfazem a região centro e norte da área que contém a mineralização, sendo que na região sul estão presentes nascentes com água de caráter mais básico. Convém mencionar que nesta região encontra-se um indicador de nível d'água monitorado (INA 12) que apresenta artesianismo alusivo a existência de confinamento ou semi-confinamento localizado do maciço e que poderia estar induzindo maior tempo de circulação da água subterrânea e potencialmente circulação um pouco mais profunda.



**Figura 3.8** - Distribuição das nascentes bem como os dados interpolados de Condutividade Elétrica - 2ª Campanha. Modificado de Hidrovia (2015).





**Figura 3.9** -Distribuição das nascentes bem como os dados interpolados de pH - 2ª Campanha. Modificado de Hidrovia (2014).

### 3.5 POROSIDADE

Em termos de porosidade e conforme já mencionado, apesar de se tratarem de arenitos imaturos e conglomerados polimíticos, que conceitualmente possuem valores elevados de porosidade intersticial, no caso das rochas encontradas na região estudada, o espaço intergranular matricial primário é quase que totalmente preenchido por cimentos calcíticos, silicosos e ferruginosos. Esta afirmação pode ser claramente percebida nas lâminas delgadas confeccionadas de amostras de testemunhos de sondagens. Foram disponibilizados dados de estudos mineralógicos realizados de forma automatizada, em seções polidas, utilizando o software MLA (*Mineral Liberation Analyser*- FEI) acoplado ao microscópio eletrônico de varredura Quanta 600 FEG (FEI) e sistema de microanálise por EDS *EspiritBruker* (20Kve). Os dados das análises mineralógicas e de associações minerais realizadas consideraram tanto contraste de número atômico como a composição química de cada fase (imagens de elétrons retroespalhados e espectros de raios x característicos por EDS, modo GXMAP).

As imagens digitais obtidas foram processadas chegando as seguintes informações:

- Composição mineralógica quantitativa (mineralogia modal);
- Características das associações dos minerais de interesse;
- Grau de liberação dos minerais de interesse;
- Partição dos elementos de interesse nas fases minerais portadores.

Os estudos de análise via MEV e MLA foram executados no Centro de Microscopia da Universidade Federal de Minas Gerais(Lemos 2014).

O dispositivo emite um feixe de elétrons incidente sobre um mineral, os elétrons mais externos dos átomos e os íons constituintes são excitados, mudando de níveis energéticos. Ao retornarem para sua posição inicial, liberam a energia adquirida a qual é emitida em comprimento de onda no espectro de raios-X. Como os elétrons de um determinado átomo possuem energias distintas, é possível, no ponto de incidência do feixe, determinar quais elementos químicos estão presentes naquele local e assim identificar em instantes que mineral está sendo observado. A partir destes dados são criadas imagens pelo MLA semelhante a representada na Figura 3.10 **Erro! Fonte de referência não encontrada.** que corresponde a uma matriz de pixel onde cada um recebe um Número Digital (ND) associado à leitura mineralógica realizada de forma autônoma pelo equipamento. Posteriormente, à cada ND é associado artificialmente uma cor. O resultado pode ser verificado na imagem onde estão representadas as fases minerais presentes na lâmina pelas diferentes cores, conforme a legenda da imagem gerada. No Anexo 7.2 constam as imagens de todas as lâminas avaliadas, bem como a leitura em termos de percentuais das fases mineralógicas que as compõe.

Estes estudos foram feitos para caracterização geometalúrgica do material a ser explorado, mas também fornecem dados substanciais no que tange a porosidade primária do maciço. Para o estudo foram revisitadas quarenta e oito amostras em vinte e um furos de sondagem (rotativa diamantada) e em diferentes profundidades representativos da área estudada. Na Figura 3.10 está representada a imagem digital de uma lâmina feita a partir de testemunho de sondagem do furo PC-A3-79-10 na profundidade inclinada de 171 m (distância vertical estimada em relação a superfície de 141m).

Além dos dados mineralógicos, existem ainda parâmetros identificados pelo dispositivo com "*lowcounts e no\_Xray*". Estes parâmetros correspondentes aos pixels associados à cor branca correspondem a regiões da lâmina onde não são observadas respostas durante a varredura pelo feixe de elétrons e que podem ser traduzidas, para fins práticos, como a porosidade presente na lâmina. Em vista do exposto poder-se-ia fazer uma relação direta entre, porosidade residual e o percentual destes parâmetros.

Na Tabela 3.2 são representadas as coordenadas, bem como a profundidade da amostra recolhida, o nome do furo a qual se refere, e a distância (inclinada) da boca do furo e a profundidade estimada onde foi recolhida a amostra. Além disto, tem-se o percentual de "*lowcounts e no\_Xray*" que, conforme explicitado acima, pode ser traduzido como porosidade da amostra.

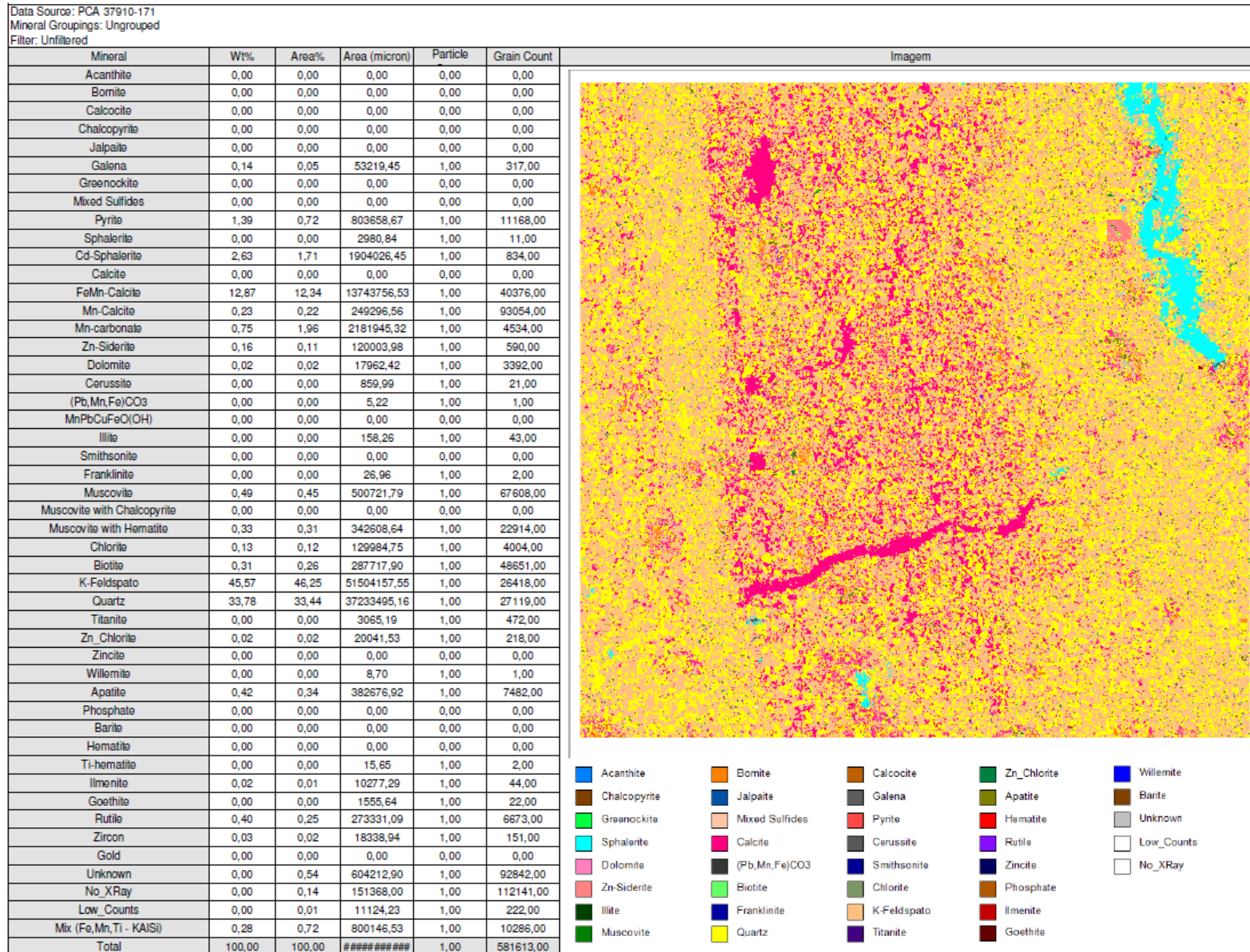


Figura 3.10 - Imagens MLA da amostra PCA37910 171 referente ao furo PC-A3-79-10 em uma profundidade inclinada de 171m.

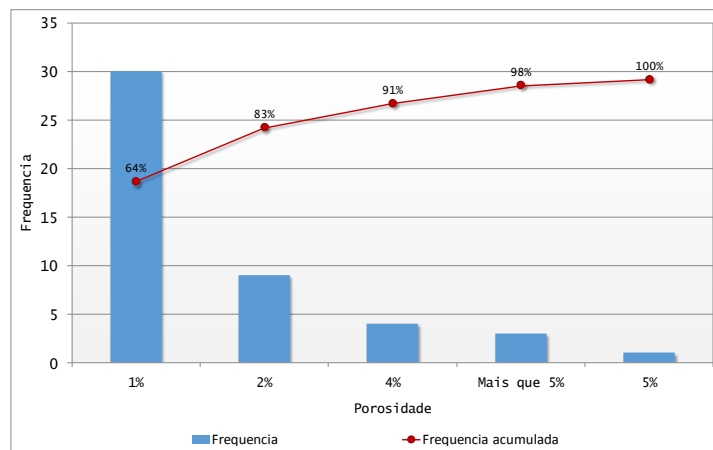
**Tabela 3.2-** Coordenadas UTM dos pontos em que foram obtidas amostras de rochas em que foram confeccionadas seções delgadas analisadas pelo MLA.

Furo	Coordenadas UTM (m)			Distância inclinada em relação á boca do furo (m)	Distância vertical em relação a superfície (m)	Percentual de "lowconts e no_Xray"* (MLA)
	X	Y	Z			
FSM0025	262997	6575597	151	157	141	1,41
FSM0025	263034	6575596	213	84	81	3,01
FSM0052	262907	6575745	95	246	203	0,64
FSM0072	263092	6575744	157	171	141	0,88
FSM0072	263096	6575796	219	89	75	1,25
FSM0073	262997	6575718	181	146	117	5,86
FSM0073	262999	6575751	220	95	79	2,62
FSM0059	263427	6577083	161	178	152	1,33
FSM0059	263422	6577085	154	186	158	1,13
FSM0059	263322	6577126	42	342	262	0,72
FSM0065	263382	6576604	142	191	150	0,05
FSM0065	263349	6576612	100	246	189	1,79
FSM0065	263302	6576625	38	325	248	0,88
FSM0025	262961	6575598	91	227	198	1,41
FSM0052	262904	6575664	171	135	120	0,72
FSM0059	263483	6577059	235	82	84	0,75
FSM0069	263414	6577300	185	148	126	1,01
FSM0029	262147	6574704	42	151	135	1,48
FSM0030	262148	6574584	57	179	115	2,00
FSM0031	262145	6574810	24	161	143	0,49
FSM0070	263203	6575829	239	59	53	4,37
FSM0070	263203	6575827	237	62	56	2,13
FSM0070	263203	6575820	228	73	65	1,43
FSM0073	262998	6575741	208	111	91	3,04
FSM0065	263434	6576597	205	110	92	4,36
FSM0069	263437	6577299	226	102	88	2,52
FSM0022	263298	6577481	148	180	153	0,21
FSM0069	263437	6577299	226	102	88	2,52
PC-A2-79-08	263002	6575666	238	48	58	0,74
PC-A2-79-18	263183	6575717	232	64	67	4,10
PC-A2-79-18	263203	6575820	228	73	65	1,33
PC-A2-87-01	263083	6575736	157	128	141	0,96
PC-A2-87-01	263083	6575736	203	82	95	1,34
PC-A2-87-02	263002	6575666	238	48	58	0,74
PC-A2-87-02	263186	6575769	222	68	74	5,60
PC-A2-87-02	263186	6575769	201	89	95	6,09
PC-A3-79-10	263405	6576916	186	119	114	1,68
PC-A3-79-10	263407	6576913	175	131	125	1,53
PC-A3-79-10	263092	6575744	157	171	141	0,69
PC-A3-84-01	263257	6576574	69	210	212	1,95
PC-A3-84-01	263257	6576574	240	39	41	0,41
PC-A3-87-01	263298	6576562	194	80	90	4,02
PC-A3-87-01	263298	6576562	192	83	92	7,56
PC-A2-79-08	262995	6575663	251	33	45	1,88
PC-A2-79-08	262998	6575665	244	41	52	0,86
PC-A3-79-09	263352	6576943	75	237	225	1,80
PC-A3-79-10	263399	6576923	208	96	92	2,05

\* O resultado de leitura "lowconts e no\_Xray" representa a porosidade na lâmina.

Na Figura 3.11 está representado um histograma com a frequência de valores percentuais de porosidade encontrada.





**Figura 3.11** -Frequência distribuída e frequência acumulada de valores de porosidade intergranular encontrada em lâminas de vinte amostras de rocha retirada do maciço estudado.

Pode se perceber que, de um modo geral, o percentual de porosidade atual ou porosidade residual das amostras mais frequentes são da ordem de 1% (64% das amostras) a 2% (19% das amostras). Além disto, excetuando as amostras mais superficiais, próximos a superfície, pelas imagens percebe-se o baixíssimo grau de conexão dos vazios (Figura 3.10).

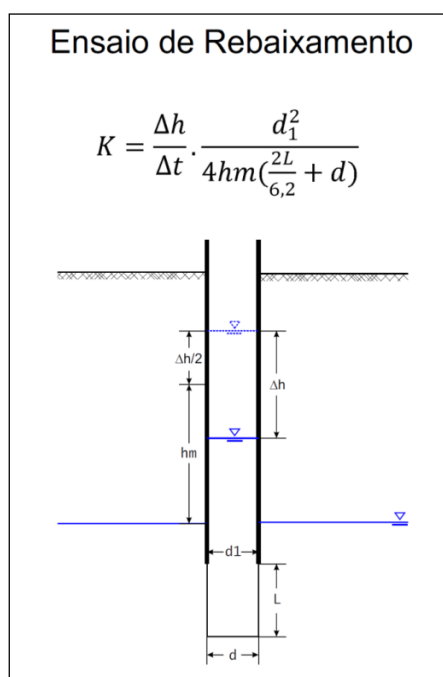
### 3.6 CONDUTIVIDADE HIDRÁULICA

A condutividade hidráulica ( $K$ ) foi obtida em ensaios tipo *slug test* realizados em furos de sondagem que não continham nenhum tipo de completação, estando assim totalmente abertos lateralmente com a água de preenchimento em contato direto com o maciço. As únicas intervenções implementadas nos furos foram a instalação de um tubo de boca nos primeiros metros, a colocação de uma tampa impedindo a entrada de água de chuva (uma vez que estes furos também foram utilizados como pontos para monitoramento de nível d'água) e placa de identificação.



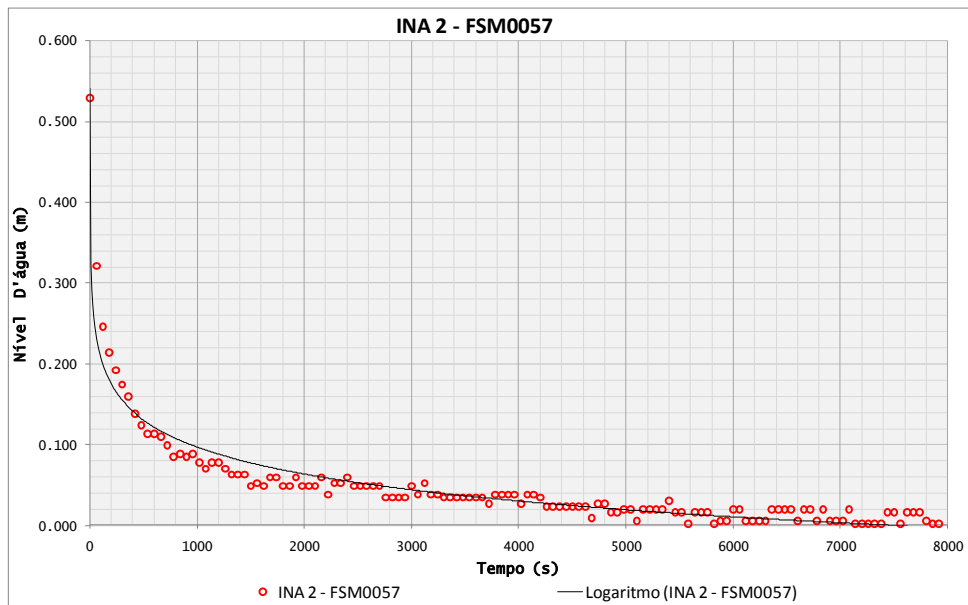
**Figura 3.12** -No centro da figura encontra-se um furo usado para monitoramento de nível d'água instalado na área do projeto. A boca do furo foi revestida com tubo de PVC.

A análise e interpretação dos dados foram realizadas segundo os critérios de Gilg & Gavard (1957) e ABGE (2013) (Figura 3.13). A escolha desta formulação para interpretação dos dados do *slugtest*, procedeu-se pelo fato da água de preenchimento dos furos estarem em contato diretamente com o maciço. Este método foi considerado o mais aplicável, pois no arranjo de poços utilizado não existem dados de "comprimento da câmara filtrante" ou do envelope de pré-filtro (comumente existentes em poços de monitoramento tradicionais). O uso de métodos que utilizam equações clássicas para tratamento de dados deste tipo de ensaio ocasiona a superestimação de variáveis dependentes de dados como comprimento de filtros e espessura do pré-filtro (exemplo métodos de Bouwer & Rice e Hvorslev).



**Figura 3.13** -Esquema de cálculo de condutividade hidráulica modificado de Gilg & Gavard (1957).

Para a realização dos ensaios utilizou-se balde com volume conhecido, um transdutor de pressão com datalogger interno para medição e registro de variação do nível de água no furo. A Figura 3.14 mostra um exemplo do gráfico de variação do nível d'água no furo FSM0094, os demais gráficos constam no Anexo 7.4. Os valores de "L" dos furos (isto é comprimento da seção de filtros) foram estimados com base no parâmetro de RQD de cada sondagem. Foram considerados somente aqueles segmentos, maiores que 30 cm e com RQD, abaixo de 98%. foi assumida a premissa de que estes são trechos dos furos com baixa ou nenhuma conectividade hidráulica.



**Figura 3.14** -Exemplo de dados de nível de água monitorado durante os ensaios de "Slug Test". Os gráficos dos demais ensaios constam do Anexo 7.4.

Os parâmetros obtidos dos ensaios de *slug test* mostram uma condutividade hidráulica baixa a muito baixa, pois a moda dos valores encontrada é da ordem de grandeza de  $10^{-8}$  m/s e o maior valor obtido foi de  $4,31 \times 10^{-7}$  m/s (**Tabela 3.3**). Os dados obtidos apresentam valores condizentes com rochas cristalinas fraturadas e pouco alteradas e/ou arenitos cimentados e fraturados (Singhal& Gupta 2010).

**Tabela 3.3** - Dados de condutividade hidráulica obtidos em furos de sondagem.

Instrumento	Furo	x (m)	y (m)	z (m)	Tempo (s)	L (m)	N.E.	$\Delta h$	k (m/s)
INA02	FSM0056	263521	6577138	312	7920	378,9	17	0,529	1.19E-08
INA05	PC-A3-84-02	263308	6576624	281	1260	79,9	6	0,505	4.31E-07
INA06	PC-A3-81-04	263409	6576531	284	18420	103,0	7	1,552	1.96E-08
INA07	PC-A3-80-17	263135	6576372	250	9240	185,8	14	2,023	2.19E-08
INA100*	FSM0076	263394	6576860	280	29850	46,8	5	0,954	2.80E-08
INA101*	FSM0094	263415	6577047	311	8520	148,0	6	0,992	2.87E-08
INA10	FSM0087	262806	6575304	263	14310	229,6	12	0,924	1.12E-08
INA09	FSM0035	263018	6575301	266	1680	198,8	1	0,474	1.05E-07
INA11	FSM0031	262205	6574823	173	3795	246,7	9	0,660	3.86E-08
INA102*	FSM0088	262716	6575278	265	24430	108,6	10	0,580	1.45E-08
INA103*	FSM0060	262895	6575612	295	1110	391,1	4	0,157	8.10E-08

\* Poços que não fazem parte da rede de monitoramento de nível de água.

### 3.7 NÍVEL D'ÁGUA

O monitoramento do nível d'água foi feito aproveitando-se furos de sondagem existentes realizados desde à década de 70, que remontam à CBC, até furos feitos próximo à data de início do projeto. Foi realizada uma primeira campanha de campo para avaliar o nível d'água, o diâmetro destes furos e a profundidade preservada. O solo de pouca espessura e o maciço de boa qualidade com baixo nível de alteração contribui para que muitos furos, mesmo sendo antigos, estivessem quase que completamente preservados. Foi utilizada uma linha de náilon com pesos em sua ponta (Figura 3.15) para verificação da profundidade intacta do furo. O dispositivo foi introduzido em diversos furos até que tocasse o fundo, posteriormente retirado e medido o comprimento total introduzido.

