



**MODELO HIDROGEOLÓGICO CONCEITUAL E NUMÉRICO**  
**RELATÓRIO TÉCNICO EIA**

---

PÁGINA



1/92

REV.

1



TE: TIPO	A - PRELIMINAR	C - PARA CONHECIMENTO	E - PARA CONSTRUÇÃO	G - CONFORME CONSTRUÍDO
EMIÇÃO	B - PARA APROVAÇÃO	D - PARA COTAÇÃO	F - CONFORME COMPRADO	H - CANCELADO

[illegible]

		<b>ELABORAÇÃO DE ESTUDO HIDROGEOLÓGICO NOS PLATÔS DE N1/N2 EM CARAJÁS</b>	
<b>MODELO HIDROGEOLÓGICO CONCEITUAL E NUMÉRICO</b>  <b>RELATÓRIO TÉCNICO EIA</b>		Nº VALE -	PÁGINA <b>2/92</b>
		Nº CONTRATADA -	REV. <b>1</b>

## ÍNDICE

<u>ITEM</u>	<u>DESCRIÇÃO</u>	<u>PÁGINA</u>
<b>1.0</b>	<b>INTRODUÇÃO.....</b>	<b>3</b>
<b>2.0</b>	<b>CARACTERIZAÇÃO DOS DADOS UTILIZADOS .....</b>	<b>6</b>
2.1	DADOS GEOLÓGICOS.....	6
2.1.1	Base geológica regional .....	6
2.1.2	Modelo geológico tridimensional.....	8
2.2	DADOS HIDROGEOLÓGICOS.....	14
2.2.1	Unidades hidrogeológicas .....	14
2.2.2	Cadastro de nascentes .....	17
2.2.3	Monitoramento hídrico .....	17
2.2.3.1	Pluviometria .....	17
2.2.3.2	Piezômetros .....	22
2.2.3.3	Réguas linimétricas .....	26
2.2.4	Ensaios de infiltração em canga.....	29
2.2.5	Ensaios de infiltração por perda d'água em piezômetros e furos de sondagem.....	34
2.3	BASE TOPOGRÁFICA, HIDROGRÁFICA E IMAGENS DE ALTA RESOLUÇÃO .....	42
<b>3.0</b>	<b>MODELO HIDROGEOLÓGICO CONCEITUAL .....</b>	<b>45</b>
3.1	DINÂMICA DE CIRCULAÇÃO E INTERAÇÃO HÍDRICA .....	45
<b>4.0</b>	<b>MODELO HIDROGEOLÓGICO NUMÉRICO .....</b>	<b>51</b>
4.1	ESCOLHA DO APLICATIVO .....	51
4.2	CONSTRUÇÃO DO MODELO .....	52
4.2.1	Domínio do modelo e geração da malha .....	52
4.2.2	Geometria 3D do Modelo e Propriedades Hidráulicas .....	55
4.2.3	Condições de Contorno.....	55
4.2.3.1	Recarga Direta .....	56
4.2.3.2	Cursos de água e descargas.....	56
4.3	CALIBRAÇÃO DO MODELO .....	60
4.3.1	Resultados de calibração.....	60
4.3.2	Análise de sensibilidade .....	68
4.3.3	Resultados de calibração de vazões e balanço de massa.....	69
4.4	ANÁLISE DE INCERTEZAS .....	70
<b>5.0</b>	<b>SIMULAÇÃO E AVALIAÇÃO DE CENÁRIOS FUTUROS.....</b>	<b>74</b>
5.1	PREVISÃO DE VAZÕES DE DESAGUAMENTO .....	78
5.2	IMPACTOS EM NASCENTES E CURSOS DE ÁGUA .....	79
<b>6.0</b>	<b>CONCLUSÕES.....</b>	<b>84</b>
<b>7.0</b>	<b>EQUIPE TÉCNICA .....</b>	<b>86</b>
<b>8.0</b>	<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	<b>87</b>

		<b>ELABORAÇÃO DE ESTUDO HIDROGEOLÓGICO NOS PLATÔS DE N1/N2 EM CARAJÁS</b>	
<b>MODELO HIDROGEOLÓGICO CONCEITUAL E NUMÉRICO</b>  <b>RELATÓRIO TÉCNICO EIA</b>		Nº VALE -	PÁGINA <b>3/92</b>
		Nº CONTRATADA -	REV. <b>1</b>