Foram cadastrados e implementados treze pontos com indicadores de nível d'água (INA) para monitoramento conforme Tabela 3.4.



**Figura 3.15** -Dispositivo para averiguação da profundidade desobstruída de um furo da rede de monitoramento.

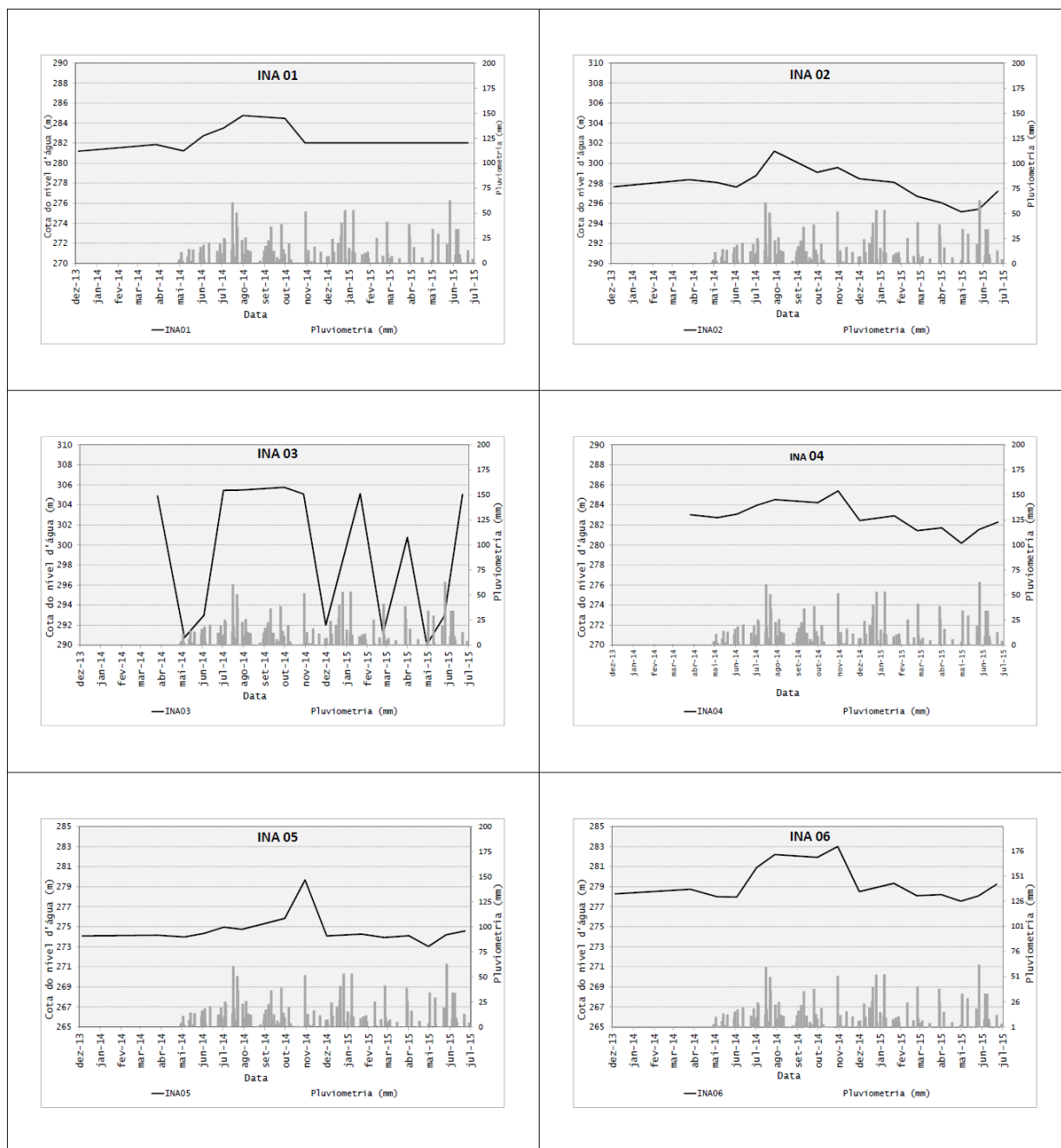
**Tabela 3.4-** Dados cadastrais dos pontos indicadores de nível d'água

Instrumento	Furo	X (m)	Y(m)	Z (m)	Inclinação (graus)	Ø (mm)	Prof. Furo (m)	Prof. INA (m)*
INA-01	FSM0042	264099	6577425	285	65	75	370	370
INA-02	FSM0056	263521	6577198	312	68	75	479	95
INA-03	FSM0038	263612	6576881	309	58	75	751	80
INA-04	FSM0062	263485	6576689	296	65	75	344	344
INA-05	PC-A3-84-02	263308	6576624	280	90	75	188	90
INA-06	PC-A3-81-04	263409	6576531	284	90	75	130	130
INA-07	PC-A3-80-17	263135	6576372	250	65	75	200	100
INA-08	FSM0051	263272	6575871	286	60	75	306	120
INA-09	FSM0035	263018	6575301	265	60	75	201	201
INA-10	FSM0087	262806	6575304	263	70	75	305	305
INA-11	FSM0031	262205	6574813	173	65	75	251	251
INA-12	PC-SM-80-02	262163	6574577	154	90	75	170	170
INA-13	FSM0044	263965	6578597	306	55	75	270	122

\*Profundidade até onde o furo está desobstruído.



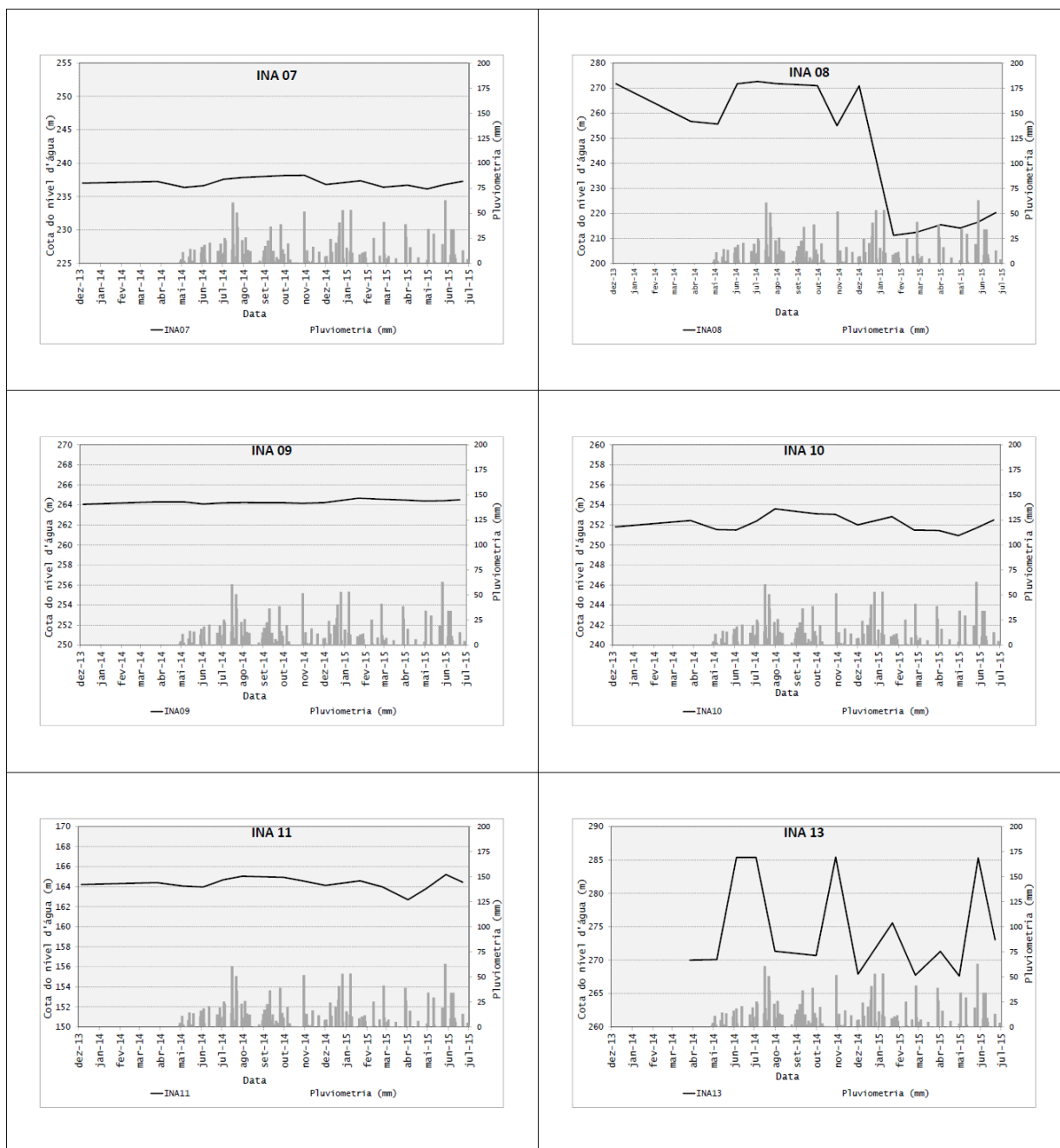
Nas Figura 3.16 e Figura 3.17, estão representados os gráficos dos instrumentos bem como a pluviometria. Convém mencionar, o monitoramento da pluviometria teve seu início no final do mês de abril 2013 e o monitoramento do nível d'água no final de dezembro de 2013 em uma frequência mensal.



**Figura 3.16** - Dados de nível d'água dos indicadores de nível d'água (furos transformados em medidores de nível).

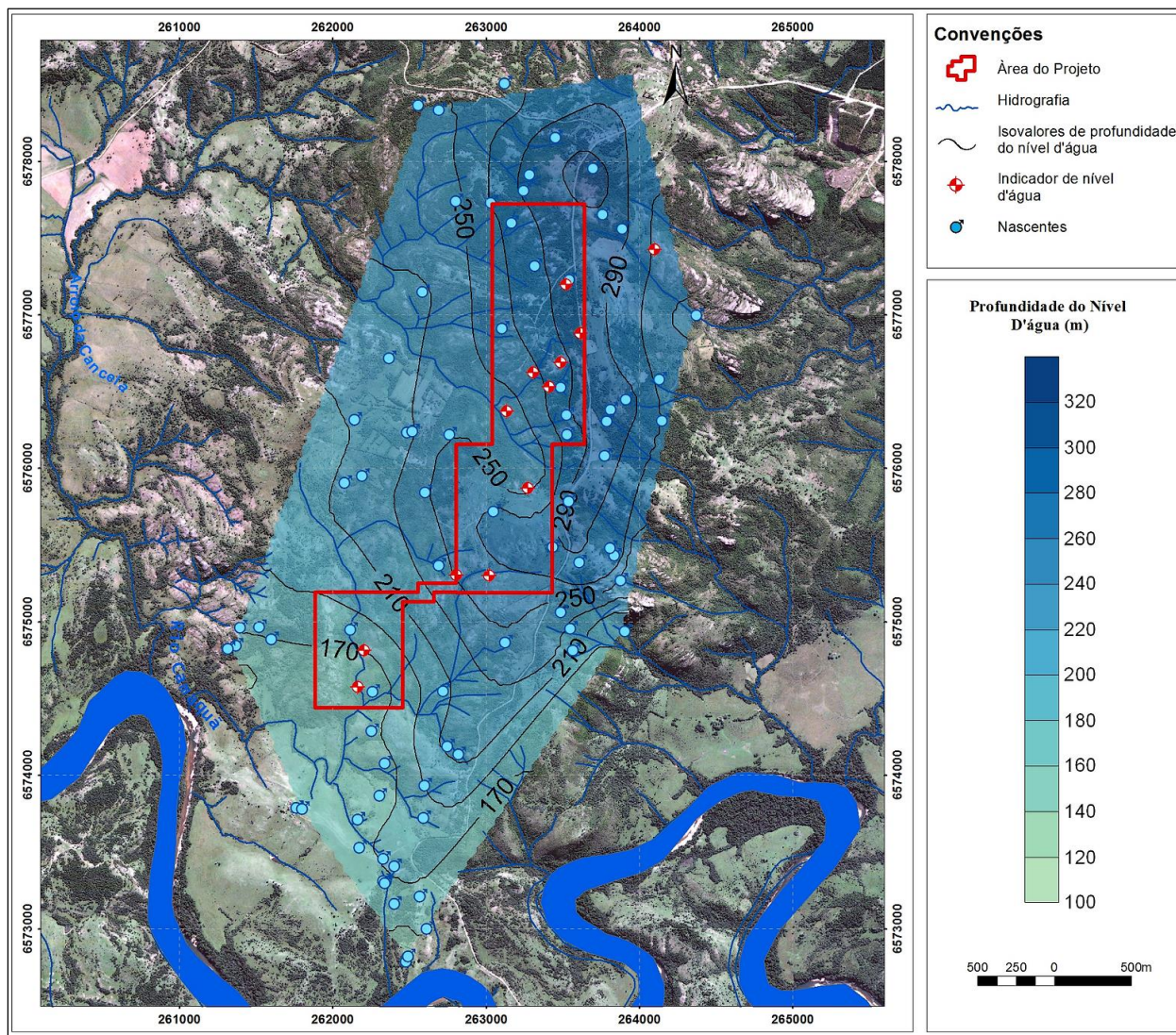
Em maio de 2015 foi feita uma nova campanha para verificação da profundidade efetiva dos indicadores de nível d'água. Ficou constatado que o INA 01, INA 05 e INA 06 foram quase completamente perdidos. Este fato pode ser verificado no gráfico do primeiro instrumento citado. Verifica-se que a partir do mês 10/2014 não há praticamente variação do nível d'água. Quanto aos

dois outros instrumentos, não se pôde reconhecer a data de perda de funcionalidade dos instrumentos, uma vez que foram feitas somente duas verificações de profundidade espaçadas durante o projeto e o gráfico não apresenta indicativo do período em que houve a obstrução dos instrumentos.



**Figura 3.17** - Dados de nível d'água dos indicadores de nível d'água (furos transformados em medidores de nível)

Na Figura 3.18 está representada a configuração da superfície potenciométrica referente a maio de 2015. O nível d'água foi determinado pelos furos de sondagem transformados em poços de monitoramento, além de dados cotas de nascentes.



**Figura 3.18** -Distribuição da superfície potenciométrica na área de estudo. Potenciometria construída a partir de poços de monitoramento e cotas de nascentes (Maio de 2015).

Para a construção da superfície de nível d'água foram utilizados os dados dos poços de monitoramento de nível d'água (furos de sondagem adaptados) e nascentes utilizando-se no caso dos poços a cota monitorada e das nascentes a cota topográfica. A superfície foi construída desta forma devido a distribuição restrita dos pontos de nível d'água instalados. A interceptação do nível d'água pelo relevo pode ser um condicionante da ocorrência de nascentes em aquíferos porosos (Bryan 1919). Apesar de na área as nascentes possuírem, em parte, um forte controle estrutural e ocorrem, sobretudo, nos lineamentos de drenagem, ou lineamentos menores associados a estes, pensando-se em escala macro, isto é, em escala de bacia hidrográfica, assume-se a existência de um meio fraturado com um equivalente ao intergranular. Este fato justificaria a condição acima citada possibilitando a construção de uma superfície de nível d'água a partir destes dados.

Para a construção da superfície de nível d'água, utilizaram-se o método de mínima curvatura a partir dos pontos de interpolação. Além disto, verificou-se a necessidade de utilização

de um filtro estatístico, utilizando-se a média de cinco pontos vizinhos em linha e em coluna, daqueles oriundos da matriz de interpolação inicial. Este filtro foi necessário para eliminar pequenas discrepâncias localizadas que ocasionavam regiões centrais de convergência de fluxo. Este dado pode estar indicando maior drenança ao longo de certos lineamentos que compõem o sistema aquífero.

Pode ser percebido através das linhas de isovalores de nível d'água que na porção norte, há uma divisão do fluxo para oeste-sudoeste e para leste, apesar deste, ficar menos nítido devido à menor quantidade de dados. Já na porção centro-sul, há uma predominância do fluxo para sudoeste.

### **3.8 SÍNTESE DO MODELO CONCEITUAL**

A integração de todos os resultados permite propor um modelo aquífero do tipo fraturado, em que a recarga se dá a partir da infiltração da água de precipitação nas delgadas camadas de solos e posteriormente migração para as fraturas com mergulhos verticais e subverticais. A distribuição do fluxo no interior do maciço seria condicionada à interconexão de fraturas com maiores mergulhos com as fraturas de alívio de pressão que em geral apresentam-se em baixo ângulo de mergulho ou sub-paralelas à superfície do terreno.

Em função da restrita cobertura de solos e das declividades moderadas a elevadas observadas na área central do estudo, estima-se que a recarga seria pequena, mesmo considerando uma precipitação mensal média da ordem de 100mm.

O resultado do arranjo relevo dissecado (com declividade moderada), solos rasos a muito rasos com exposições rochosas deverá ser responsável pela geração de predomínio de sistemas de fluxo hidrogeológicos locais em detrimento de sistemas intermediários e regionais.

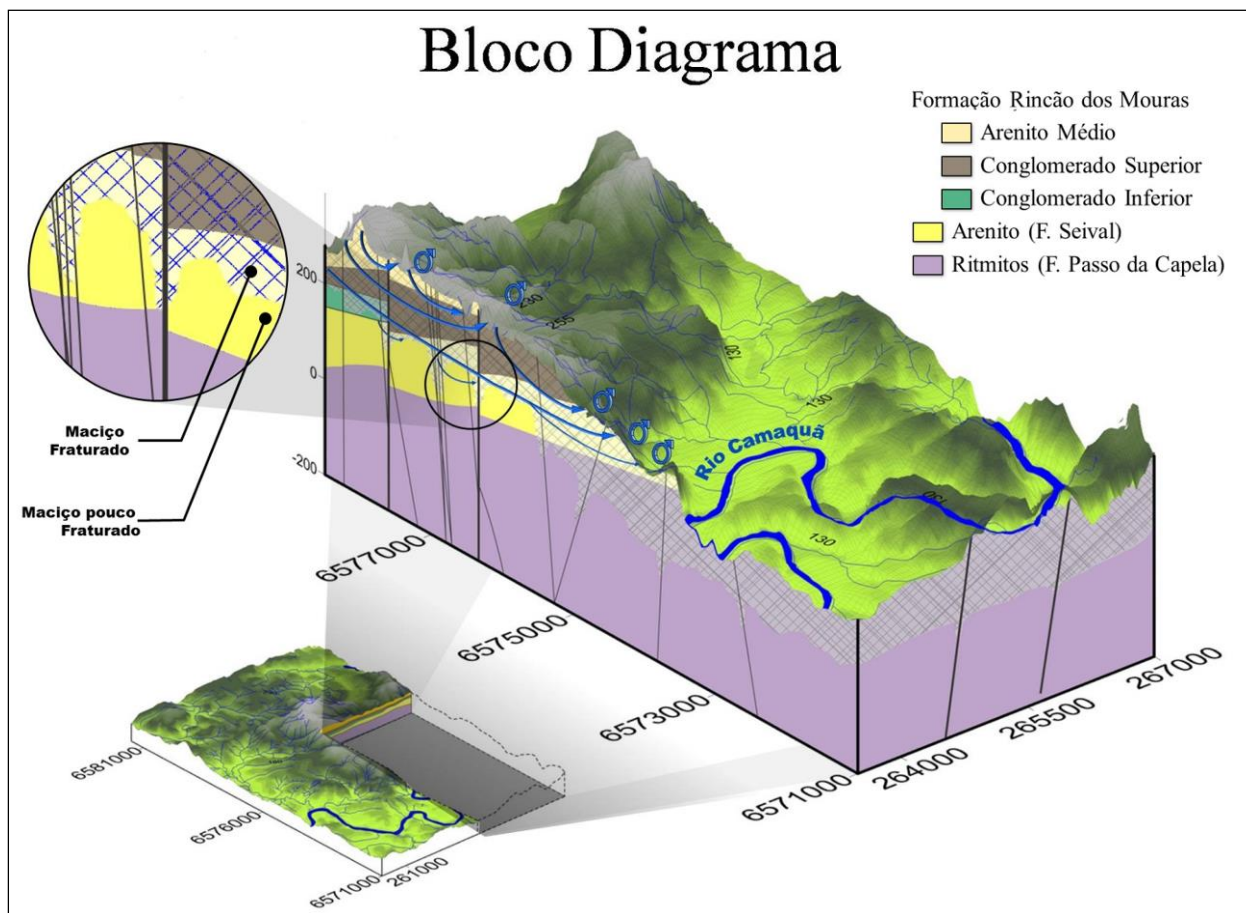
Os depósitos de tálus ou colúvios observados no sopé dos vales mais encaixados deverão ser responsáveis pela geração de descargas associadas a fluxo interno, em exutórios caracterizados como nascentes de contato.

A condição local de confinamento pode ser explicada pelo arranjo de colúvios ou solos um pouco mais desenvolvidos funcionarem como camadas confinantes que não permite a drenança vertical da água acumulada em fraturas mais profundas.

Para efeitos práticos, os limites de fluxo subterrâneos podem ser considerados os mesmos divisores das bacias hidrográficas uma vez que a área foco encontra-se distantes daqueles. O rio Camaquã é considerado o principal exutório da regional. Para aplicação em modelos matemáticos deverá ser aplicado um modelo de camada única com condutividade hidráulica da ordem de  $10^{-8}$  m/s e espessura de 280 metros.

A Figura 3.19 -Bloco diagrama do modelo conceitual de fluxo. Setas de diferentes tamanhos mostram os sistemas de fluxo locais (pequenas) e fluxo intermediário (maiores).





**Figura 3.19** -Bloco diagrama do modelo conceitual de fluxo. Setas de diferentes tamanhos mostram os sistemas de fluxo locais (pequenas) e fluxo intermediário (maiores).

## CAPÍTULO 4

### MODELAGEM MATEMÁTICA NUMÉRICA DO AQUÍFERO

#### 4.1 IMPLEMENTAÇÃO DO MODELO NUMÉRICO

Na região do Projeto Santa Maria, pretende-se instalar e operar uma cava a céu aberto para extração de Zn e outros metais na qual será necessário o rebaixamento do nível freático para desaguamento da mina. Desta forma, procurou-se desenvolver um modelo matemático numérico em regime estacionário na primeira e mais importante fase do projeto.

Está prevista a escavação de três cavas em diferentes alvos denominados Área 1, Área 2 e Área 3 e cujas dimensões são 61.000, 87.000 e 451.000m<sup>2</sup>, respectivamente. O início do projeto se dará pela abertura da maior cava (Cava 3 ou Área 3) e só posteriormente, quando próximo da exaustão desta, é que se iniciará a abertura das duas outras cavas.

A análise realizada neste trabalho foi direcionada a fase inicial do projeto, ou seja, a resposta do aquífero fraturado com escavação e desaguamento da Cava 3 (mais importante delas). A modelagem numérica de aquífero teve por objetivo representar em regime estacionário, de forma simplificada o comportamento hidrodinâmico dos aquíferos presentes para servir de subsídio em tomada de decisões de planejamento em caráter operacional ou ambiental do projeto.

A fase na qual o Projeto Santa Maria se encontra, foi um dos fatores que condicionaram os dados disponíveis para realização da modelagem numérica. A maioria dos parâmetros foi admitida com base no cotejo do modelo conceitual apresentado nesta dissertação com regiões conhecidas de características semelhantes.

O conhecimento do fluxo de base, a restituição específica das microbacias presentes na área em apreço seriam informações importantes para a melhor definição do modelo conceitual do aquífero, e também forneceria juntamente com a condutividade hidráulica, um ótimo parâmetro para calibração do modelo matemático. A intermitência das chuvas foi um fator que produziu um forte impacto no reconhecimento destas variáveis, pois, naturalmente, leva a crer que os dados de vazões coletados nos cursos d'água estão superestimados. Além disto, a definição com exatidão da distribuição dos pontos d'água, durante o Inventário de Nascentes ficou comprometida, deixando, de certa forma, obscuros os principais pontos de descargas do aquífero.

Por se tratar de uma simplificação, partiu-se de algumas premissas para a construção do modelo, as quais estão a seguir enumeradas:

- Assumiu-se uma única camada hidrogeológica referente ao maciço fraturado com baixo RQD. Na área onde havia dados dos furos de sondagem, estes foram utilizados, nas regiões não abrangidas pelos furos foi realizado um deslocamento (*offset*) tendo-

se como base as profundidades mais frequentes desta camada fraturada com baixo RQD, e que foi estimada a partir da região que possuía este dado.

- Foram assumidos dois valores de condutividade hidráulica ( $K$ ), uma geral, referente ao constatado em campo e uma segunda atribuída as principais zonas de falhas (segundo mapeamento fornecido pela Votorantim Metais) e que teve o valor estimado por Modelagem Inversa tendo-se em vista valores de recarga plausíveis para o modelo.
- Foram feitas três calibrações em regime permanente, com base na distribuição de valores de condutividade hidráulica, buscando em todas uma aproximação da superfície de nível monitorada nos indicadores de nível d'água e vazões restituídas nos cursos d'água monitorado (com ressalvas).
- A recarga foi obtida pelo método de Modelagem Inversa ou Estimação de Parâmetros (Healy & Scanlon 2013), tendo em vista os melhores ajustes dos valores calculados pelo modelo e os medidos em campo do nível d'água e valores plausíveis de vazão nos cursos d'água.
- As simulações foram realizadas em regime estacionário, pois não dispunha de dados suficientes para simulação em regime transitório (armazenamento).
- Devido a intermitência de eventos pluviométricos que ocorreram durante a realização dos trabalhos de campo com consequente superestimação da vazão nos cursos d'água, este parâmetro foi somente um balizador, não preocupando-se em ajustá-la perfeitamente durante a calibração do modelo.

O modelo numérico foi elaborado com base no software “*FEFLOW*” v.6.2 (DHI-WASYGmbH 2014), o qual é uma modelagem baseada em elementos finitos aplicados ao fluxo de águas subterrâneas, capaz de simular tridimensionalmente (3-D) modelos no estado de equilíbrio e transitório em meios saturados ou com níveis variáveis de saturação. O modelo também é capaz de simular transporte de massa e de calor. A flexibilidade de elementos finitos triangulares dá ao modelo a capacidade de simular as características de feições subterrâneas complexas de uma bacia. A ferramenta de construção de *grid* é um gerador de malha irregular, bidimensional (2-D) de elemento finito triangular com opções especiais para facilitar o refinamento de malha (McLaren 1997). Para este estudo, foram utilizados dados vetoriais tais como mapeamento de falhas fornecido pela Votorantim Metais e hidrografia detalhada da área em duas dimensões e em seguida importadas para Construtor de *grid* para reproduzir a complexidade 3-D das entidades hidrogeológicas na malha.



Esta abordagem é comumente utilizada na modelagem numérica de aquíferos com geometrias complexas e/ou meio cársticos/fissurais, tendo como principal vantagem a fácil conformação à complexidade geométrica do problema proporcionada pela geometria dos elementos que compõem a malha. Este modelo também é aplicado com a utilização de elementos de dimensões menores que a malha básica do modelo, ou seja, recursos discretos unidimensionais ou bidimensionais podem ser adicionados em modelos tridimensionais e que denominam "Feições Discretas". Este tipo de ferramenta é muito útil, pois pode ser adicionada aos modelos para representar feições uni ou bidimensionais altamente condutores, tais como túneis, tubulações, drenos, falhas ou fraturas.

## 4.2 DISCRETIZAÇÃO DO MEIO FÍSICO

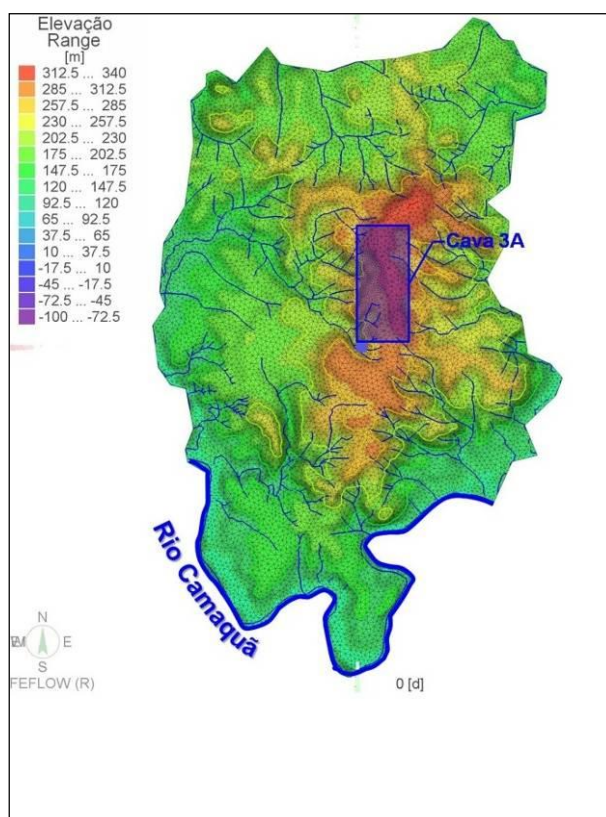
O limite do modelo foi estipulado tendo-se como base os limites das microbacias de entorno da localização do futuro empreendimento. Convém mencionar que por se tratar de um meio fraturado anisotrópico e heterogêneo pode não haver uma relação perfeita entre os limites das microbacias hidrográficas e a bacia hidrogeológica em questão, uma vez que os sistemas de descontinuidades não respeitam necessariamente os limites hidrográficos. Apesar de um estudo de lineamentos ser uma ferramenta importante na limitação de bacias hidrogeológicas desta natureza (Arraes & Campos 2007), optou-se por usar o limite hidrográfico, uma vez que as bacias hidrográficas possuem pouca amplitude de elevação em relação a profundidade da bacia hidrogeológica favorecendo fluxos subterrâneos localizados, além dos limites estarem muito além da zona de "stress" ou seja, onde será instalada a cava da mina.

**Tabela 4.1** -Coordenadas UTM dos limites da área modelada.

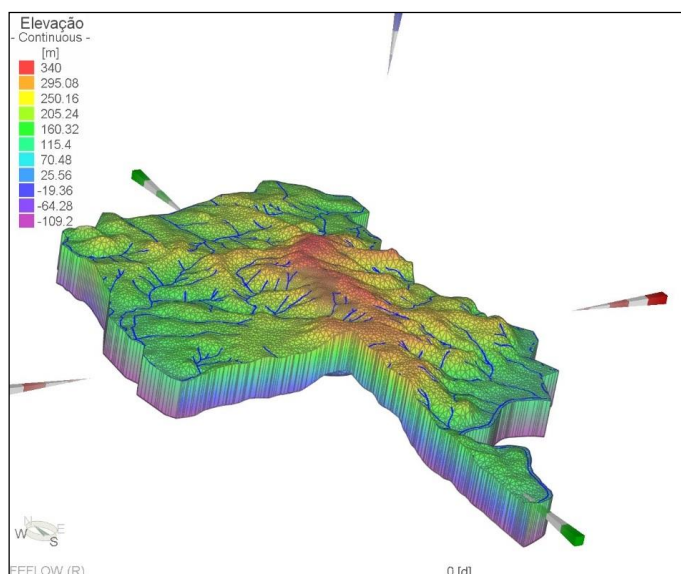
Xmin. (m)	Xmax. (m)	Xmax.-Xmin. (m)	Ymin. (m)	Ymax. (m)	Ymax.-Ymin. (m)
260.135	266.314	6.179	6.571.217	6.581.154	9937

Em planta, esta malha distribui-se em 18.186 elementos, possuindo uma geometria irregular com maior densidade de elementos na área prevista para cava (Figura 4.1). Em profundidade foi considerada uma única camada com espessura variável, delimitada por duas fatias (*slices*) cuja configuração da fatia de topo corresponde à superfície topográfica do terreno. A fatia de base foi construída utilizando-se dados de furos de sondagem em uma superfície interpolada utilizando os dados de contato entre regiões com alto e baixo RQD. Para o caso desta superfície utilizou-se o contato entre RQDs maiores e menores que 90 este valor foi o maior possível que resultava em uma superfície com geometria mais suavizada. Onde tais dados eram inexistentes foi assumido um deslocamento constante em relação à topografia tendo-se em vista as profundidades mais frequentes encontradas na região onde estes dados existiam. Este valor é de

cerca de 280 m. Para esta superfície foi utilizado um artifício para suavizar as variações de amplitude, que por vez apresentava-se quebras de forma muito abrupta (que pode estar relacionada a zonas de falhas). A Figura 4.2 mostra uma perspectiva tridimensional do modelo.



**Figura 4.1-** Vista 2D da malha do modelo na qual se distribuem mais de 18.000 elementos.

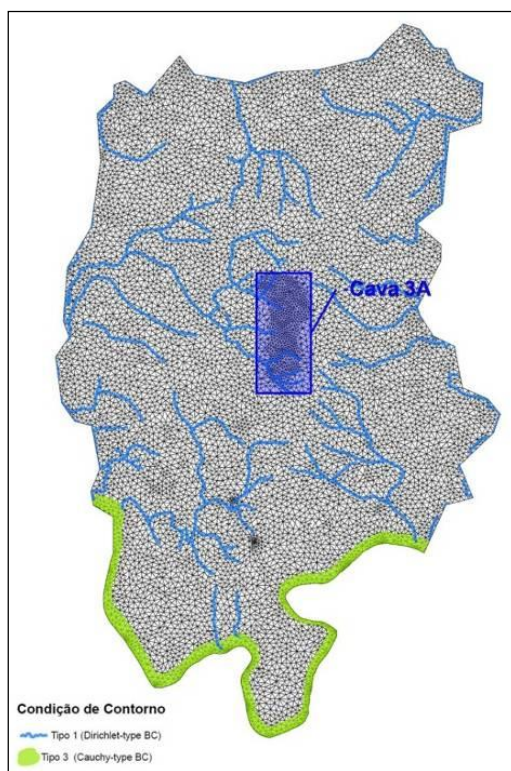


**Figura 4.2-** Vista tridimensional do modelo, considerando o relevo e as variações de espessuras obtidas a partir de dados de RQD de sondagens rotativas.

### 4.3 CONDIÇÕES DE CONTORNO

As condições de contorno são elementos numéricos inseridos no modelo e que determinam uma relação de fluxo d'água no meio físico subterrâneo. Esta relação pode ser: i) fluxo nulo; ii) fluxo com carga especificada;iii) fluxo com vazão especificada. São utilizadas para representar as entradas e saídas de água do modelo numérico bem como seus limites físicos. Representam elementos físicos/hidrogeológicos existentes, tais como rios, nascentes, poços, recarga, rochas impermeáveis, continuidade do aquífero, etc.

Foi utilizado para representar as principais nascentes e cursos d'água a condição de contorno do Tipo 1, Dirichlet-type BC (**Figura 4.3**).Essa condição contabiliza a saída ou entrada de água quando a cota piezométrica na célula onde esta condição foi implantada supera ou está inferior a sua cota, respectivamente.A cota dos drenos foi inserida com base na topografia do terreno e nos dados de inventários de pontos d'água existentes.Foi adicionada uma restrição de fluxo máxima igual a zero o que dá a esta feição características de "sumidouro".



**Figura 4.3** - Principais condições de contorno do modelo.

Para simular o curso d'água representado pelo rio Camaquã foi utilizada a condição de contorno Tipo 3 (**Figura 4.3**) ou Transferência de Fluido (Cauchy-type BC). Esta condição deve ser visualizada como uma fonte ou sumidouro de água, externa ao domínio, ligada a ele através das células nas quais esta condição é implantada. O funcionamento deste tipo de condição de contorno, da mesma forma como a do Tipo 1, consiste em determinar a saída de água quando a cota piezométrica da célula supera a cota preestabelecida ou a entrada d'água, quando a cota piezométrica encontra-se abaixo da cota fixada.

A principal diferença desta condição de contorno e a do Tipo 1, consiste na adição de restrição de cotas máximas e mínimas além da restrição de fluxo. A determinação da intensidade com que acontecem as trocas de água entre a célula e as adjacências é determinada pela condutividade do meio na qual a condição foi adicionada. Desta forma, nos elementos que receberam a condição Tipo 3 (representativa do Rio Camaquã), foi colocada uma condutividade hidráulica de  $1 \times 10^{-4} \text{m/s}$  o que representaria uma interação elevada da condição com o substrato.

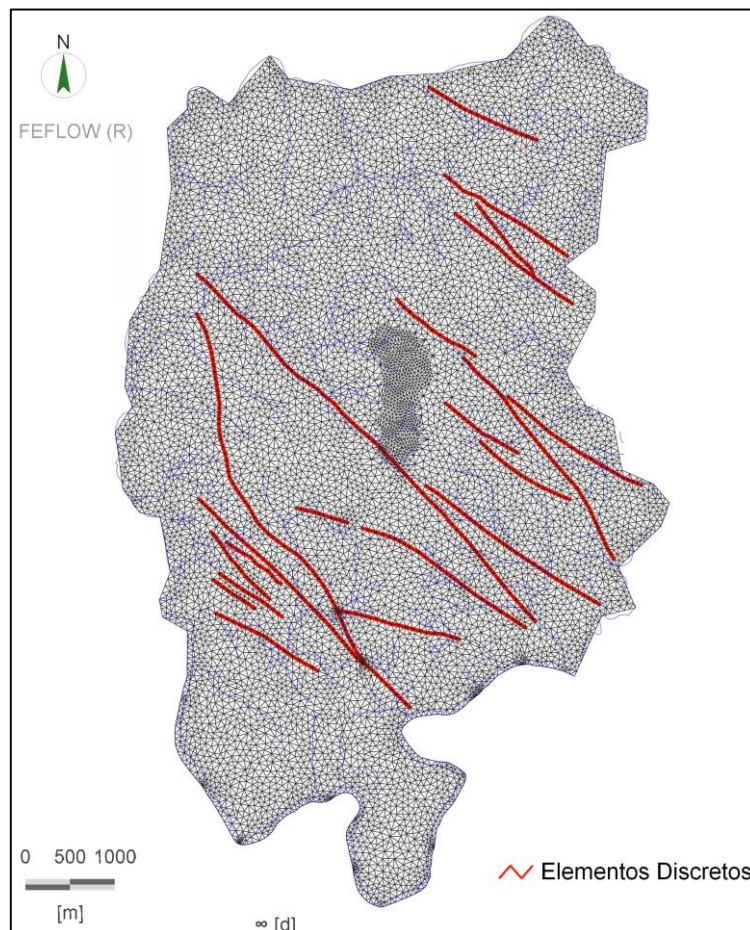
A recarga foi adicionada com a propriedade "Entrada/Saída de fluxo no Topo/Base" no topo da camada.

#### **4.4 CONDUTIVIDADE HIDRÁULICA**

De acordo com Voss (2011), é importante delimitar aqueles parâmetros que são realmente intervenientes nas questões a serem solucionadas. Muitas vezes utiliza-se o artifício de maior detalhamento, de subzonas de características diferentes em um mesmo corpo, para garantir um melhor ajuste dos dados modelados aos observados sem muito rigor com a realidade. Existe uma crença de que quanto maior a quantidade de detalhes inseridos no modelo numérico, melhor será sua representação da realidade, o que pode indicar uma falta de perspectiva de como os sistemas hidrogeológicos funcionam.

Desta forma e devido a quantidade limitada de dados disponíveis para a área do projeto, que se encontra ainda em fase de exploração mineral, foram assumidas três zonas de condutividade hidráulica distintas. A primeira zona geral cujos valores baseiam-se na distribuição de valores resultantes de "slugtests". A segunda zona corresponde as falhas e fraturas mapeadas na área e que tiveram os dados fornecidos pela Votorantim Metais. As estruturas foram adicionadas como "Feições Discretas", que são elementos de dimensões menores (bidimensionais) que a malha básica tridimensional do modelo. Por último foi adicionado uma zona de alta condutividade nos elementos em que foram inseridas as condições de contorno "Tipo 3", conforme já explicado em item anterior.

A condutividade hidráulica das "Feições Discretas" (Figura 4.4) foi estimada por modelagem inversa tendo-se em vista valores de recarga plausíveis para o modelo e os volumes restituídos nos cursos d'água.



**Figura 4.4-** Disposição em planta dos Elementos Discretos, bidimensionais.

Para calibração do modelo foi assumida para a Zona Geral que corresponde ao maciço como um todo, e teve o valor baseando-se na distribuição dos parâmetros coletados em campo. Uma avaliação considerada ideal para o meio em questão, com características hidráulicas anisotrópicas e heterogêneas, seria a realização de vários testes de bombeamento e/ou terem sido realizados coletas de dados de "slugtest" no maior número de furos, quanto fosse possível. Desta forma, seria possível reconhecer e desenvolver um modelo geoestatístico tridimensional destes dados associando-se aos dados de descontinuidades. Devido à escassez de tempo, e devido ao projeto estar em sua fase inicial (fase de exploração mineral) e por não terem poços de terceiros instalados na região de entorno do projeto (devido as características de aquífero pouco produtivo), este tipo de abordagem não pode ser desenvolvida.

Apesar de terem sido coletados poucos dados de testes do tipo "Slugtest", onze no total, e ser considerada uma amostra muito pequena frente a complexidade inerente ao meio fraturado em questão, optou-se por trabalhar com estes dados como uma amostra aleatória em um modelo contínuo. Desta forma, foi possível apresentar os resultados de forma não determinística, em um maior número de cenários vinculados diretamente aos dados coletados em campo. Assim, apresentou-se uma possível abordagem a ser utilizada em trabalhos futuros para a área, à medida que for sendo ampliado o banco de dados hidrogeológicos da área ou até que se disponha de

quantidade suficiente de dados que permita determinar a relação tridimensional aproximada entre os tensores de condutividade hidráulica e os sistemas de descontinuidades na área.

Esta proposta vem de acordo com a sugestão de James & Oldenburg (1997), Beven (2000), Neuman & Wierenga (2003) que indicam a construção de modelos que abrangem as incertezas inerentes as variáveis inseridas no modelo, construindo-os e compreendendo a amplitude estatística dos valores que as variáveis podem assumir em campo, para que ao final seja feita a verificação da consistência dos resultados obtidos, podendo ou não serem descartadas algumas hipóteses.