## 1.0 INTRODUÇÃO



Neste documento é apresentado o relatório de concepção de modelo hidrogeológico conceitual e construção de modelo numérico relacionado à porção dos platôs N1 e N2 na região de Serra Norte, em Carajás, Pará. Este relatório é parte integrante dos estudos para subsidiar o projeto de extração de minério de ferro nestes platôs, referindo-se à Ordem de Serviço 01/2017, contratada pela DIPF, por meio da DIAM, junto à empresa HIDROVIA Hidrogeologia e Meio Ambiente Ltda. no âmbito do contrato guarda-chuva Nº 5900002815 (2359544).

Em referência ao tema Hidrogeologia, o escopo geral dos serviços foi definido pela VALE para atender tanto às necessidades da engenharia de projeto, em relação ao refinamento das disponibilidades hídricas subterrâneas e planejamento de sistemas de adução de água, quanto às exigências dos estudos para o licenciamento ambiental (EIA - Estudo de Impacto Ambiental), no que concerne às fases de diagnóstico, prognóstico e avaliação de impactos sobre as disponibilidades hídricas subterrâneas. Tal escopo inclui toda a abrangência dos itens a seguir:

- Inventário de nascentes no entorno dos platôs de N1 e N2.
- Determinação de parâmetros hidrodinâmicos do aquífero Carajás em piezômetros na área dos platôs N1 e N2.
- Modelo hidrogeológico conceitual regional para área de abrangência da ADA.
- Modelos hidrogeológicos conceituais, um para cada área de platô de N1 e N2.
- Modelos numéricos de fluxo subterrâneo, um para cada área de platô de N1 e N2.
- Definição das alternativas de fonte de água para o Projeto N1/N2.

De maneira mais específica, estes itens se desdobram e fundamentam atividades voltadas para o atendimento das necessidades de projeto e de licenciamento, quais sejam:

- Inventário de nascentes no entorno dos platôs de N1 e N2.
- Determinação de parâmetros hidrodinâmicos do aquífero Carajás na área dos platôs N1 e N2.
- Avaliação das condições de circulação das águas na zona não saturada do aquífero Carajás (canga) nos platôs de N1 e N2.
- Elaboração de 02 (dois) modelos hidrogeológicos conceituais (platôs N1 e N2).
- Elaboração de 02 (dois) modelos numéricos de fluxo subterrâneo (platôs N1 e N2).
- Locação e preparação de documentação de pedido de perfuração de poços tubulares de pesquisa hidrogeológica nas áreas dos platôs N1 e N2.
- Sumário Executivo das fontes de água do Projeto N1/N2.

		<b>ELABORAÇÃO DE ESTUDO HIDROGEOLÓGICO NOS PLATÔS DE N1/N2 EM CARAJÁS</b>	
<b>MODELO HIDROGEOLÓGICO CONCEITUAL E NUMÉRICO</b>  <b>RELATÓRIO TÉCNICO EIA</b>		Nº VALE -	PÁGINA <b>4/92</b>
		Nº CONTRATADA -	REV. <b>1</b>

- Relatório técnico do Modelo Hidrogeológico Conceitual Regional para área de abrangência da ADA.

No escopo acima é notória e intencional a separação entre produtos para os platôs N1 e N2, haja vista a possibilidade de o licenciamento destes platôs seguirem em ritmos diferentes. Contudo, dada a proximidade entre ambos (menos de 2 km de separação) e as características hidrogeológicas observadas em campo com a evolução dos estudos, sugere-se aqui o tratamento conjunto das informações geradas com o intuito de compor um cenário hidrodinâmico único e interativo, de maneira que este possa descrever as características necessárias para atendimento dos objetivos citados, preservando a integridade da ADA definida de forma compartilhada para tal.



Neste caso, a intenção é reunir as informações pertinentes, advindas de fontes primárias e secundárias, para compor uma visão integrada sobre a dinâmica de recarga, circulação e descarga do sistema hidrogeológico local, permitindo a construção e calibração de modelo numérico de fluxo das águas subterrâneas. Modelo este que vai culminar, ao final do estudo, com a avaliação preditiva de cenários hidrodinâmicos sobre a possibilidade de impactos nas disponibilidades hídricas locais, considerando o cenário calibrado comparativamente àqueles cenários finais de lavra planejados para o licenciamento do projeto.

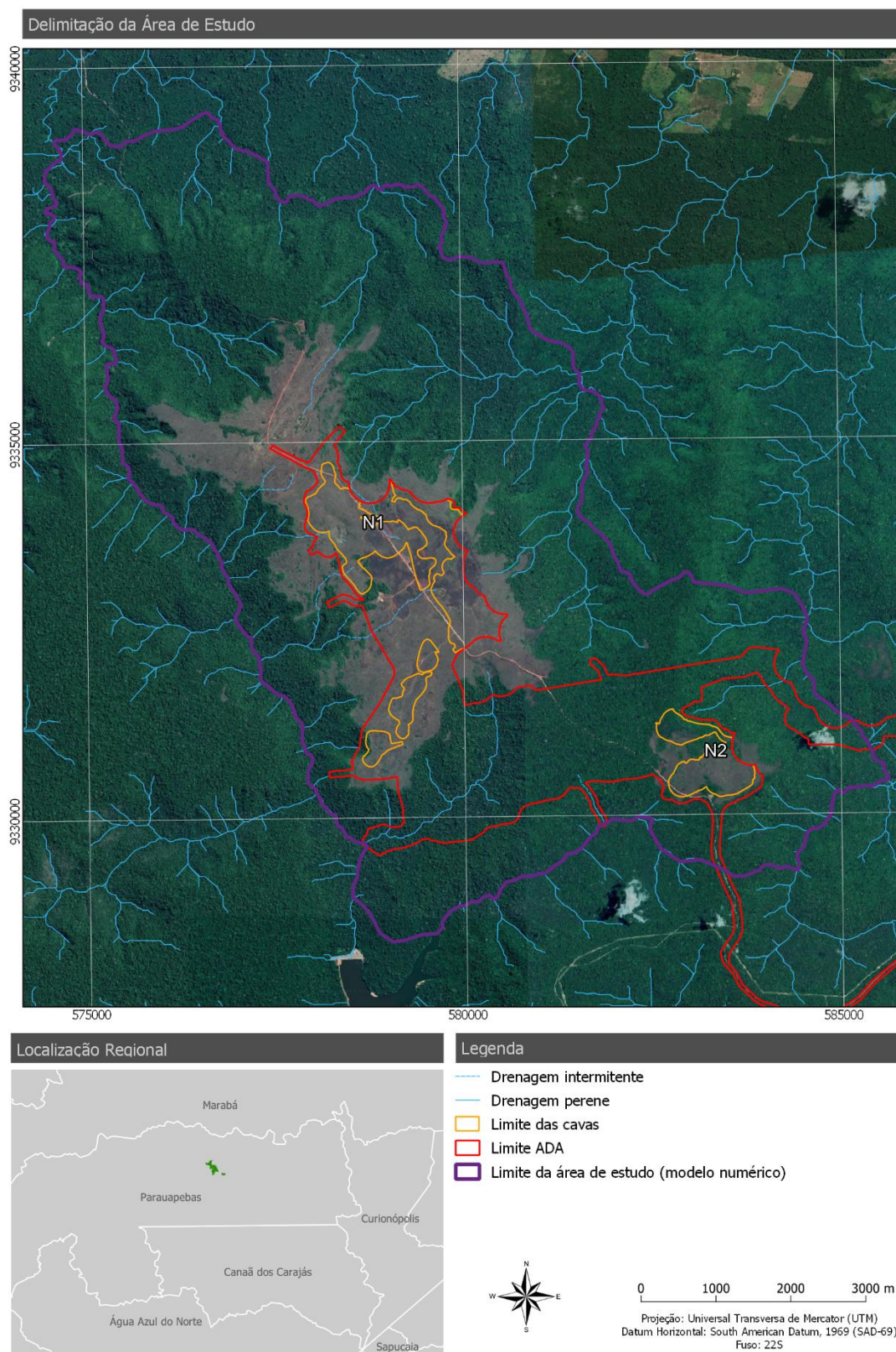
Com base nisso, indica-se como domínio para subsidiar as atividades de escopo de hidrogeologia aquele que incorpora as imediações das futuras cavas de N1 e N2, situadas em parte das bacias dos igarapés Azul e Mombaca, abrangendo área de aproximadamente 60 km<sup>2</sup> (Figura 1.1). Na zona interior desta área, ressalta-se a existência de cadastro de nascentes e histórico de monitoramento de níveis de água subterrânea, associados ao conhecimento tridimensional das unidades geológicas e do contexto tectônico que permitem tecer considerações sobre o comportamento hidrodinâmico atual, ou seja, anterior à operação do empreendimento.