Em primeiro lugar, deve-se ressaltar que este tipo de abordagem, em virtude da quantidade relativamente pequena de dados de condutividade hidráulica, não enfraquece os resultados a serem alcançados neste trabalho, uma vez que entre os cenários que serão analisados, existe aquele realizado com o valor médio de condutividade hidráulica. Por causa do baixo número de amostras, qualquer resultado diferente do valor médio deve, sem dúvida, ser considerado com ressalvas. Segundo Lima & Magalhães (2002), avaliações empíricas utilizando-se de métodos computacionais indicam que em muitos casos números de amostra ao redor de 30 fornecem estimativas muito boas da distribuição, mas que em alguns casos, aproximações satisfatórias podem ser obtidas com número de amostras inferiores a este valor.

A análise probabilística dos resultados foi realizada segundo metodologia proposta por Rosenblueth (1975) que diferentemente dos métodos exatos, como Monte Carlo, baseados na série de Taylor, entre outros, os quais dependem de uma quantidade muito grande de tempo e esforço computacional, resulta em uma aproximação que compromete ligeiramente os resultados se a dispersão das variáveis envolvidas não for muito grande (Farias & Assis 1998, Assis 2002).

O método conhecido como Método das Estimativas Pontuais, baseia-se na estimação, para uma variável dependente, momentos estatísticos de baixa ordem tais como média, desvio padrão, coeficiente de assimetria e etc. a partir das estimativas de pelo menos, dois momentos das variáveis aleatórias independentes (média e desvio padrão) sem que haja a necessidade do conhecimento completo da distribuição de ambas variáveis, dependentes e independentes (Rosenblueth 1975, Rosenblueth 1981, Assis 2002, Charbel 2015). Trata-se de um método aproximado, pois deve-se, ao final assumir uma distribuição para a variável dependente (Assis 2002, Charbel 2015).

Sendo a variável dependente concentrada em dois pontos:

$$X_{i+} = \bar{X}_i + \sigma_i$$

$$X_{i-} = \bar{X}_i - \sigma_i$$

Onde:

$\bar{X}_i$  - Valor médio da distribuição  $X_i$ ;

$\sigma_i$  - Desvio padrão da distribuição  $X_i$ .

Sendo as probabilidades destes pontos ( $X_{i+}$  e  $X_{i-}$ )  $P_+$  e  $P_-$  e existindo:



$$Y = F(X) = F(x_1)$$

Em que Y é a variável dependente e X é o vetor da variável independente  $X_1$ .

O valor esperado pela variável Y pode ser expresso por:

$$E[Y] = P_+ Y_+ + P_- Y_-$$

Onde  $Y_+$  e  $Y_-$  são os valores estimados para Y.

Em caso de distribuição simétrica:

$$E[Y] = \bar{Y} = \frac{Y_+ + Y_-}{2}$$

$$\sigma_y = \left| \frac{Y_+ - Y_-}{Y_+ + Y_-} \right|$$

Esta abordagem não se restringe a análise para apenas uma variável independente, no entanto como, dentre os parâmetros de entrada do modelo numérico, somente tem-se o conhecimento da distribuição da condutividade hidráulica (mesmo que de forma limitada), foi considerada a única variável independente. Os parâmetros recarga e previsão de vazões com o início de "stress", foram as variáveis dependentes avaliadas. Cabe destacar que para as variáveis dependentes encontradas foram assumidas distribuição lognormal, conforme observado por Assis (2002) e Charbel (2015) este tipo de distribuição é um modelo utilizado quando se tem assimetria a esquerda, ou fisicamente a variável não pode assumir valores menores do que zero. Esta última premissa, aplica-se às variáveis aleatórias estimativa de vazão e recarga.

Apesar da recarga poder ser estimada por vários métodos diretos e indiretos, com um grau razoável de acurácia para fins de modelagem numérica, não se dispunha de instrumentos, e/ou dados que pudessem ser utilizados para este fim. Desta forma, foi assumido como premissa, oriunda da simplificação inerente à modelagem numérica, que o seu valor está relacionado basicamente com à condutividade hidráulica do maciço e os seus pontos de descarga e sua estimativa se deu através de Modelagem Inversa, que nada mais é do que a busca pelos melhores ajustes entre parâmetros observados em campo e os dados da simulação (Healy & Scanlon 2013). Para análise dos dados foi utilizado o software estatístico Minitab V.17.1 (2003).

Para determinação da distribuição dos dados utilizou-se a ferramenta Identificação de Distribuição Individual do software estatístico citado em que a distribuição lognormal, dentre outras, apresentou P-valor mais elevado de 0.459, o que indica que não se consegue determinar que a distribuição dos dados não represente o modelo citado. Os dados coletados em campo seguem resumidos na Tabela 4.1. Na Figura 4.5 está representado o digrama de caixa referente a estes dados. Percebe-se por este diagrama que existe um valor discrepante dos demais. Este valor refere-se ao dado coletado no piezômetro INA05. Valores discrepantes podem sugerir



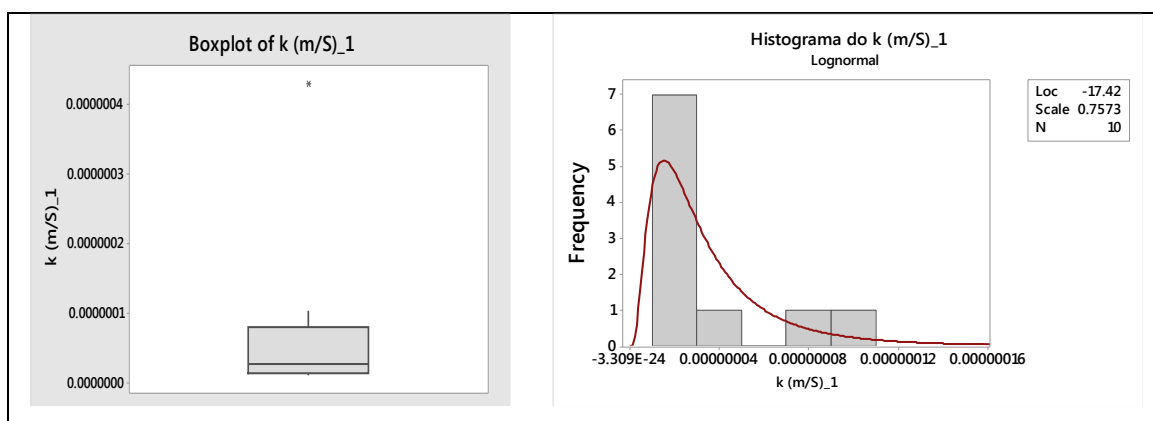
variabilidade intrínseca aos dados ou um erro. Neste caso poderia significar a instalação do instrumento em uma zona intensamente fraturada. Apesar disto, optou-se por não utilizar os dados deste instrumento. Também na Figura 4.5 estão representados os histogramas referentes aos dados de condutividade hidráulica. Pela análise dos dados percebe-se um valor disperso com relação ao restante dos dados, que muito provavelmente está atrelado ao baixo número de elementos da amostra, que por sua vez, pode ter sua distribuição descrita por meio do modelo teórico de distribuição de frequência lognormal descrito a seguir.

$$\mu_x = e^{\left(\mu_y + \frac{\sigma_y^2}{2}\right)}$$

$$\sigma_x = e^{\left(2\mu_y + \sigma_y^2\right)} + \left(e^{\sigma_y^2} - 1\right)$$

**Tabela 4.1** - Dados de condutividade hidráulica obtidos em furos de sondagem.

Instrumento	k (m/s)
INA02	1.19E-08
INA05	4.31E-07
INA06	1.96E-08
INA07	2.19E-08
INA100	2.80E-08
INA101	2.87E-08
INA10	1.12E-08
INA09	1.05E-07
INA11	3.86E-08
INA102	1.45E-08
INA103	8.10E-08



**Figura 4.5** - Diagrama de caixas referente aos valores de condutividade hidráulica coletados em campo e Histograma de distribuição dos dados de condutividade hidráulica

Os parâmetros estatísticos encontrados foram uma média ( $\mu$ ) de  $3,51 \times 10^{-8}$  e um desvio padrão ( $\sigma$ ) de  $2,89 \times 10^{-8}$ .

## CAPÍTULO 5

### DISCUSSÃO E INTEGRAÇÃO DE DADOS

#### 5.1 CALIBRAÇÃO EM REGIME PERMANENTE

Devido ao pouco tempo de monitoramento de nível d'água na área e os constantes eventos pluviométricos durante este período, não ficaram muito evidentes como se dá a relação entre as vazões restituídas nos cursos d'água e a flutuação do nível d'água no maciço. Fato este que poderia proporcionar modelos distintos para períodos úmidos e de estiagem, ou até mesmo modelo com simulação em regime transitório, com parâmetro estimado de armazenamento.

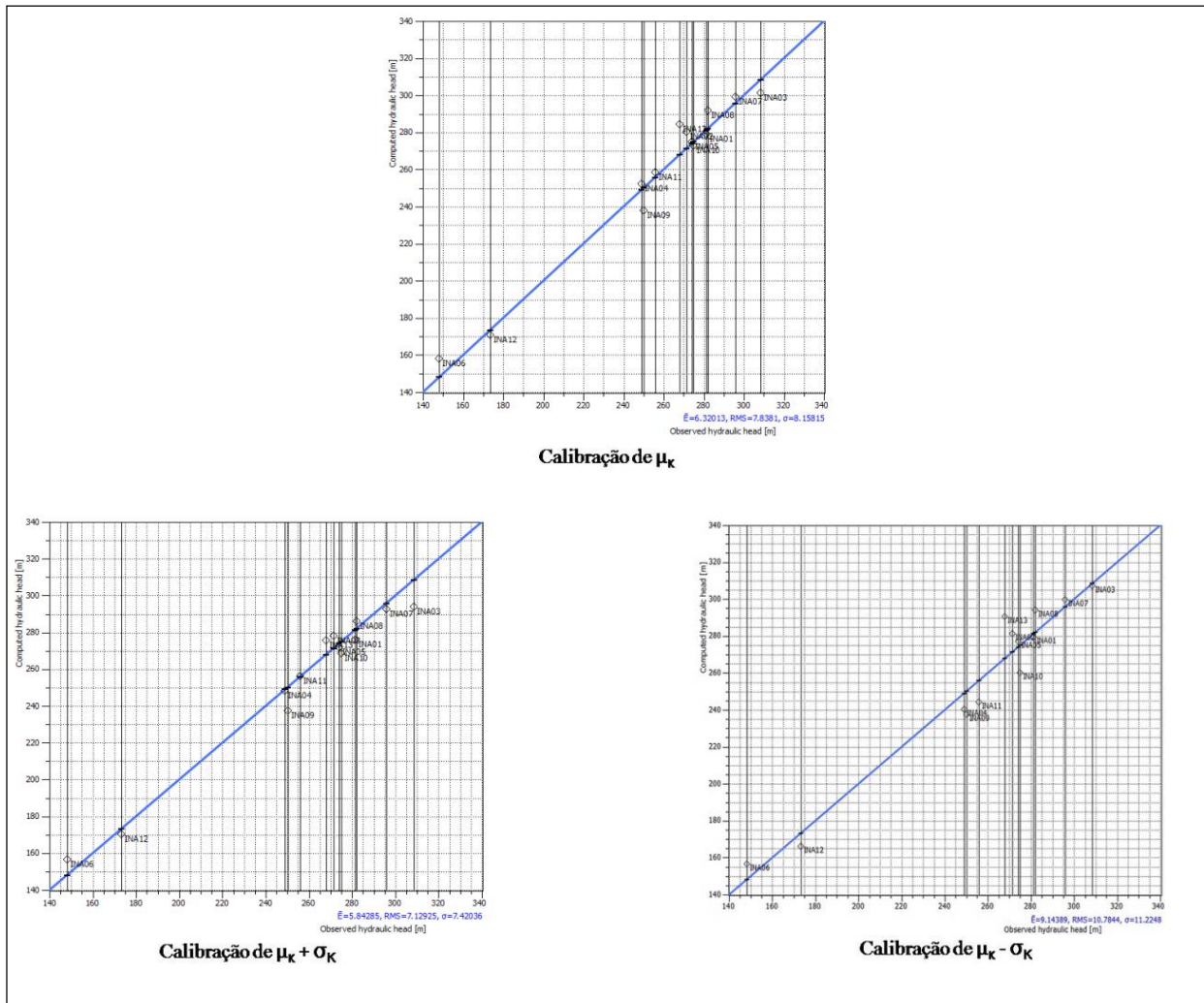
Desta forma o modelo foi calibrado em regime estacionário para três cenários distintos. O primeiro referente ao valor médio da distribuição de valores de condutividades hidráulicas encontradas a partir dos testes tipo *slugtest*( $K_{\mu}$ ), e mais um cenário referente a composição de modelos representados por valores de condutividade hidráulica iguais à média mais um desvio padrão ( $K+$ ) (modelo com condutividade hidráulica e levada e alta taxa de recarga) e média menos um desvio padrão ( $K-$ ) (modelo com baixa condutividade hidráulica e baixa taxa de recarga), respectivamente.

Durante o processo de calibração procura-se ajustar os dados de nível d'água calculados pelo modelo numérico com os dados reais medidos em campo. Os instrumentos utilizados na calibração em regime permanente eram concentrados espacialmente na região central, o que impossibilita uma calibração mais realista da região de abrangência do modelo como um todo, contudo, ficando bem calibrados no domínio de interesse.

Os ajustes da recarga e das condutividades hidráulicas especificamente das discontinuidades (feições discretas) foram, obtidos a partir de modelagem inversa, em que foram feitas sucessivas alterações nos valores até ajustar de modo satisfatório os níveis calculados aos níveis observados, visando aos valores de recarga plausíveis e valores não muito destoantes das descargas líquidas nos cursos d'água, ou seja, esperados levando-se em conta o modelo conceitual proposto. Assim dentre as simplificações adotadas, neste modelo assumiu-se a recarga como variável dependente dos valores de  $K$  encontrados, pois ainda não se dispunha, até o final deste trabalho, de dados de monitoramento que permitiriam fazer estimativas consistentes deste parâmetro.

Já para a variável condutividade hidráulica para as discontinuidades, foi assumido um valor fixo para todos os modelos (médio, baixo e alto  $K$  geral) que justificassem as descargas previstas nos modelos conceituais. No caso de modelos de aquífero, esta variável pode desempenhar um papel fundamental, pois fornece um valor realista do fluxo de base restituído

pele aquífero, que como mencionado em tópicos anteriores, no caso deste trabalho não pôde ser coletado de forma satisfatória. Na Figura 5.1 e Tabela 5. estão representadas as comparações entre valores de nível d'água coletados em campo e os calculados pelos modelos numéricos. Na Tabela 5., estão representados os gráficos da calibração exibindo a média das diferenças ( $\bar{E}$ ), o erro médio quadrático (RMS) e o desvio padrão ( $\sigma$ ).



**Figura 5.1** - Gráfico representando os ajustes encontrados nas diferentes calibrações.

**Tabela 5.1-** Gráfico representando o cotejo dos valores medidos e calibrados nos modelos numéricos de média, alta e baixa condutividade hidráulica geral.

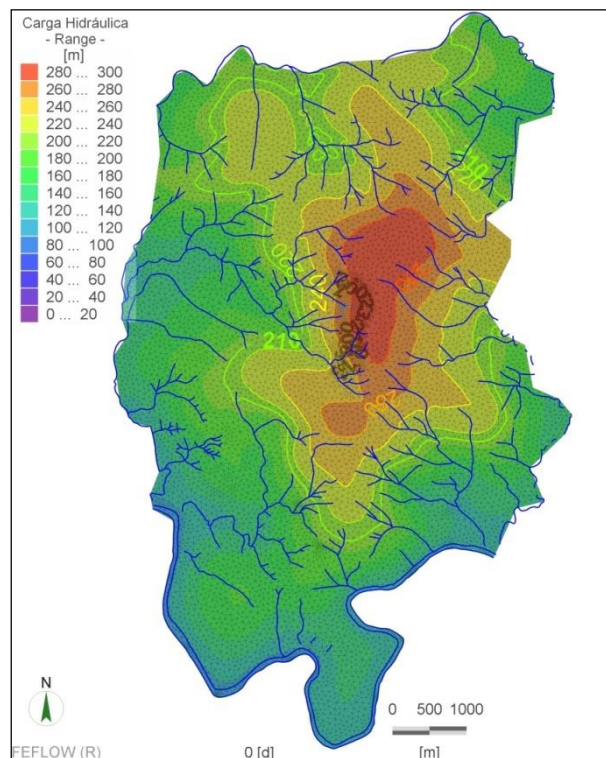
Instrumento	Valor medido (m)	Modelo $\mu_k$		Modelo $k_+$		Modelo $k_-$	
		Calibração (m)	Diferença (m)	Calibração (m)	Diferença (m)	Calibração (m)	Diferença (m)
INA01	281.3	278.9	-2.4	276.1	-2.7	279.4	-1.9
INA02	271.3	280.2	8.8	278.2	-2.0	281.2	9.9
INA03	308.5	300.7	-7.7	294.1	-6.6	307.1	-1.4
INA04	249.0	251.2	2.2	248.1	-3.1	240.3	-8.7
INA05	274.1	274.9	0.8	271.8	-3.1	277.3	3.2
INA06	148.1	157.8	9.7	156.8	-1.0	156.7	8.6
INA07	295.8	298.3	2.5	292.5	-5.8	299.8	4.0
INA08	282.0	291.1	9.1	285.9	-5.3	294.3	12.3
INA09	250.1	237.8	-12.3	237.4	-0.4	237.6	-12.5
INA10	275.0	271.3	-3.7	268.5	-2.8	260	-15.0
INA11	255.8	257.8	2.0	256.3	-1.5	244.2	-11.6
INA12	173.3	170.3	-3.0	170.2	-0.1	166.1	-7.2
INA13	267.8	283.8	15.9	275.5	-8.2	290.5	22.7

**Tabela 5.2 -** Parâmetros resultantes da calibração.

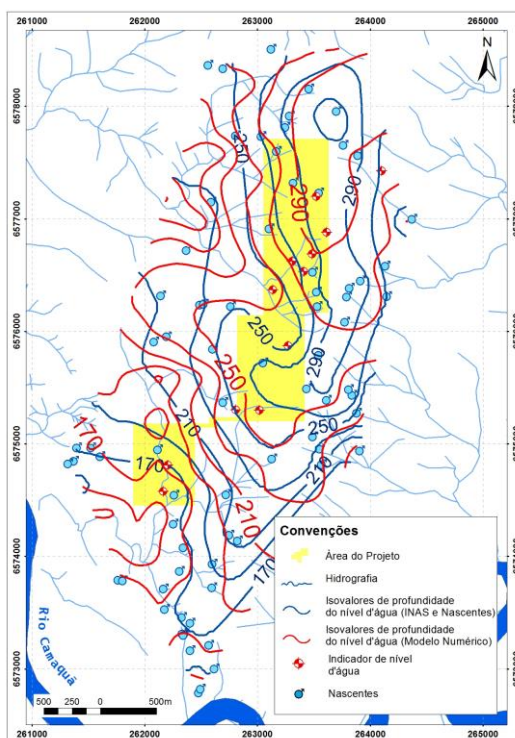
Modelos \ Parâmetros	$\bar{E}$	RMS	$\sigma$
$K_\mu$	6.32	7.84	8.16
$K_+$	5.84	7.12	7.42
$K_-$	9.14	10.78	11.22

Podem ser percebidos pelos gráficos ajustes dos níveis d'água monitorado e calculado pelo modelo, relativamente bons. Aquele que apresentou maiores discrepâncias foi o qual se admitiu um baixo valor de condutividade hidráulica ( $K_-$ ). Os modelos com  $K_\mu$  e  $K_+$ , apresentaram um desvio médio da ordem de 6,1 metros, enquanto o modelo de baixa condutividade apresentou maior dispersão do erro em relação a reta de correlação entre valores reais e modelados, com um desvio médio de 11,2 metros. No entanto, a interpretação deste modelo se dá de forma conjunta ao modelo de alta condutividade hidráulica ( $K_+$ ).

Na Figura 5.2 está representada a distribuição de cargas hidráulicas da primeira fatia (*Slice*) do modelo. Neste caso específico está representada a distribuição de cargas hidráulicas referente ao modelo de  $K$  médio ( $K=K_\mu$ ). Os modelos  $K_+$  e  $K_-$  apresentaram distribuição de forma semelhante.



**Figura 5.2** - Nível d'água resultante da calibração de  $K\mu$ .



**Figura 5.3** - Cotejo entre os níveis d'água estimado pelos instrumentos e nascentes e o calculado pelo modelo numérico.

Na Figura 5.3 está representado o cotejo entre as linhas de isovalores de nível d'água estimadas pelos instrumentos de medição de nível d'água com as resultantes do modelo numérico. Pode ser percebido, que de um modo geral as curvas resultante dos dados medidos em campo

apresentam-se mais suavizadas que as resultantes do modelo numérico. Este fato pode estar relacionado à quantidade relativamente baixa de dados utilizados na construção da primeira curva, quando comparada com a resultante do modelo numérico em que os níveis d'água são calculadas para cada nó do modelo. Além disto, observa-se que os resultados provenientes dos dados medidos em campo indicam um nível d'água mais elevado no topo do divisor de água que contem a zona mineralizada e que pode estar relacionado ao fato de algumas nascentes utilizada na interpolação, serem olhos d'água intermitentes, formado a partir de percolação rasa de água de chuva. Já algumas curvas apresentaram muito boa aderência, tais como as de cota 170m e 250m.