Na referida Figura 1.1 estão apresentados os limites físicos e hidráulicos escolhidos como balizadores para a concepção dos estudos pretendidos. Em termos de limites físicos, foram adotados talwegues de drenagem e contatos geológicos entre unidades com diferentes potenciais hidrogeológicos. Já os limites hidráulicos consistiram em divisores de água, ou de bacias, marcados com base na variação topográfica e desenho da malha de drenagem expressos com base em modelo digital de terreno produzido em escala 1:10.000. Tais limites incorporam os seguintes aspectos hidrogeológicos: i) o tipo e a geometria das unidades hidrogeológicas; ii) as condições e as formas de circulação hídrica subterrânea; iii) o tipo e o comportamento da dinâmica de fluxo hídrico; e, iv) os processos de recarga e descarga dos sistemas aquíferos locais.



Além de ser suficiente para subsidiar a caracterização dos aspectos hidrogeológicos afetos ao desaguamento das cavas de N1 e N2, esta área abrange também praticamente todo o contorno da ADA definida para o licenciamento do empreendimento, permitindo a visualização de um contexto mais amplo de circulação hídrica que possa ser relevante para a avaliação de impactos futuros.



		<b>ELABORAÇÃO DE ESTUDO HIDROGEOLÓGICO NOS PLATÔS DE N1/N2 EM CARAJÁS</b>	
<b>MODELO HIDROGEOLÓGICO CONCEITUAL E NUMÉRICO</b>  <b>RELATÓRIO TÉCNICO EIA</b>		Nº VALE -	PÁGINA <b>5/92</b>
		Nº CONTRATADA -	REV. <b>1</b>



**Figura 1.1 – Área de estudo adotada para o desenvolvimento do tema hidrogeologia.**  
 Fonte: Criado a partir das informações disponibilizadas pela VALE.

		<b>ELABORAÇÃO DE ESTUDO HIDROGEOLÓGICO NOS PLATÔS DE N1/N2 EM CARAJÁS</b>	
<b>MODELO HIDROGEOLÓGICO CONCEITUAL E NUMÉRICO</b>  <b>RELATÓRIO TÉCNICO EIA</b>		Nº VALE -	PÁGINA <b>6/92</b>
		Nº CONTRATADA -	REV. <b>1</b>

## 2.0 CARACTERIZAÇÃO DOS DADOS UTILIZADOS

Os dados primários utilizados no desenvolvimento desse estudo foram disponibilizados pela VALE e coletados em campo em etapas anteriores a esta. Dentre estes citam-se arquivos diversos que incluíram informações sobre topografia, drenagem, geologia de superfície e de modelos de blocos, sequenciamento de lavra e monitoramento hidrométrico, bem como cadastro de nascentes, ensaios de permeabilidade em cangas e testes de aquíferos em piezômetros e furos de sondagem. Cumpre ressaltar que os dados de topografia e sequenciamento de lavra correspondem a levantamentos de detalhe produzidos pela VALE, cabendo pequenos ajustes e interpretações para adequação de escala e uso nos estudos de modelagem numérica. Além dos dados específicos da área, também foram consultadas diferentes fontes públicas para respaldar o contexto regional. Abaixo segue a caracterização das principais informações utilizadas no desenvolvimento deste estudo.

### 2.1 DADOS GEOLÓGICOS

#### 2.1.1 Base geológica regional

Os dados geológicos (unidades litológicas e geologia estrutural) são a base principal para o desenvolvimento dos estudos hidrogeológicos pretendidos, uma vez que as rochas constituem o meio por onde as águas subterrâneas circulam. Para a realização deste estudo, a base geológica regional foi compilada de mapeamentos específicos realizados por DOCEGEO (1988) e CPRM (JUSTO & LOPES, 2013).