Na Tabela 5.1 estão representados os valores de condutividade hidráulica do modelo, coletados em campo, bem como as recargas e condutividades hidráulicas obtidas por Modelagem Inversa. Pode-se perceber que para os valores de recarga alcançados foram relativamente baixos enquanto os valores de condutividades hidráulicas das discontinuidades ("feições discretas") encontrados ficaram relativamente altos, inclusive mais alto que o maior valor encontrando nos testes tipo *slugtest* ( $4,31 \times 10^{-7} \text{m/s}$ ). No caso do modelo, as estruturas representadas são de caráter regional.

**Tabela 5.1** - Valores de condutividade hidráulica e recarga assumidos para o modelo numérico.

Parâmetros		$k_{\mu}$	$k_{+}$	$k_{-}$
K (m/s)	Geral	$3.54 \times 10^{-08}$	$6.40 \times 10^{-08}$	$6.25 \times 10^{-09}$
	"Feições discretas"	$3.47 \times 10^{-06}$	$3.47 \times 10^{-06}$	$3.47 \times 10^{-06}$
% de Recarga (Jun - Jul)	Referente à média histórica (1.302,8)	6%	9%	2%
	Referente ao monitoramento local (1.478,4)	5%	8%	1%

Este fato é devido a recarga, descarga nos cursos d'águas (retirada de água pela condição de contorno Tipo 1, Dirichlet-type BC) e as cargas hidráulicas calculadas pelo modelo numérico, serem sensíveis em relação ao parâmetro hidráulico (K) das discontinuidades. Assim assumiu-se um valor para este parâmetro, que, conforme já mencionado, pudesse fornecer valores de recarga, e vazões mais próximos ao prenunciado no modelo conceitual (sem também aumentar em demasia aqueles valores, uma vez que não foram encontrados valores tão altos de condutividade hidráulicas nos testes de campo).

O fato apresentado no parágrafo precedente pode ser explicado pelas características físicas do meio (e que foram apresentadas no modelo conceitual) e simplificação inerente à modelagem

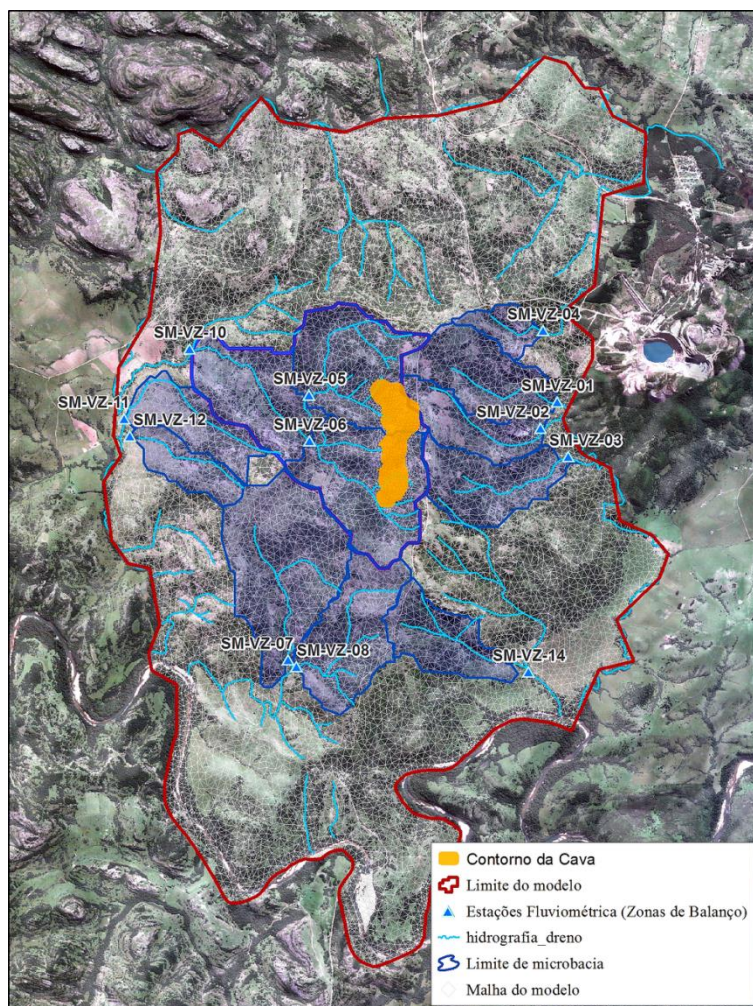
numérica, tais como fluxo geral condicionado por falhas e fraturas assim como sistema de drenagens condicionados por este mesmo elemento. Desta forma, maiores valores de K das discontinuidades mais notáveis existentes na área em apreço, deverá proporcionar conexões mais efetivas entre o maciço e seus principais pontos de descargas, que por sua vez, devem-se assumir maiores valores de recarga para justificar as cargas hidráulicas monitoradas em campo. Em virtude deste fato, o mapeamento e caracterização detalhada (mapeamento associado a descrição de furos de sondagem) das principais discontinuidades, é uma importante tarefa a ser considerada em trabalhos futuros na área, como será exposto nas conclusões deste trabalho.

Em se tratando das vazões monitoradas, existe uma dificuldade em determinar o quanto da volume representa o fluxo de base, ou seja, a parte do fluxo que constitui efetivamente a descarga dos sistemas aquíferos subterrâneos e o quanto representa fluxo superficial, isto porque as duas campanhas de vazão realizadas, foram acompanhadas de eventos pluviais. Desta forma, não se preocupou em calibrar as vazões calculadas pelos modelos (retiradas pela condição de contorno Tipo 1, Dirichlet-type BC) e as medidas em campo. A única preocupação foi que estivessem volumes restituídos em acordo com o modelo conceitual proposto para posteriormente, serem comparadas na simulação do máximo rebaixamento aplicado na Cava 3.

No software existe ainda uma rotina computacional, denominada Taxa de Balanço (*Rate Budget*), que realiza o balanço de massa em regiões do modelo (nós/elementos) selecionadas. Como saída, esta rotina exhibe perdas e aportes de água na região, além de identificar o quanto e quais rotinas computacionais (condição de contorno), quando houver, participam neste processo. As zonas para aplicação da Taxa de Balanço, foram delimitadas contornando áreas em que as drenagens confluem para pontos onde foram realizadas coletas de dados de vazão em um curso d'água. Para cada ponto de monitoramento foi delimitada toda a zona de elementos e nós de sua área de influência, ou seja, a microbacia monitorada. Isso permitiu aferir a quantidade exata de água retirada pelo modelo através da rotina computacional Tipo 1 nas microbacias para que, posteriormente, pudessem ser comparadas com as medidas reais realizadas em campo, bem como entre a etapa de calibração e simulação. Os cursos d'água com suas respectivas zonas onde foram aplicadas a rotina Taxa de Balanço está representado na Figura 5.4.

Os valores medidos em campo, bem como os calculados pelos diferentes modelos estão representados na Tabela 5.4, onde se descreve a vazão por meio da média ( $\mu_{\text{vazão}}$ ) e desvio padrão ( $\sigma_{\text{vazão}}$ ) os resultados das vazões, os modelos probabilísticos compostos pelos modelos K+ e K-. Para o modelo determinístico (K $\mu$ ) a leitura é feita de forma direta.





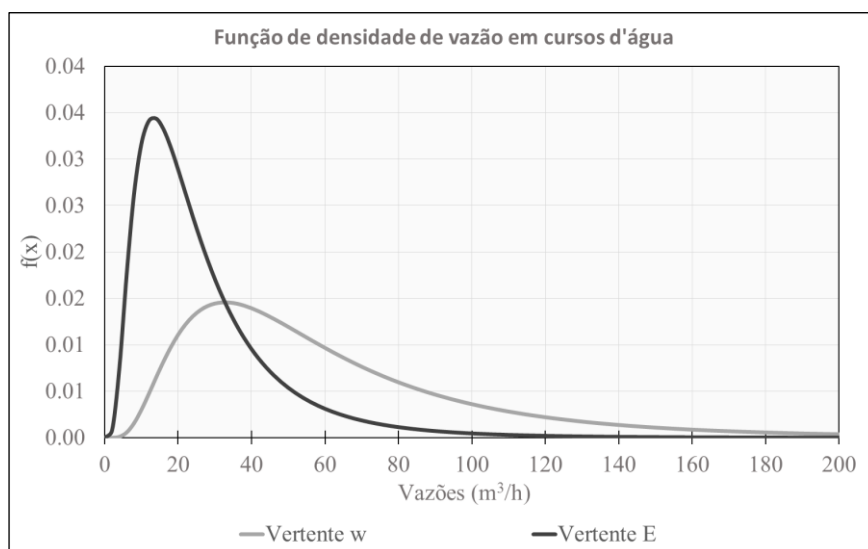
**Figura 5.4-** Zonas onde foram aplicadas a rotina Taxa de Balanço para cálculo do quanto é retirado do modelo pela condição de condição de contorno Tipo 1 (Dirichlet-type BC).

**Tabela 5.2 -** Vazões medidas em campo e calculadas pelo modelo matemático numérico nos pontos de monitoramento e totais nas vertentes leste e oeste da zona mineralizada.

Estações	Vazões (m <sup>3</sup> /h)					
	Monitoradas	K $\mu$	k+	k-	$\mu$ Vazão	$\sigma$ Vazão
SM-VZ-01	76	6	10	1	5.5	4.1
SM-VZ-02	55	7	8	1	4.4	3.3
SM-VZ-03	80	13	11	2	6.8	4.5
SM-VZ-04	12	3	2	1	1.6	0.7
SM-VZ-05	54	11	16	1	9.1	6.4
SM-VZ-06	59	18	20	0	11.1	8.7
SM-VZ-07	42	10	23	4	13.9	9.5
SM-VZ-08	30	11	9	2	5.6	3.5
SM-VZ-10	139	51	60	7	34.8	25.0
SM-VZ-11	14	8	10	2	6.1	4.3
SM-VZ-12	7	8	10	1	5.5	4.1
SM-VZ-14	10	15	17	1	9.8	6.9
Vertente W	232	88	112	16	64	48
Vertente E	233	44	48	6	27	21

Verificando os dados, de um ponto de vista mais geral, percebe-se vazões medidas em campo de 232 e 233m<sup>3</sup>/h para as vertentes à oeste da zona mineralizada e leste, respectivamente, e os dados resultantes da simulação numérica de 64 e 27m<sup>3</sup>/h verifica-se um valor cerca de 80% menor entre o realizado e o simulado. Este fato era esperado uma vez que as duas campanhas foram realizadas sob a influência de eventos pluviométricos ocorridos em dia anteriores, ou até mesmo no mesmo dia.

Assumindo que a vazão nos cursos d'água segue uma distribuição de probabilidade lognormal, os resultados de vazão simulados seguem representados em sua forma gráfica na Figura 5.5. Estão representados nesta figuras os totais da vertente E e W à zona mineralizada,



**Figura 5.5-** Vazões totais das nas vertentes E e W da zona mineralizada.

Uma vez que os dados de K apresentaram uma variabilidade relativamente alta devido à restrita quantidade de amostras deste parâmetro coletadas em campo, representou-se também na tabela os valores obtidos de forma determinística e que é representado pelo modelo  $k=k\mu$  e que foram encontradas vazões iguais a 88 e 44m<sup>3</sup>/h para as vertentes oeste e leste, respectivamente.

Como já presumido, os valores esperados na análise de probabilidades são menores que os atribuídos ao modelo determinístico, uma vez que naquele tipo de análise o resultado está sob influência de cenários distintos (o de alta e o de baixa condutividade hidráulica), e que de certa forma, estão embutidos no resultado em questão, . Na análise determinística, somente um cenário é avaliado.

## **5.2 SIMULAÇÃO DO MÁXIMO REBAIXAMENTO**

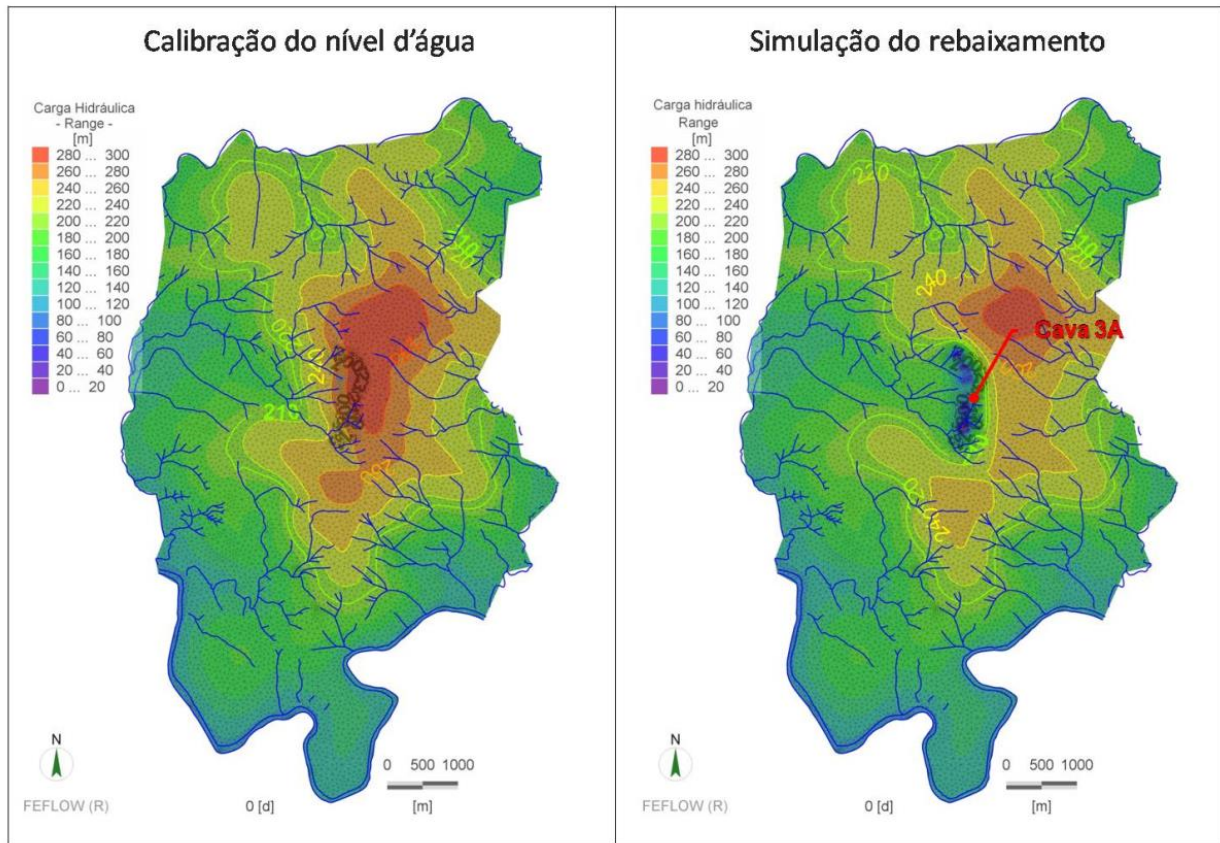
### **5.2.1 VAZÃO E ÀREA DE INFLUÊNCIA DO REBAIXAMENTO DO N.A.**

A primeira fase do trabalho consistiu na calibração em regime permanente dos níveis d'água e vazões monitoradas da situação atual, sendo que ainda não teve início o desaguamento de mina com rebaixamento do N.A. Ela serviu como ponto de partida para a presente etapa que constitui a simulação do máximo rebaixamento para o cenário final de acordo com os planos de lavra fornecidos pela empresa Votorantim Metais. O cenário de cava final prevê o fundo de seu pit, planejado na cota 20m.

A metodologia aplicada na simulação do máximo rebaixamento foi a de acrescentar condições de contorno do Tipo 1, Dirichlet-type BC, que funcionam como drenos (sumidouros) em cotas abaixo do fundo da cava para a situação prevista no plano de lavra. Então as simulações foram efetuadas de tal forma que o N.A. alcançasse uma nova situação de equilíbrio, abaixo do fundo da cava prevista.

Na Figura 5.6 estão representadas as cargas hidráulicas calculadas pelo modelo em um cenário anterior e posterior ao rebaixamento modelado com condutividade hidráulica  $k=k\mu$ .

Inicialmente duas questões foram avaliadas, a vazão de bombeamento e a área de influência por ele proporcionada. Conforme mencionado no início do Capítulo 4, uma das premissas adotadas na construção do modelo numérico foi a simulação em regime estacionário, pois não se dispunha de dados de porosidade do meio para simulações em regime transitório. O que significa que ao considerar uma situação em que se tenha retirado todo o excedente de água armazenado nos interstícios da rocha e todo volume bombeado, seria igual ao volume adicionado pela recarga, estando o modelo em equilíbrio.



**Figura 5.6-** Cargas hidráulicas resultantes do modelo, calibração e da simulação respectivamente. Exemplo referente ao modelo com valor  $k=k_{\mu}$ .

Tendo isto em vista, o modelo tende a subestimar a vazão de bombeamento em relação as fases iniciais de desaguamento, quando este tipo de modelagem é realizado para aquíferos com alto armazenamento (Anderson & Woessner 2002). Como presumido pelo modelo conceitual, assume-se que o aquífero fraturado em questão possui baixo armazenamento, o que leva a crer que com o início do desaguamento o nível d'água chegará de forma rápida em uma situação de equilíbrio. Isto permite concluir que haveria pouca diferença entre o modelo aqui apresentado e o efetivamente realizado.

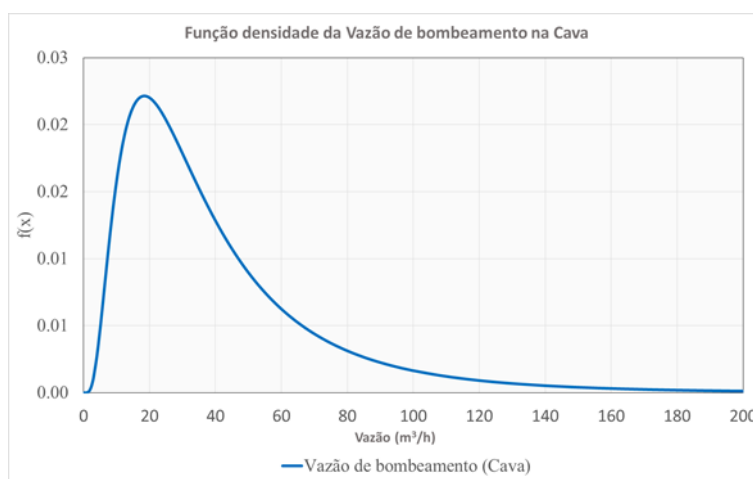
Para a simulação de bombeamento utilizou-se a condição de contorno Tipo 1 (Dirichlet-type BC) na cota equivalente ao fundo da cava. Esta condição pode funcionar como fonte ou sumidouro de água para o modelo, desta forma limitou-se a descarga de retirada para uma vazão igual a zero, fazendo com que a mesma funcionasse como dreno. Ao contrário da rotina poços (Well-BC) onde deve ser fornecida a vazão desejada, na condição de contorno Tipo 1 é estipulada a cota até a qual deseja-se desaguar, enquanto a vazão necessária para atingir aquele patamar é fornecida pelo modelo numérico, e pode ser mensurada através da rotina Taxa de Balanço (*Rate Budget*).

Este mesmo artifício foi utilizado para os três modelos ( $K_{\mu}$ ,  $K_{+}$  e  $K_{-}$ ) assumindo-se que a vazão de bombeamento segue uma distribuição de probabilidade lognormal Figura 5.7.



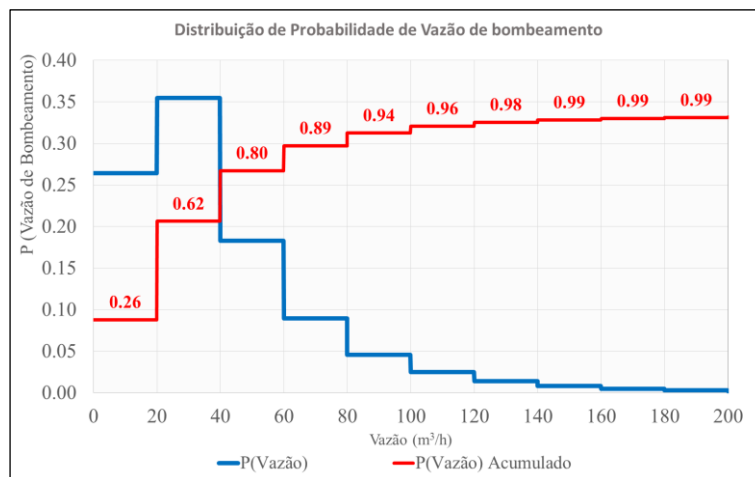
Da mesma forma como os demais resultados representou-se também na tabela os valores obtidos de forma determinística e que é representado pelo modelo  $k=k\mu$  em que foi encontrada vazão de  $80\text{m}^3/\text{h}$ .

Como já mencionado, os valores esperados de vazão de bombeamento na análise de probabilidades são menores aos encontrados no modelo determinístico, uma vez que naquele tipo de análise o resultado está sob influência de cenários distintos, e que de certa forma, estão embutidos no resultado. Na análise determinística, somente um cenário é avaliado.



**Figura 5.7-** Vazão de bombeamento para desaguamento da Cava 3.

Como a condutividade hidráulica foi assumida, em uma das análises do problema como uma variável aleatória, a vazão de bombeamento entre outros resultados também foi assumida como variável aleatória, tendo em vista o modelo de análise de probabilidade aproximado proposto por Rosenblueth (1975). Com este cenário pode-se gerar o gráfico da função densidade de probabilidade de vazão de bombeamento e que por sua vez pode ser traduzido como um gráfico de risco associado ao volume horário de vazão de descarga na cava (Figura 5.8). Como já citado para as variáveis dependentes encontradas foi assumida distribuição lognormal que conforme observado por Assis (2002) e Charbel (2015), pode ser um modelo muito útil quando se tem assimetria a esquerda, ou fisicamente a variável não pode assumir valores menores do que zero, o que é o caso de vazão de bombeamento.



**Figura 5.8-** Representação gráfica do risco de ocorrência de descarga na Cava 3.

Comparando-se o resultado determinístico cuja vazão foi estimada em  $80\text{m}^3/\text{h}$  sob o enfoque probabilístico, tendo em vista as limitações dos dados existentes como já foi amplamente ressaltado nesta dissertação, o gráfico mostra que vazões maiores que  $80\text{m}^3/\text{h}$  teria uma probabilidade pouco maior do que 10% de ocorrência.

A configuração da área de influência do desaguamento e a magnitude do rebaixamento respectivo aos três modelos estão representadas na Figura 5.9. Na Figura 5.10 está representado o contorno da área de influência dos modelos de média, baixa, e alta condutividade hidráulica. A área de influência encontrada foi de cerca de  $7,2\text{km}^2$ , para média e baixa condutividade hidráulica e cerca de  $11,0\text{km}^2$  para alta condutividade hidráulica. Ainda na Figura 5.10, em uma das imagens que compõe a ilustração, está representado o limite de rebaixamento maiores e menores que 5m, onde verifica-se que apesar da alta amplitude de influência do rebaixamento, as variações mais drásticas ficam mais restritas tendo como referência a cava em uma área média de  $3,2\text{km}^2$ .

Percebe-se maior harmonia das curvas resultante do modelo  $k_{\mu}$  e  $k_{+}$ . A configuração do modelo  $k_{-}$ , teve forte influência das discontinuidades (feições discretas) devido ao alto contraste entre esta rotina computacional e  $k$  geral assumido para área.



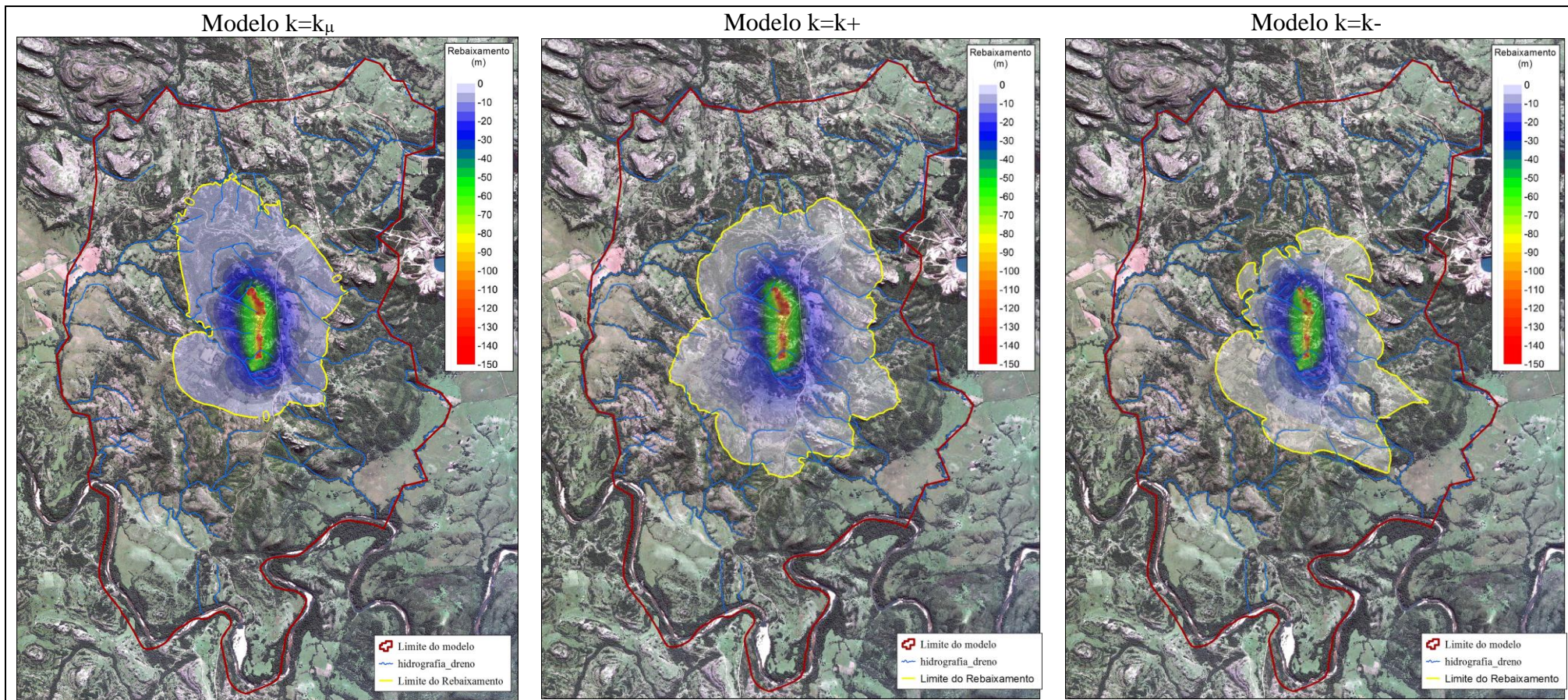
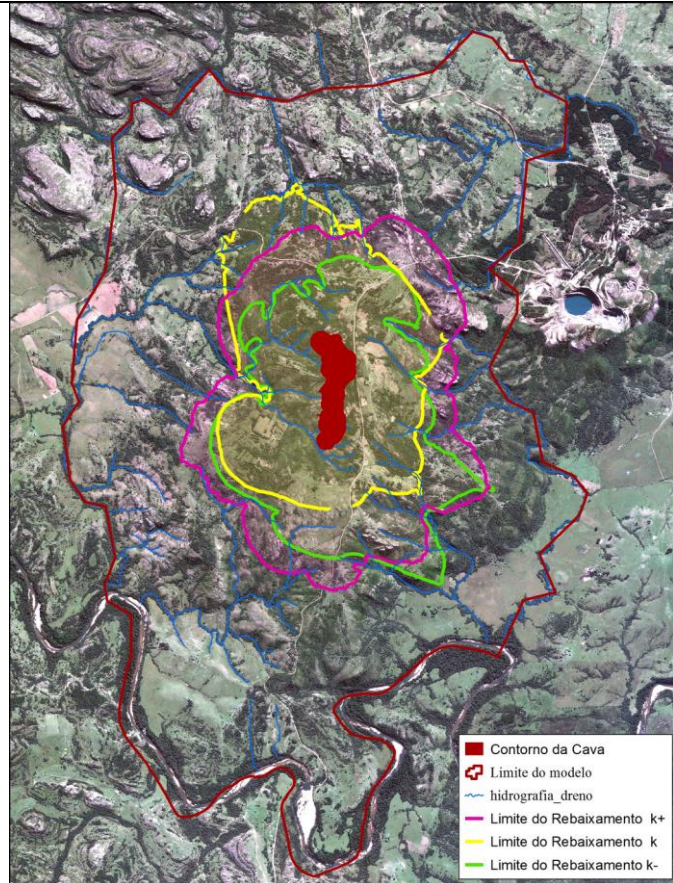


Figura 5.9-Nível d'água resultante e área de influência do rebaixamento.



Área de influência.



Limite de rebaixamento menores e maiores que 5m.

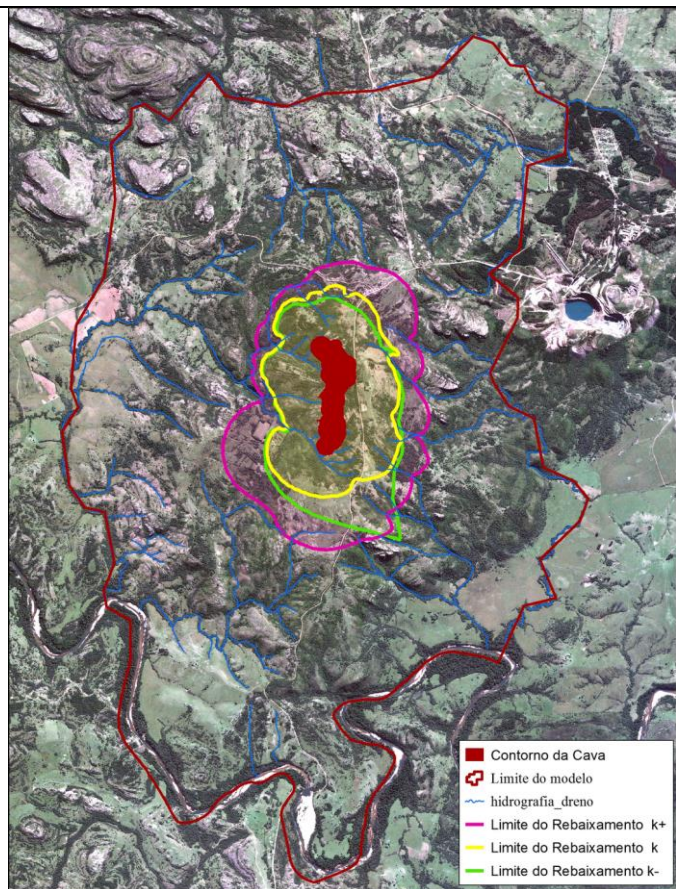


Figura 5.10 - Cotejo entre às áreas de influência do rebaixamento do nível d'água simulado nos três modelos ( $k_{\mu}$ ,  $k+$  e  $k-$ ).

## 5.2.2 A QUESTÃO DA VAZÃO EM CURSOS D'ÁGUA

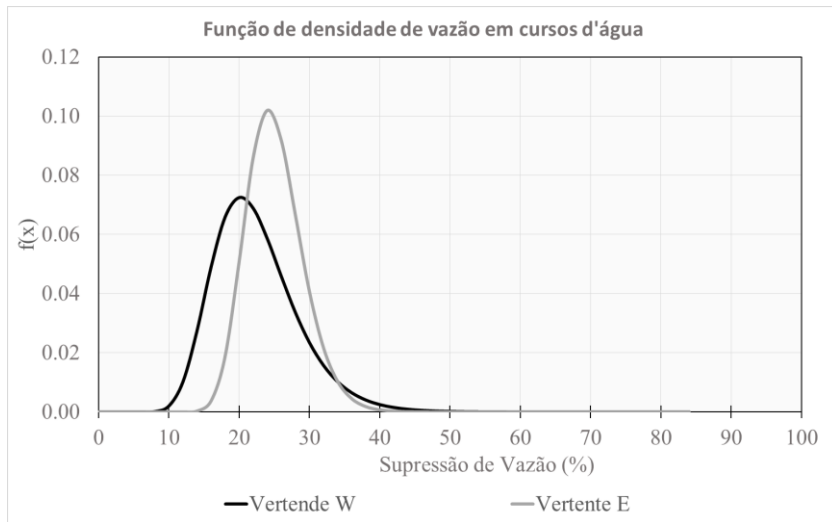
Para esta situação de rebaixamento também foram feitas avaliações e análises dos impactos nas disponibilidades hídricas, nos cursos d'água da região de entorno da cava para os modelos determinístico ( $k\mu$ ) e de probabilidades ( $k+$ ) e ( $k-$ ).

Na Tabela 5.3 está representado o cotejo das vazões obtidas ao final da calibração (cenário anterior ao rebaixamento do N.A.) e ao final da simulação (máximo rebaixamento - Cava 3).

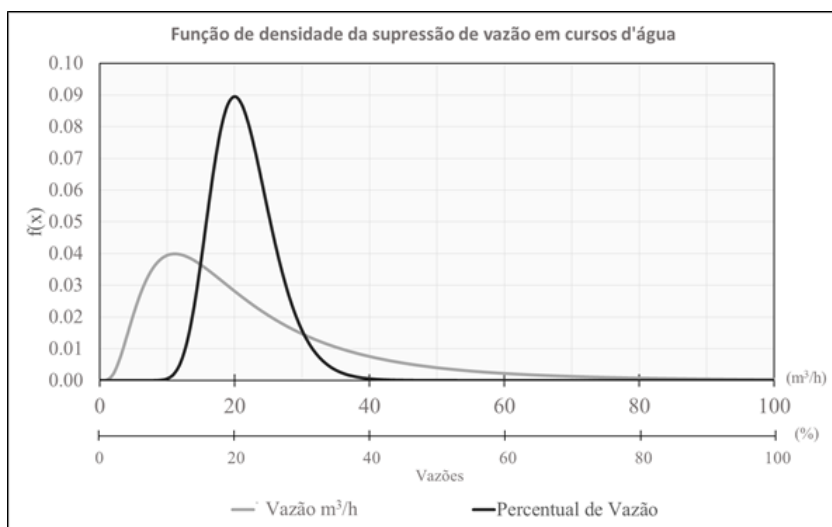
**Tabela 5.3-** Valores de vazão calculados pelo modelo numérico. Na terceira linha, o **C** refere-se aos valores resultantes da calibração e **S** da simulação. Vertente **W** referente a vazão total da vertente à oeste do divisor que contem a zona mineralizada e Vertente **E** à leste.

Pontos de Monitoramento	Vazão (m <sup>3</sup> /h)									$\mu_{Vazão}$	$\sigma_{Vazão}$
	Modelo $k\mu$			Modelo $K+$			Modelo $K-$				
	C	S	C - S (%)	C	S	C - S (%)	C	S	C - S (%)		
Cava	-	80		-	78.2		-	6			
SM-VZ-01	6.5	4.9	25%	9.6	7.4	23%	1.4	1.3	7%	15%	8%
SM-VZ-02	7.3	6.6	10%	7.6	3.7	51%	1.1	0.5	55%	53%	-2%
SM-VZ-03	12.6	6.6	48%	11.3	8.5	25%	2.3	1.8	22%	23%	2%
SM-VZ-04	3.0	2.0	33%	2.4	2.3	4%	0.9	0.9	0%	2%	2%
SM-VZ-05	11.0	4.1	63%	15.5	5.2	66%	2.7	1.3	52%	59%	7%
SM-VZ-06	18.3	2.1	89%	19.8	2.7	86%	2.4	0.3	88%	87%	-1%
SM-VZ-07	21.9	15.2	31%	23.4	21.5	8%	4.3	4.2	2%	5%	3%
SM-VZ-08	11.0	6.8	38%	9.1	8.7	4%	2.1	2.1	0%	2%	2%
SM-VZ-10	50.9	21.4	58%	59.8	30.5	49%	9.8	6.8	31%	40%	9%
SM-VZ-11	8.1	7.0	14%	10.4	10.3	1%	1.8	1.8	0%	0%	0%
SM-VZ-12	7.7	6.6	14%	9.6	9.4	2%	1.5	1.4	7%	4%	-2%
SM-VZ-14	15.3	10.7	30%	16.7	15.7	6%	2.9	2.7	7%	6%	0%
Vertente W	99.6	57.0	43%	112.3	80.4	28%	19.5	16.3	16%	22%	6%
Vertente E	29.4	20.1	32%	30.9	21.9	29%	5.7	4.5	21%	25%	4%
Total	129.0	77.1	40%	143.2	102.3	29%	25.2	20.8	17%	23%	6%

Assumindo que o percentual de supressão de vazão nos cursos d'água segue uma distribuição de probabilidade lognormal, os resultados simulados para as duas vertentes oeste e leste da zona mineralizada seguem representados, em sua forma gráfica na Figura 5.11. Na Figura 5.12 está representado, à distribuição de probabilidade de supressão de vazão em termos percentuais e de volume horário.



**Figura 5.11-** Percentuais de supressão nas vertentes oeste e leste da zona mineralizada.



**Figura 5.12-** Percentuais e volumes horários suprimidos considerando todas microbacias avaliadas.

Conforme já mencionado, devido ao fato dos dados de K apresentarem uma variabilidade alta devido à restrição de amostras deste parâmetro coletadas em campo, representou-se também na Tabela 5.3 os valores obtidos de forma determinística representado pelo modelo  $k=k\mu$  e que foram encontradas percentuais de 43% para a vertente oeste, e 32% que equivalem a uma perda em volume horário de  $42,6 \text{ m}^3/\text{h}$  e  $9,3 \text{ m}^3/\text{h}$ , respectivamente.

Como podem ser percebidas, em termos gerais as diminuições mais significativas em termos de volume horário, na simulação de máximo rebaixamento, foram identificadas nas microbacias a oeste da zona mineralizada. No modelo determinístico o mesmo fato foi observado em termos de intensidade de perda (%), enquanto na análise probabilística as intensidades foram praticamente iguais para as duas vertentes (%).

## CAPÍTULO 6

### CONSIDERAÇÕES FINAIS, CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

O reconhecimento prévio do meio hídrico subterrâneo deve ser desenvolvido desde o Estudo de Viabilidade e Engenharia Conceitual até o encerramento do empreendimento. Além de motivos que satisfazem a interesses tais como de economia, manutenção da produção, há também questões que envolvem agentes externos, como o ecossistema e sociedade locais.

Este trabalho consistiu na elaboração de um modelo conceitual e numérico concebidos utilizando-se metodologias não clássicas a área, onde se pretende instalar a mina de zinco e chumbo pela Votorantim Metais S/A, denominado de Projeto Santa Maria, para previsão de como se dará a interação entre a mina e o meio hídrico subterrâneo, em seu estágio mais crítico do empreendimento (final de vida útil da Cava 3).

O substrato da área é composto por unidades, principalmente dos grupos Santa Bárbara e Guaritas; e apesar das litologias (arenitos, arcóseos e conglomerados) que compõem estas unidades serem rochas típicas na constituição de aquíferos intergranulares, foi possível constatar que o aquífero em questão comporta-se como um aquífero fraturado devido em grande parte de sua porosidade primária estar em grande parte, preenchida por cimentos calcínicos, silicosos e ferruginosos.

Desta forma a construção do modelo utilizando-se solução numérica pelo método de elementos finitos mostrou-se bastante pertinente. Com a utilização desta abordagem foi possível representar numericamente descontinuidades presentes no maciço. Para isso, foi utilizada a ferramenta “Feições Discretas”, rotina computacional que proporcionou a mescla de elementos tri e bidimensionais na composição do modelo numérico para o aquífero. Com esta ferramenta, foram representados os principais sistemas de falhas existentes na área.

O modelo conceitual e os resultados obtidos com a modelagem numérica de aquífero forneceram valores de recargas e valores de condutividade hidráulica modestos, da ordem de 5% da precipitação e  $10^{-8}$  m/s, respectivamente. Também foi possível inferir baixos valores de armazenamento. Deste fato, deduzem-se que a vazão real entrará em equilíbrio com o meio e não será muito discrepante da estimada pelo modelo em regime estacionário. O valor de bombeamento para o cenário mais crítico da mina (cava final) foi estimado em cerca de 80m<sup>3</sup>/h, por método determinístico com probabilidade de apenas 10% de ocorrerem vazões acima deste valor.

Mesmo nestas condições, é prudente a instalação de poços pilotos e piezômetros multiníveis para conhecimento com maior grau de precisão o valor e a distribuição dos tensores condutividade hidráulica, e armazenamento, para assim validar e/ou produzir modelos mais

aderentes a realidade. Para a locação dos poços de monitoramento e bombeamento é importante que já se tenha conhecimento da distribuição e características das principais discontinuidades, de forma a construí-los respeitando a geometria destas feições para melhor caracterizá-las.

Dados reais de armazenamento oriundos dos testes com, pelo menos um poço piloto, possibilitará a realização de estudos em estágios intermediários ao aqui apresentado (Cava 3 próximo à exaustão) através de modelos em regime transitório. Uma forma alternativa, enquanto não se disponha destes dados, são simulações em regime estacionário para diferentes cenários evolutivos da mina, que como já mencionado, proporcionarão resultados próximos ao que seria obtido em regime transitório.

Caso a confirmação do modelo proposto nos estágios mais avançados de estudo, tendo em vistas os parâmetros hidráulicos do aquífero com valores reduzidos, o desaguamento da mina através de poços de bombeamento a longo prazo pode não ser muito eficiente, restringindo-se por ventura, a sua utilização nos estágios iniciais de escavação da cava aqui retratada. O baixo valor dos citados parâmetros, e anisotropia inerente ao maciço fraturado podem proporcionar rebaixamentos localizados no nível freático do maciço, o que poderia resultar na perfuração de um grande número de poços, de muito baixa vazão. Somado a isto, se olharmos os dados climatológicos da área, um importante fator a ser considerado futuramente no desaguamento da cava é a componente precipitação direta e fluxos internos e que muito certamente terão relevância cada vez maior com o crescimento areal da cava da mina.