- DOCEGEO. 1988. Revisão litoestratigráfica da Província Mineral de Carajás. In: SBG, Congresso Brasileiro de Geologia, 35. Belém, Anexo aos Anais. p.11-56.
- JUSTO, A. P. & LOPES, E. S. 2013. Carta geológica preliminar Folha SB.22-Z-A-II Serra dos Carajás. Escala 1:100.000. CPRM.

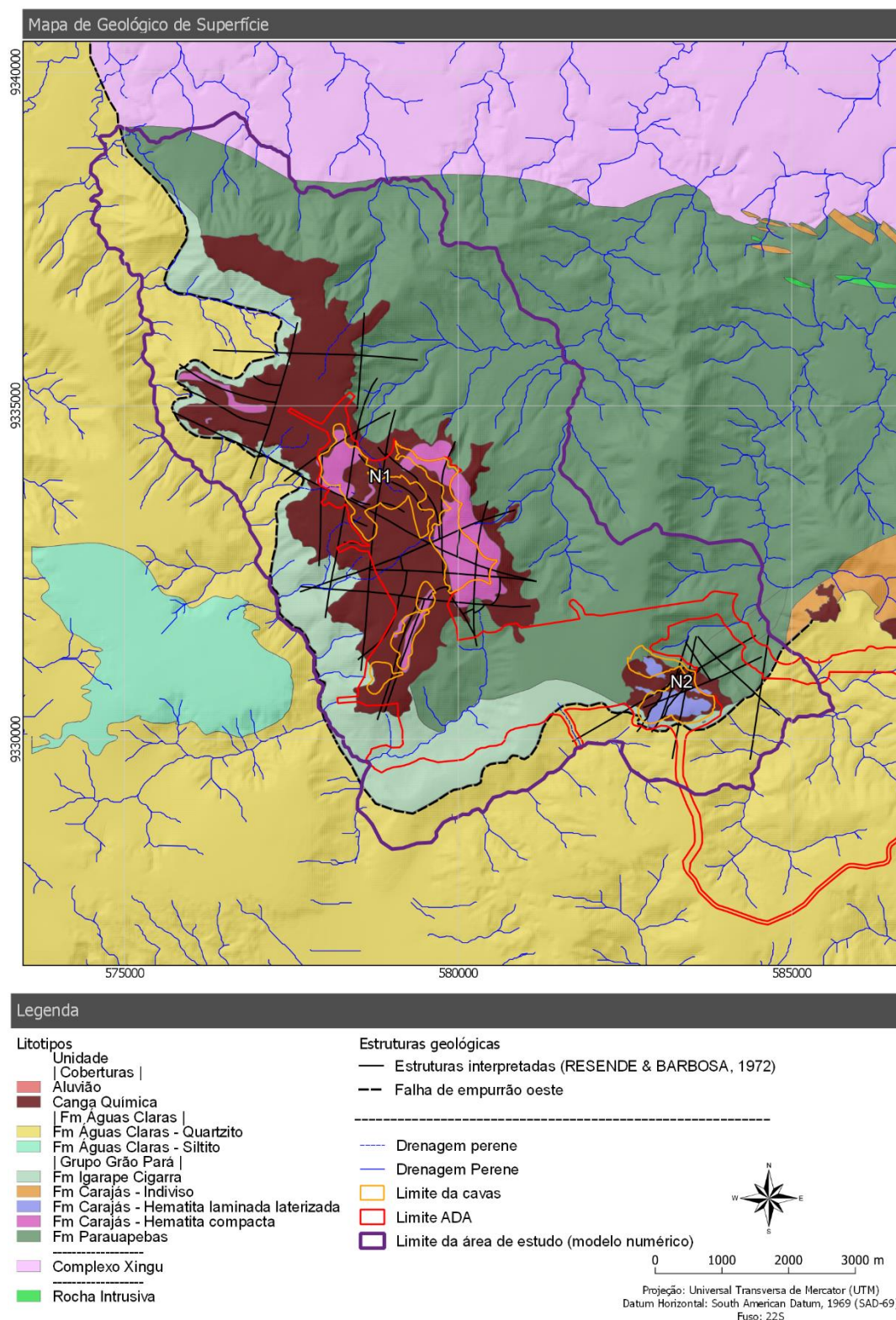
Em termos locais, foram disponibilizadas para as áreas dos platôs N1 e N2 bases geológicas preparadas pela equipe de exploração mineral da VALE. Para o platô N2, a base consiste em uma leitura das unidades de superfície oriunda da modelagem geológica de blocos revisada pela equipe de exploração mineral da VALE em 2017. No caso do platô N1, a base consiste de uma revisão de informações de contatos e estruturas geológicas baseada na evolução do conhecimento da VALE sobre a área a partir da base de detalhe apresentada por RESENDE & BARBOSA (1972), onde, além da geologia (escala 1:12.397), são mostradas as coberturas e as principais estruturas interpretadas.