Neste caso sugere-se o desaguamento da mina por Drenos Horizontais Profundos (DHP) associado a reservatórios (*Sump*) a exemplo do caso mina de Vazante da Votorantim Metais (Figura 6.1). Apesar de se tratar de uma mina subterrânea, esta prática pode ser facilmente adaptada, tendo-se em vista a perfuração dos furos de dreno nos bancos mais baixos da mina, desde que não entre em conflito com o plano de lavra proposto. Na mina aqui exemplificada é comum a realização de furos de drenos horizontais de até 300m de profundidade para drenagem de mina. Os furos são realizados com o intuito de interceptação do maior número possível de discontinuidades, no caso subverticais, do aquífero. A boa competência do maciço na área do Deposito Santa Maria possivelmente irá favorecer a longevidade dos furos de drenos mesmo após eventos de detonação (como é comumente observado na mina de Vazante).

Além dos fatos já apresentados, foi possível determinar a área de influência do rebaixamento oriundo do bombeamento estimado chegando a um valor de aproximadamente 7 a 11 km<sup>2</sup>. Como consequência, estimou-se uma redução de vazão nos cursos d'água, no cenário mais crítico da mina, de cerca de 40%, pelo método determinístico e 32% pelo método probabilístico.





**Figura 6.1** - Furos de drenagem usualmente realizados por dentro de válvulas chumbadas à rocha, para desaguamento de mina (Mina de Zinco de Vazante - Votorantim Metais S/A).

Através da área de influência delimitada é possível mapear possíveis superficiários que poderão ser impactados no cenário mais crítico da mina, próximo ao final de sua vida útil. Verificou-se ainda que rebaixamentos do nível freático mais intensos estarão localizados no entorno próximo à cava da mina, onde possivelmente serão implantadas as instalações do empreendimento.

Devido aos volumes reduzidos das descargas líquidas nos cursos d'água locais, a vazão subtraída poderá ser facilmente compensada através do bombeamento a ser realizado na cava. Caso os prognósticos fornecidos no presente trabalho se confirmem e caso a melhor opção seja realmente o desaguamento através de drenos e reservatórios, haverá a necessidade de tratamento prévio para descarte da água de rebaixamento nos cursos d'água locais.

Para melhor detalhamento e entendimento da dinâmica hídrica do aquífero fraturado na área do depósito, recomenda-se, em trabalhos futuros a realização de estimativas mais sólidas da taxa de recarga e do fluxo de base das microbacias de entorno da área, bem como o reconhecimento dos principais pontos de descarga do aquífero.

Grande parte dos parâmetros necessários para caracterização de um aquífero são variáveis no tempo, sendo a vazão em cursos d'água um destes parâmetros. O reconhecimento mais preciso do fluxo de base, só será possível com o monitoramento contínuo nos principais cursos d'água. Estes dados, juntamente com parâmetros já monitorados, fornecerão elementos para caracterização do regime hídrico local (o que inclui estimativas globais da recarga) antes da instalação do empreendimento. Esta caracterização também servirá, não só para promover ações mais efetivas de mitigação de possíveis impactos na área, como também servirão como *background* para eventuais questionamentos futuros por parte dos agentes que utilizam e que regulam o uso dos recursos hídricos locais.

Além das estimativas globais fornecidas pela caracterização do regime hídrico local, para modelos mais precisos podem ser realizadas estimativas localizadas de recarga, de forma a determinar sua distribuição. Um método relativamente simples e que pode ser empregado na área, em questão, que ainda encontra-se em fase exploração mineral, é o método de Estimativa da Recarga pela Flutuação do Nível d'água (Healy & Scanlon 2013). Este método pode ser aplicado sem a utilização de mão-de-obra adicional com o auxílio de medidores automáticos de nível d'água, e que se mostra bastante preciso em posse de dados prolongados de monitoramento de níveis estáticos e de dados confiáveis de porosidade efetiva.

Como o fluxo hídrico subterrâneo tem como um dos principais condicionantes as descontinuidades presentes no maciço, recomenda-se a caracterização destas feições o melhor quanto possível em campanhas de campo balizadas por informações de furos de sondagem. Investigações mais profundas deste aspecto fornecerão incrementos consideráveis aos modelos numéricos a serem realizados nos estágios mais avançados da pesquisa hidrogeológica da área, para aumentar sua aderência à realidade. Parâmetros tais como condutividade hidráulica, espessura e coeficiente de rugosidade das fraturas podem ser representados numericamente em modelos numéricos pelo método de elementos finitos. Assim recomenda-se a continuidade de utilização desta metodologia.

Nesta pesquisa foram realizadas análises dos resultados da modelagem numérica através de duas abordagens, uma determinística em que foram considerados os valores médios dos parâmetros coletados em campo, no caso a condutividade hidráulica ou  $K$ , e outra probabilística segundo o Método das Estimativa Pontuais.

A vantagem na análise de forma a considerar a probabilidade do evento é que o resultado encontrado está sob influência de cenários distintos, intrínsecos aos dados coletados. No caso deste trabalho, utilizou-se esta abordagem, ainda de forma superficial, tendo-se em vista a quantidade relativamente pequena de dados de condutividade hidráulica, e a baixa quantidade de variáveis como um todo de que se tinha algum conhecimento, mesmo que parcial, de sua distribuição. Assim os resultados devem ser analisados com ressalvas, e são apresentados como complementares aos resultados fornecidos na análise determinística.

Para trabalhos futuros conforme for evoluindo o conhecimento hidrogeológico e estrutural da área com conseqüente adensamento de dados disponíveis, a utilização do método das estimativas pontuais ou de metodologias semelhantes (até mesmo mais robustas) pode facilitar a tomadas de decisões inerentes ao gerenciamento dos recursos hídricos, pois dão ideia melhor do custo/benefício da decisão a ser tomada.

Apesar da utilização de uma só variável para caracterização dos pontos de estimativa, o método permite a utilização de  $n$  variáveis o que resultaria, em  $2n$  pontos de

estimativas(Rosenblueth 1975 e Rosenblueth 1981). Além de ser um fator para melhor caracterização das variáveis que governam o fluxo de água subterrânea na área em apreço, a caracterização de mais variáveis, tais como recarga e vazão em curso d'água pode fornecer resultados mais aderentes das análises pelo Método de Rosenblueth.O reconhecimento da distribuição de mais variáveis independentes possibilitaria ajustar a distribuição das variáveis dependentes resultantes da modelagem, em mais de dois pontos.

## 6.1 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABGE 2013. Ensaio de Permeabilidade em Solos São Paulo. Associação Brasileira de Geologia de Engenharia 4 ed. 80 P.
- Almeida R. P. de 2005. Tectônica e sedimentação do Ediacarano ao Ordoviciano: exemplos do Supergrupo Camaquã (RS) e do Grupo Caacupé (Paraguai oriental).
- Almeida D. del P. M. de, Chemale J. F. and Machado A. 2012. Late to Post-Orogenic Brasiliano-Pan-African Volcano-Sedimentary Basins in the Dom.
- Almeida R. P., Janikian L., Fragoso-Cesar A. R. S. and Fambrini G. L. 2010. The Ediacaran to Cambrian Rift System of Southeastern South America: Tectonic Implications. *The Journal of Geology*, **118**(2):145–161.
- Almeida R. P., Janikian L., Fragoso-Cesar A. R. S. and Marconato A. 2009. Evolution of a rift basin dominated by subaerial deposits: The Guaritas Rift, Early Cambrian, Southern Brazil. *Sedimentary Geology*, **217**(1-4):30–51.
- Anderson M. P. and Woessner W. W. 202AD. Applied groundwater modeling: simulation of flow and advective transport. Academic press. 384 P.
- Anderson M. P. and Woessner W. W. 2002. Applied groundwater modeling: simulation of flow and advective transport. Academic press. 384 P.
- Arraes M. and Campos J. E. G. 2007. Proposição de critérios para avaliação e delimitação de bacias hidrogeológicas. **37**(1):81–89.
- Aryafar a. and Ardejani F. D. 2009. 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.
- Assis A. 2002. Métodos Estatísticos e Probabilísticos em Geotecnia. 189.
- Bear J., Beljin M. S. and Ross R. R. 1996. Fundamentals of Ground-Water Modeling 1. EPA Environmental Assessment Sourcebook, 147.
- Beven K. 2000a. Uniqueness of place and process representations in hydrological modelling. *Hydrology and Earth System Sciences ...*, **4**(2):203–213.
- Beven K. J. 2000b. Uniqueness of place and process representations in hydrological modelling. *Hydrology and Earth System Sciences*, **4**(2):203–213.
- Bicca M. M., Chemale F., Jelinek A. R. de Oliveira C. H. E., Guadagnin F. and Armstrong R. 2013. Tectonic evolution and provenance of the Santa Bárbara Group, Camaquã Mines region, Rio Grande do Sul, Brazil. *Journal of South American Earth Sciences*, **48**:173–192.
- Borba A. W. de 2006. Evolução geológica da Bacia do Camaquã: Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 109 p.
- Borba A. W., Mizusaki A. M. P., Santos J. O. S., McNaughton N. J., Onoe A. T. and Hartmann L. a. 2008. U-Pb zircon and <sup>40</sup>Ar-<sup>39</sup>Ar K-feldspar dating of syn-sedimentary volcanism of the Neoproterozoic Maricá Formation: constraining the age of foreland basin inception and inversion in the Camaquã Basin of southern Brazil. *Basin Research*, **20**(3):359–375.
- Bredehoeft J. D. 2003. From Models to Performance Assessment: The Conceptualization Problem. *Ground Water*, **41**(5):571–577.
- Bredehoeft J. 2005. The conceptualization model problem? surprise. *Hydrogeology Journal*, **13**(1):37–46.
- Britto F. P. 2004. Distribuição Pluvial no Estado Do Rio Grande do Sul: Universidade Federal de Santa Catarina, 65 p.

- Brown K. and Trott S. 2014. Groundwater Flow Models in Open Pit Mining: Can We Do Better? *Mine Water and the Environment*, **33**(2):187–190.
- Brunetti E. Jones J. P. Petitta M. and Rudolph D. L. 2012. Assessing the impact of large-scale dewatering on fault-controlled aquifer systems: a case study in the Acque Albule basin (Tivoli, central Italy). *Hydrogeology Journal*, **21**(2):401–423.
- Bryan K. 1919. Classification of Springs. *The Journal of Geology*, **27**(7):522–561.
- Cabral J. and Demétrio J. 2008. Aplicação de modelos em Hidrogeologia, *in* Hidrogeologia: Conceitos e aplicações, CPRM, Rio de Janeiro, p. 687–707.
- Charbel P. A. 2015. Gerenciamento de Risco Aplicado à Diluição de Minério: Universidade de Brasília, 448 p.
- Diego S. 2007. Manual do Usuário do ADV® de Mão do FlowTracker® Versão Firmware 3.3. **1**(858):
- Fambrini G. L. Janikian L. de Almeida R. P. and Fragoso-Cesar A. R. S. 2007. Evolução Estratigráfica e paleogeográfica do grupo Santa Bárbara (Ediacarano) na sub-bacia Camaquã Central, RS. *Geologia USP. Série Científica*, **7**(2):1–24.
- Fambrini G. L. Janikian L. Almeida R. P. D. E. and Fragoso-Cesar A. R. S. 2005. O GRUPO SANTA BÁRBARA ( EDIACARANO ) NA SUB-BACIA CAMAQUÃ CENTRAL , RS : ESTRATIGRAFIA E SISTEMAS DE POSICIONAIS. **35**(2):227–238.
- Farias M. M. de. and Assis A. 1998. Uma Comparação Entre Métodos Probabilístico Aplicado à Estabilidade de Taludes, *in* Anais do XI Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica - COBRAMSEG, Brasília - DF, p. 1305–1313.
- Faust C. Silka L. and Mercer J. 1981. COMPUTER MODELING AND GROUND- WATER PROTECTION. *Groundwater*, **19**(4):362–365.
- Feitosa E. carneiro. and Feitosa F. A. C. 2008. Metodologia Básica de Pesquisa de Água Subterrânea, *in* Feitosa, F.A.C., Manoel Filho, J., Feitosa, E.C., and Demétrio, J.G.A. eds., Hidrogeologia: Conceitos e aplicações, CPRM: LABHID, RJ, p. 809.
- Fetter C. W. 2001. *Applied Hydrogeology* New Jersey. Prentice hall 4 ed. 615 P.
- Gilg B. and Gavard M. 1957. Calcul de la perméabilité par des essais d'eau dans les sondages en alluvions. *Bulletin Technique De La Suisse Romande*, **4**(83):50.
- Hansen M. A. F. and Fensterseifer J. C. 2000. Caracterização Edafopedológica da Sub-Bacia do Arroio João Dias como Ferramenta de Planejamento Ambiental, Bacia Hidrográfica do Rio Camaquã, RS, Brasil, *in* Ronchi, L.H. and Lobato, A.O.C. eds., Minas do Camaquã: um estudo multidisciplinar, Editora UNISINOS, São Leopoldo, p. 211–240.
- Healy R. W. and Scanlon B. R. 2013. *Estimating groundwater recharge* Cambridge. Cambridge University Press.
- Hidrovia 2015. Cadastro de nascentes complementar Projeto Santa Maria / RS Belo Horizonte:.
- Hidrovia 2014. Diagnóstico Hidrogeológico Para Estudo De Impacto Ambiental (Eia) E Relatório De Impacto Ambiental (Rima) Projeto Santa Maria – Rs:.
- IBGE 2003. Geomorfologia - Compatibilização Intertemática das Unidades de Mapeamento Executadas de Setembro de 1998 a Outubro de 2000 - Folha Cachoeira do Sul (SH.22-Y-A) Porto Alegre - RS. Secretaria da Agricultura e Abastecimento.
- IBGE 2009. Manual Técnico de Geomorfologia. 175 P.
- Irriga H. and Precisa R. 1999. Considerações sobre análises químicas de águas subterrâneas. 91–97.

- Jahagirdar S. Ramaswamy K. and Shah N. 1997. Application of Vertical Hele-Shaw Model in Subsurface Drainage Investigations. *Karnataka Journal of ...*, **10**(3):749–755.
- James A. L. and Oldenburg C. M. 1997. Linear and Monte Carlo uncertainty analysis for subsurface contaminant transport simulation. *Water Resources Research*, **33**(11):2495–2508.
- Janikian L. de Almeida R. P. Fragoso-Cesar A. R. S. Martins V. T. D. S. Dantas E. L. Tohver E. McReath I. and D'Agrella-Filho M. S. 2012. Ages (U–Pb SHRIMP and LA ICPMS) and stratigraphic evolution of the Neoproterozoic volcano-sedimentary successions from the extensional Camaquã Basin, Southern Brazil. *Gondwana Research*, **21**(2-3):466–482.
- Janikian L. de Almeida R. P. da Trindade R. I. F. Fragoso-Cesar A. R. S. D'Agrella-Filho M. S. Dantas E. L. and Tohver E. 2008. The continental record of Ediacaran volcano-sedimentary successions in southern Brazil and their global implications. *Terra Nova*, **20**(4):259–266.
- Kaden S. Luckner L. Peukert D. and Tiemer K. 1985. Decision support model systems for regional water policies in open-pit lignite mining areas. *International journal of mine water*, **4**(1):1–16.
- Kelson V. A. Hunt R. J. and Haitjema H. M. 2002. Improving a Regional Model Using Reduced Complexity and Parameter Estimation. *Ground Water*, **40**(2):132–143.
- Krčmář D. and Sracek O. 2014. MODFLOW-USG: the New Possibilities in Mine Hydrogeology Modelling (or What is Not Written in the Manuals). *Mine Water and the Environment*, 1–8.
- Kuinchtner A. and Buriol G. A. 2001. Clima do Estado do Rio Grande do Sul segundo a classificação climática de Köppen e Thornthwaite. *Disciplinarum Scientia*, 171–182.
- Lambooy T. 2011. Corporate social responsibility: sustainable water use. *Journal of Cleaner Production*, **19**(8):852–866.
- Lemos M. G. 2014. Laudo Caracterização Mineralógica: Projeto Santa Maria:.
- Lima J. O. G. De. França A. M. M. and Loiola H. G. 2014. Implicações Hidroquímicas da Condutividade Elétrica e do Íon Cloreto na Qualidade das Águas Subterrâneas do Semiárido Cearense. *Revista Virtual de Química*, **6**(2):
- Lima A. C. P. and Magalhães M. N. 2002. Noções de probabilidade e estatística. Editora da Universidade de São Paulo 4 ed. 392 P.
- Machado J. L. F. and Freitas M. a 2005. Mapa Hidrogeológico do Estado do Rio Grande do Sul. 71.
- McLaren R. G. 1997. Grid Builder 5.0: user's guide—a preprocessor for 2D triangular finite element programs. Waterloo Center for Groundwater Research, University of Waterloo, Waterloo, ON,.
- Mercer E. P. de B. 2006. Apresentação, in Domingues, A.F., Gambogi Boson, P.H., and Alipaz, S. eds., *A Gestão dos recursos hídricos e a mineração*, IBRAM & ANA, Brasília - DF, p. 337.
- Neuman S. and Wierenga P. 2003. A comprehensive strategy of hydrogeologic modeling and uncertainty analysis for nuclear facilities and sites. University of Arizona.
- Oreskes N. Shrader-Frechette K. and Belitz K. 1994. Verification, validation, and confirmation of numerical models in the earth sciences. *Science*, **263**:641–646.
- Organização das Nações Unidas 1995. Conferência das Nações Unidas sobre o Meio Ambiente e Desenvolvimento (1992: Rio de Janeiro):.
- Paim P. S. G. Chemale Jr F. and Lopes R. da C. 2000. A Bacia do Camaquã. *Geologia do Rio Grande do Sul*, 231–274.
- Paim P. S. G. Jr. F. C. and Wildner W. 2014. ESTÁGIOS EVOLUTIVOS DA BACIA DO CAMAQUÃ. *Ciência e Natura*, Santa Maria (in press), 1–14.



- Rapantova N. Grmela A. Vojtek D. Halir J. and Michalek B. 2007. Ground Water Flow Modelling Applications in Mining Hydrogeology. *Mine Water and the Environment*, **26**(4):264–270.
- Remus M. V. . Hartmann L. A. McNaughton N. J. Groves D. I. and Reischl J. L. 2000. Distal Magmatic-Hydrothermal Origin for the Camaquã Cu (Au-Ag) and Santa Maria. (2):155–174.
- Romano E. Romano P. A. and Feitosa V. M. N. 2006. Gestão descentralizada e participativa dos recursos hídricos e a mineração: riscos e oportunidades, *in* Domingues, A.F., Gambogi Boson, P.H., and Alipaz, S. eds., *Gestão dos recursos hídricos e a mineração*, IBRAM & ANA, Brasília - DF, p. 53–67.
- Rosenblueth E. 1975. Point estimates for probability moments. **72**(10):3812–3814.
- Rosenblueth E. 1981. Two-point estimates in probabilities. **5**(April):329–335.
- Ross J. L. S. 1992. O registro cartográfico dos fatos geomorfológicos ea questão da taxonomia do relevo. *RDG Revista do Departamento de Geografia-USP*, (6):17–29.
- 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.
- Silva L. C. McNaughton N. J. Armstrong R. Hartmann L. A. and Fletcher I. R. 2005. The neoproterozoic Mantiqueira Province and its African connections: a zircon-based U–Pb geochronologic subdivision for the Brasiliano/Pan-African systems of orogens. *Precambrian Research*, **136**(3-4):203–240.
- Singh R. N. and Reed S. M. 1988. Mathematical modelling for estimation of minewater inflow to a surface mining operation. *International journal of mine water*, **7**(3):1–33.
- Singhal B. B. S. and Gupta R. P. 2010. *Applied Hydrogeology of Fractured Rocks : Second Edition* Dordrecht. Springer Science+Business Media B.V.
- Troldborg L. Refsgaard J. C. Jensen K. H. and Engesgaard P. 2007. The importance of alternative conceptual models for simulation of concentrations in a multi-aquifer system. *Hydrogeology Journal*, **15**(5):843–860.
- Voss C. I. 2011. Editor’s message: Groundwater modeling fantasies —part 1, adrift in the details. *Hydrogeology Journal*, **19**(7):1281–1284.
- Walton W. 1979. Progress in analytical groundwater modeling. *Journal of Hydrology*, **43**:149–159.
- Ye M. Pohlmann K. F. Chapman J. B. Pohl G. M. and Reeves D. M. 2010. A model-averaging method for assessing groundwater conceptual model uncertainty. *Ground Water*, **48**(5):716–28.
- Younger P. and Wolkersdorfer C. 2004. Mining Impacts on the Fresh Water Environment: Technical and Managerial Guidelines for Catchment Scale Management. *Mine Water and the Environment*, **23**(1):s2–s80.
- Zheng C. and Bennett G. 1995. *Applied contaminant transport modeling* New York. Van Nostrand Reinhold. 440 P.

## **ANEXO**

**7.1 ANEXO 1 - DADOS DAS ESTAÇÕES FLUVIOMÉTRICAS**

**7.2 ANEXO 1 - DADOS DAS NASCENTES INVENTARIADAS**

**7.3 ANEXO 1 - LÂMINAS MLA**

**7.4 ANEXO 2 - GRÁFICOS - SLUG TEST**

**Tabela 7.1** - Vazões e parâmetros físicoquímicos coletados nas estações fluviométricas - Primeira Campanha Jan/2014.

Estação	Coordenadas			Temp. (°C)	pH	EH (mV)	Cond. (µS)	STD (ppm)	Vazão m <sup>3</sup> /h	Referência 2
	UTM-X	UTM-Y	UTM-Z							
SM-VZ-01	265104	6577393	214		6.64	372	41	20	75.6	Vertente NE
SM-VZ-02	264922	6577102	221	23.6	6.36	415	31	15	55.1	Vertente NE
SM-VZ-03	265228	6576792	207	23.6	6.67	390	85	42	80.3	Vertente E
SM-VZ-04	264951	6578173	230	22.2	6.91	325	66	32	33.8	Vertente NE
SM-VZ-05	262386	6577463	186	25	6.85	351	36	18	54.0	Vertente NW
SM-VZ-06	262393	6576968	176	25.2	6.94	330	192	95	59.4	Vertente W
SM-VZ-07	262157	6574572	165	22.4	7.1	349	176	75	42.1	Vertente SW
SM-VZ-08	262249	6574498	169	22.1	7.06	361	35	17	30.2	Vertente SW
SM-VZ-09	260662	6574676	128	23.4	6.97	355	64	32	351.4	Vertente W (Bacias 5,6,10,11,12)
SM-VZ-10	261080	6577968	153	23	6.93	339	48	24	163.8	Vertente W (Bacias 5,6)
SM-VZ-11	260363	6577207	147	24.7	7	321	70	35	21.6	Vertente WNW (longe da estrutura)
SM-VZ-12	260425	6577017	141	23.4	7.07	308	96	49	7.2	Vertente W (longe da estrutura)
SM-VZ-13	267335	6578434	149	20.4	7.58	312	1660	832	104.8	Àgua Gruta (Escritório VM)
SM-VZ-14	264792	6574441	129	26.6	6.48	315	86	40	10.1	Vertente SE
SM-VZ-15	265370	6574240	118	26.2	6.96	269	132	60	775.4	Vertente W (Bacias 1,2,3)
SM-VZ-16	269508	6575772	123	?	?	?	?	?	11668.4	Arroio João Dias
SM-VZ-17	263328	6576611	287	23	7.04	166	561	255	1.2	Açudes

**Tabela 7.2-** Vazões e parâmetros físico-químicos coletados nas estações fluviométricas - Segunda Campanha Set/2014.

Estação	Coordenadas			Temp. (oC)	pH	EH (mV)	Cond. (µS)	STD (ppm)	Vazão m3/h	Referência 2
	UTM-X	UTM-Y	UTM-Z							
SM-VZ-01	265104	6577393	214	14.6	6.86	372	20	10	126.7	Vertente NE
SM-VZ-02	264922	6577102	221	14.8	6.91	362	26	13	83.2	Vertente NE
SM-VZ-03	265228	6576792	207	15.1	7.55	341	42	18	166.0	Vertente E
SM-VZ-04	264951	6578173	230	15	7.2	358	31	15	12.2	Vertente NE
SM-VZ-05	262386	6577463	186	14.8	7.05	366	29	14	172.4	Vertente NW
SM-VZ-06	262393	6576968	176	14.8	6.66	367	36	17	92.2	Vertente W
SM-VZ-07	262157	6574572	165	17.3	6.96	369	48	24	165.2	Vertente SW
SM-VZ-08	262249	6574498	169	16.9	6.88	376	30	14	117.7	Vertente SW
SM-VZ-09	260662	6574676	128	15.7	7.54	328	62	31	970.2	Vertente W (Bacias 5,6,10,11,12)
SM-VZ-10	261080	6577968	153	14.5	7.17	344	55	27	138.6	Vertente W (Bacias 5,6)
SM-VZ-11	260363	6577207	147	14.1	7.41	333	69	34	13.7	Vertente WNW (longe da estrutura)
SM-VZ-12	260425	6577017	141	14.1	6.79	340	146	73	9.4	Vertente W (longe da estrutura)
SM-VZ-13	267335	6578434	149	18.6	7.8	343	1353	676	83.2	Àgua Gruta (Escritório VM)
SM-VZ-14	264792	6574441	129	15.7	6.84	354	43	21	141.5	Vertente SE
SM-VZ-15	265370	6574240	118	16.1	6.88	362	84	41	420.8	Vertente W (Bacias 1,2,3)
SM-VZ-16	269508	6575772	123	-	-	-	-	-	-	Arroio João Dias
SM-VZ-17	263328	6576611	287	15.6	6.66	279	107	53	1.7	Açudes

**Tabela 7.3-** Dados cadastrais das nascentes inventariadas, modificado de Hidrovia (2015).

Nascentes	UTM E	UTM N	Cota (m)	Data 1*	Data 2 **	Descrição
NA-01	262823	6574135	223	-	12/06/2015	Nascente pontual em solo orgânico, coberta por mata ciliar pouco densa. Água bem turva, solo argilo arenoso bem encharcado devido às chuvas dos últimos dias.
NA-02	262749	6574185	218	-	12/06/2015	Nascente pontual em solo orgânico argilo arenoso, coberta por mata ciliar pouca densa. Solo bem encharcado, devido às chuvas dos últimos dias.
NA-03	262723	6574544	203	-	12/06/2015	Nascente pontual de contato entre solo orgânico e rocha aflorante, coberta por resto de mata ciliar. O solo encontra-se bem encharcado devido às chuvas dos últimos dias.
NA-12	263169	6577597	276	-	15/06/2015	Nascente pontual de contato entre solo orgânico e rocha, coberta por vegetação densa. Ao longo do talvegue, leito rochoso. Solo no entorno bem úmido. Nascente não registrada no cadastro anterior.
NA-20	262561	6578362	254	01/02/2014	13/06/2015	Nascente pontual de contato entre solo orgânico e rocha aflorante, coberta por vegetação arbórea densa, caracterizada por surgência e sumidouro.
NA-21	262694	6578331	240	01/02/2014	13/06/2015	Nascente pontual de contato entre solo orgânico e rocha aflorante, coberta por mata ciliar. Devido às chuvas dos últimos dias, o ponto foi cadastrado a aproximadamente 60 m a montante do primeiro cadastro.
NA-23	263455	6578153	303	01/02/2014	13/06/2015	Nascente pontual de contato entre solo orgânico e rocha aflorante, coberto por resto de mata ciliar. Solo argilo arenoso e encharcado. Água cristalina. Foi cadastrada mais a montante de sua posição no primeiro cadastro.
NA-24	263248	6577808	294	01/02/2014	13/06/2015	Nascente pontual de contato entre solo e rocha. Ao longo do talvegue, leito rochoso com blocos rolados. Coberta por vegetação densa, solo no entorno encharcado. Ponto cadastrado a montante de sua posição no primeiro cadastro.
NA-24B	263285	6577910	298	01/02/2014	13/06/2015	Nascente pontual de contato entre solo e rocha, coberta por vegetação arbórea densa. Solo no entorno encharcado. Ponto cadastrado a montante de sua posição no primeiro cadastro.
NA-25	262806	6577736	245	01/02/2014	15/06/2015	Nascente pontual que aflora em solo orgânico, coberta por vegetação arbórea. Solo no entorno bem úmido. Água de aspecto azulado cristalino.
NA-26	263033	6577728	272	01/02/2014	15/06/2015	Nascente pontual de contato entre solo orgânico e rocha, coberta por vegetação arbórea. Solo no entorno encharcado. Água de aspecto azulado cristalino.

**Tabela 7.3-** Dados cadastrais das nascentes inventariadas, modificado de Hidrovia (2015).

Nascentes	UTM E	UTM N	Cota (m)	Data 1*	Data 2 **	Descrição
NA-27	263319	6577316	284	31/01/2014	15/06/2015	Nascente pontual de solo areno argiloso orgânico, coberta por mata ciliar. Solo no entorno bem úmido. A montante, presença de rocha aflorante.
NA-28	262588	6577146	225	03/02/2014	15/06/2015	Nascente pontual de contato entre solo arenoso orgânico e rocha, coberta por mata ciliar arbustiva. Solo no entorno bem úmido.
NA-30	263105	6576908	264	03/02/2014	15/06/2015	Ponto seco.
NA-32	263490	6576523	282	31/01/2014	15/06/2015	Nascente pontual em solo orgânico, areno argiloso, coberto por vegetação arbórea. Solo no entorno encharcado. Foi usado recentemente para furo de sondagem. Obs.: Nascente com bom volume de água.
NA-33	263530	6576218	276	04/02/2014	15/06/2015	Nascente pontual de contato entre solo orgânico e rocha aflorante. Ao lado do talvegue, cascalho, seixos e blocos rolados, cobertos por vegetação densa. Água cristalina. Solo no entorno bem úmido.
NA-34	263526	6576345	289	04/02/2014	15/06/2015	Nascente difusa de contato entre solo orgânico e rocha. Local aberto, tipo pastagem, cercado por mata ciliar. Solo no entorno bem encharcado. Não foi possível medir a vazão.
NA-35	262763	6576218	257	03/02/2014	17/06/2015	Nascente pontual em talvegue de leito rochoso, com blocos rolados e coberta por mata ciliar. Água Cristalina
NA-36	263914	657644	301	-	16/06/2015	Nascente pontual de contato entre solo e rocha, coberta por vegetação arbustiva. Água de aspecto azulado cristalino. Obs. Ponto Novo.
NA-43	262487	6576231	226	-	17/06/2015	Nascente pontual em solo areno argiloso orgânico, coberta por mata ciliar. No local, houve um pequeno abatimento.
NA-45	262117	6574945	181	-	18/06/2015	Nascente pontual de contato entre solo orgânico e rocha, com vários blocos e matacões rolados, coberta por mata ciliar. Não foi possível medir a vazão.
NA-46	262262	6574541	154	-	18/06/2015	Nascente pontual em talvegue encaixado, que aflora em meio a blocos rolados, solo orgânico e coberta por mata ciliar.
NA-47	262254	6574285	168	-	18/06/2015	Nascente pontual de contato entre solo orgânico e rocha, talvegue encaixado e, ao longo do mesmo, leito rochoso, com blocos e seixos rolados.



**Tabela 7.3-** Dados cadastrais das nascentes inventariadas, modificado de Hidrovia (2015).

Nascentes	UTM E	UTM N	Cota (m)	Data 1*	Data 2 **	Descrição
NA-48	262307	6573864	159	-	18/06/2015	Nascente difusa formando brejo em solo orgânico, em área de pasto, pisoteada por gado. Não foi possível medir a vazão.
NA-49	262343	6574075	160	-	18/06/2015	Nascente pontual em fratura de rocha, em talvegue encaixado, com blocos, seixos e cascalhos rolados, coberta por mata ciliar.
NA-50	262600	6573929	191	-	18/06/2015	Nascente pontual de contato entre solo orgânico e rocha, em talvegue encaixado de leito rochoso, com blocos e seixos rolados, coberta por mata ciliar. Caracterizada por surgência e sumidouro Não foi possível medir a vazão, devido à pouca água.
NA-51	262595	6573718	185	-	18/06/2015	Nascente pontual de contato entre solo orgânico e rocha, coberta por vegetação arbustiva, cercada por pasto. Nascente com bom volume de água, porém devido às condições do ambiente, não foi possível medir a vazão.
NA-53	262368	6576716	217	03/02/2014	17/06/2015	Nascente difusa em planície brejada em área de pastagem. No ponto amostrado existe um açude. Não foi possível medir a vazão.
NA-54	262523	6576239	227	03/02/2014	17/06/2015	Nascente difusa de contato entre solo areno argiloso e rocha, coberta por mata ciliar. No afloramento foi construída uma cacimba. Apresenta um bom volume de água, e devido às condições do ambiente, não foi possível medir a vazão. Água de aspecto azulado cristalino
NA-55	262144	6576314	209	-	17/06/2015	Nascente difusa, em área brejada em área de pasto. Assim, não foi possível medir vazão e realizar a leitura de parâmetros.
NA-56	262604	6575840	248	04/02/2014	17/06/2015	Nascente pontual em solo orgânico, coberta por mata ciliar, pouca densa. Nasce em alto de morro, em leito atípico de nascente perene. Bom volume de água
NA-57	262193	6575949	208	04/02/2014	17/06/2015	Nascente pontual de contato entre solo argilo arenoso orgânico e rocha alterada, coberta por mata arbustiva densa. Bom volume de água.
NA-58	262080	6575904	219	-	17/06/2015	Ponto seco
NA-59	262694	6575365	243	04/02/2014	17/06/2015	Nascente pontual de contato entre solo orgânico e rocha aflorante, coberta por vegetação densa Caracterizada por surgência e sumidouro

**Tabela 7.3-** Dados cadastrais das nascentes inventariadas, modificado de Hidrovia (2015).

Nascentes	UTM E	UTM N	Cota (m)	Data 1*	Data 2 **	Descrição
NA-60	261603	6574882	169	-	22/07/2015	Nascente pontual de contato solo orgânico e rocha, em talvegue encaixado emmeioa blocos rolados, com seixos e cascalhos. Coberta por mata ciliar arbustiva
NA-61	263050	6575717	283	30/01/2014	16/06/2015	Nascente difusa, formando brejo em solo orgânico, em área de pasto, pisoteada por gado. Obs.: bom volume de água
NA-62	263437	6575486	292	30/01/2014	16/06/2015	Nascente difusa em área brejada em meio à pastagem. Solo encharcado. Não foi possível medir a vazão. Obs.: Nascente apresenta um bom volume de água
NA-63	261522	6574962	179	-	22/07/2015	Nascente pontual que aflora acima do maciço de arenito, formando uma pequena queda d'água. Talvegue bem encaixado com blocos rolados, seixos e cascalhos, coberta por mata ciliar arbustiva
NA-64	261398	6574960	182	-	22/07/2015	Nascente pontual que aflora em fratura de rocha, em topo de morro, cercada por vegetação arbustiva
NA-65	261371	6574842	145	-	22/07/2015	Nascente pontual de contato solo orgânico e rocha, cercada por vegetação arbustiva
NA-66	261321	6574820	139	-	22/07/2015	Nascente pontual de contato solo orgânico e rocha, coberta por mata ciliar densa. Não foi possível mediar a vazão
NA-67	261764	6573786	159	-	23/07/2015	Nascente difusa em solo orgânico, que aflora em meio a pastagem, cercada por pequenos arbustos. Não foi possível media a vazão
NA-68	261804	6573778	162	-	23/07/2015	Nascente difusa em solo orgânico em meio a pastagem. No local onde aflora, foi feito uma pequena barragem. Não foi possível mediar a vazão. Apresenta um bom volume de água.
NA-69	262165	6573708	163	-	23/07/2015	Nascente difusa de contato solo orgânico e rocha, coberta por pequenos arbustos, cercada por pastagem
NA-70	262177	6573527	164	-	23/07/2015	Nascente difusa em solo orgânico em meio a pastagem, solo bastante encharcado
NA-71	262330	6573453	177	-	23/07/2015	Nascente pontual de contato solo orgânico areno argiloso e rocha, em cabeceira de morro, coberta por vegetação arbustiva

**Tabela 7.3-** Dados cadastrais das nascentes inventariadas, modificado de Hidrovia (2015).

Nascentes	UTM E	UTM N	Cota (m)	Data 1*	Data 2 **	Descrição
NA-72	262403	6573404	180	-	23/07/2015	Nascente pontual de contato solo orgânico areno argiloso e rocha alterada (conglomerado), no entorno bastante cascalho e coberta por vegetação arbórea. Caracteriza-se por surgência e sumidouro
NA-73	262348	6573306	160	-	23/07/2015	Nascente pontual de contato solo orgânico arenoso e rocha, coberta por vegetação arbustiva. Caracteriza-se por surgência e sumidouro. Não foi possível medir a vazão
NA-74	262333	6573308	157	-	23/07/2015	Nascente pontual de contato solo orgânico areno argiloso e rocha, coberta por vegetação
NA-75	262342	6573295	156	-	23/07/2015	Nascente pontual de contato solo orgânico areno argiloso, coberta por vegetação densa
NA-76	262404	6573159	161	-	23/07/2015	Nascente pontual em solo orgânico areno argiloso, coberta por vegetação arbórea
NA-77	262479	6572782	139	-	23/07/2015	Nascente difusa em solo orgânico em meio a pastagem. Não foi possível medir a vazão
NA-78	263700	6577952	326	05/02/2014	13/06/2015	Nascente pontual de contato entre solo orgânico e rocha aflorante, coberta por vegetação densa. Solo no entorno encharcado
NA-79	263889	6577559	295	04/02/2014	13/06/2015	Nascente pontual de contato entre solo orgânico e rocha alterada, coberta por vegetação densa. Solo no entorno bem úmido. Água de aspecto azulado cristalino.
NA-80	262494	6572816	137	-	23/07/2015	Nascente difusa em solo orgânico em meio a pastagem. Não foi possível medir a vazão
NA-81	263761	6577652	316	04/02/2014	13/06/2015	Nascente pontual de contato entre solo orgânico e rocha aflorante, coberta por vegetação densa. Solo no entorno úmido
NA-82	262616	6572997	146	-	23/07/2015	Nascente difusa em área brejada, em solo orgânico arenoso em meio a pastagem, cercada por resto de vegetação arbustiva. Não foi possível medir a vazão
NA-83	262570	6573208	167	-	23/07/2015	Nascente pontual de contato solo orgânico arenoso e arenito alterada, cercada por vegetação arbustiva

**Tabela 7.3-** Dados cadastrais das nascentes inventariadas, modificado de Hidrovia (2015).

Nascentes	UTM E	UTM N	Cota (m)	Data 1*	Data 2 **	Descrição
NA-84	264372	6576994	233	07/02/2014	16/06/2015	Nascente pontual em fratura de rocha, coberta por mata ciliar rala, cercada por pasto. Água de aspecto azulado cristalina
NA-85	264133	6576577	265	07/02/2014	16/05/2015	Nascente pontual de contato entre solo e rocha com presença de blocos rolados, coberta por mata ciliar arbustiva. Solo no entorno bem úmido. Água de aspecto azulado cristalina
NA-87	264148	6576307	269	07/02/2014	16/06/2015	Nascente pontual em fratura de rocha, coberta por vegetação arbustiva
NA-93	263814	6576380	324	-	16/06/2015	Ponto não encontrado ou seco
NA-94	263791	6576304	308	06/02/2014	16/06/2015	Ponto não encontrado ou seco
NA-95	263775	6576079	300	06/02/2014	16/06/2015	Nascente pontual de contato entre solo e blocos abatidos de arenito conglomerático, coberto por pequeno arbustos em meio a pasto. Bom volume de água
NA-100	263542	6575783	299	05/02/2014	16/06/2015	Nascente pontual de contato entre rocha e solo orgânico, coberta por mata ciliar arbustiva, cercada por pasto, próximo à estrada
NA-101	263838	6575430	278	05/02/2014	16/06/2015	Nascente pontual de contato entre rocha e solo orgânico. A rocha é um saprólito de conglomerado com matriz arenosa
NA-102	263809	6575478	280	-	16/06/2015	Nascente pontual de contato entre rocha (arenito conglomerático) e solo orgânico, em mata ciliar arbustiva
NA-114	263879	6575268	268	06/02/2014	16/06/2015	Nascente pontual de contato entre solo e rocha em talvegue bastante encaixado, encosta íngreme, coberta por mata ciliar arbustiva
NA-116	263611	6575386	298	05/02/2014	16/06/2015	Nascente difusa formando brejo em solo orgânico, cercada por pasto e pisoteada por gado. Não foi possível medir a vazão. Localiza-se próximo à estrada
NA-118	263908	6574934	162	06/02/2014	18/06/2015	Nascente pontual em fratura de rocha, em talvegue encaixado, caracterizada por surgência e sumidouro, coberta por mata ciliar Água de aspecto azulado cristalino.

**Tabela 7.3-** Dados cadastrais das nascentes inventariadas, modificado de Hidrovia (2015).

Nascentes	UTM E	UTM N	Cota (m)	Data 1*	Data 2 **	Descrição
NA-119	263490	6575060	239	05/02/2014	18/06/2015	Nascente pontual de contato entre solo e rocha, em talvegue encaixado com blocos rolados, coberta por mata ciliar densa.
NA-120	263550	6574952	219	-	18/06/2015	Ponto seco
NA-A	263568	6574812	227	05/02/2014	18/06/2015	Nascente pontual de contato entre solo orgânico e rocha aflorante, coberta por vegetação densa
P-08	263128	6574862	251	-	18/06/2015	Nascente pontual de contato entre solo e rocha, coberta por vegetação arbórea
NA-22	-	-	-	01/02/2014	-	-
P5	263546	6577227	307	29/01/2014	15/06/2015	Nascente difusa em área brejada, em solo areno argiloso orgânico. Local aberto, cercado por vegetação arbustiva. Não foi possível medir a vazão. Obs.: Drenagem apresenta um bom volume de água