- RESENDE, N. P. & BARBOSA, A. L. de M. 1972. Relatório de Pesquisa de Minério de Ferro, Distrito Ferrífero da Serra dos Carajás, Estado do Pará. Belém: AMZA, 1972. 248p.

Uma representação do contexto geológico e estrutural da área alvo dos estudos, conforme os autores supracitados, está apresentada na Figura 2.1.





		<b>ELABORAÇÃO DE ESTUDO HIDROGEOLÓGICO NOS PLATÔS DE N1/N2 EM CARAJÁS</b>	
<b>MODELO HIDROGEOLÓGICO CONCEITUAL E NUMÉRICO</b>  <b>RELATÓRIO TÉCNICO EIA</b>		Nº VALE -	PÁGINA <b>7/92</b>
		Nº CONTRATADA -	REV. <b>1</b>



**Figura 2.1** – Mapa geológico de superfície da área de estudo do projeto N1/N2.

Fonte: RESENDE & BARBOSA (1972); DOCEGEO (1988); JUSTO & LOPES (2013) e dados VALE (2017).

		<b>ELABORAÇÃO DE ESTUDO HIDROGEOLÓGICO NOS PLATÔS DE N1/N2 EM CARAJÁS</b>	
<b>MODELO HIDROGEOLÓGICO CONCEITUAL E NUMÉRICO</b>  <b>RELATÓRIO TÉCNICO EIA</b>		Nº VALE -	PÁGINA <b>8/92</b>
		Nº CONTRATADA -	REV. <b>1</b>

Na Figura 2.1 são identificadas rochas do Grupo Grão-Pará, sendo as máficas associadas às formações Parauapebas e Igarapé Cigarra e as unidades ferríferas pertencentes à Formação Carajás. Estas unidades são cortadas por diques máficos posteriores e recobertas por depósitos recentes (cangas, lateritas, colúvios e alúvios). Abaixo e acima dos litotipos do Grupo Grão-Pará ocorrem, respectivamente, gnaisses do embasamento cristalino (Complexo Xingu) e quartzitos e siltitos associados à Formação Águas Claras.

Voltando-se primária e sucintamente para o contexto geológico regional, reconhece-se que as unidades apresentadas no mapa da Figura 2.1 correspondem àquelas pertencentes à Província Mineral de Carajás, que constitui uma das mais bem estudadas regiões do Cráton Amazônico, hospedando importantes depósitos de Fe, Cu, Au, Mn e Sn.



O Domínio Carajás compreende dois grupos principais (Arqueano e Proterozoico), separados de acordo com suas características tectonoestratigráficas e geocronológicas (ARAÚJO *et al.*, 1991; PINHEIRO, 1997). A Assembleia de Embasamento, mais antiga (3,0-2,86 Ga), é formada por ortognaisses do Complexo Pium que foram originalmente intrudidos pelos granodioritos e migmatitos do Complexo Xingu; todas as rochas foram metamorfizadas na fácies anfibolito alto a granulito. Concomitante ao desenvolvimento do extenso Cinturão de Cisalhamento Itacaiúnas, foi formado um *trend* milonítico WNW-ESE, seguido por várias reativações. Sequências vulcanossedimentares supracrustais de mais baixo grau formam a assembleia de cobertura, na qual DOMINGOS (2009) inclui os grupos Grão-Pará, Igarapé Salobo e Igarapé Pojuca (2.7 Ga). A assembleia de cobertura é sobreposta pela sequência clástica marinha rasa e depósitos fluviais da Formação Águas Claras, de idade mínima de 2.65 Ga.

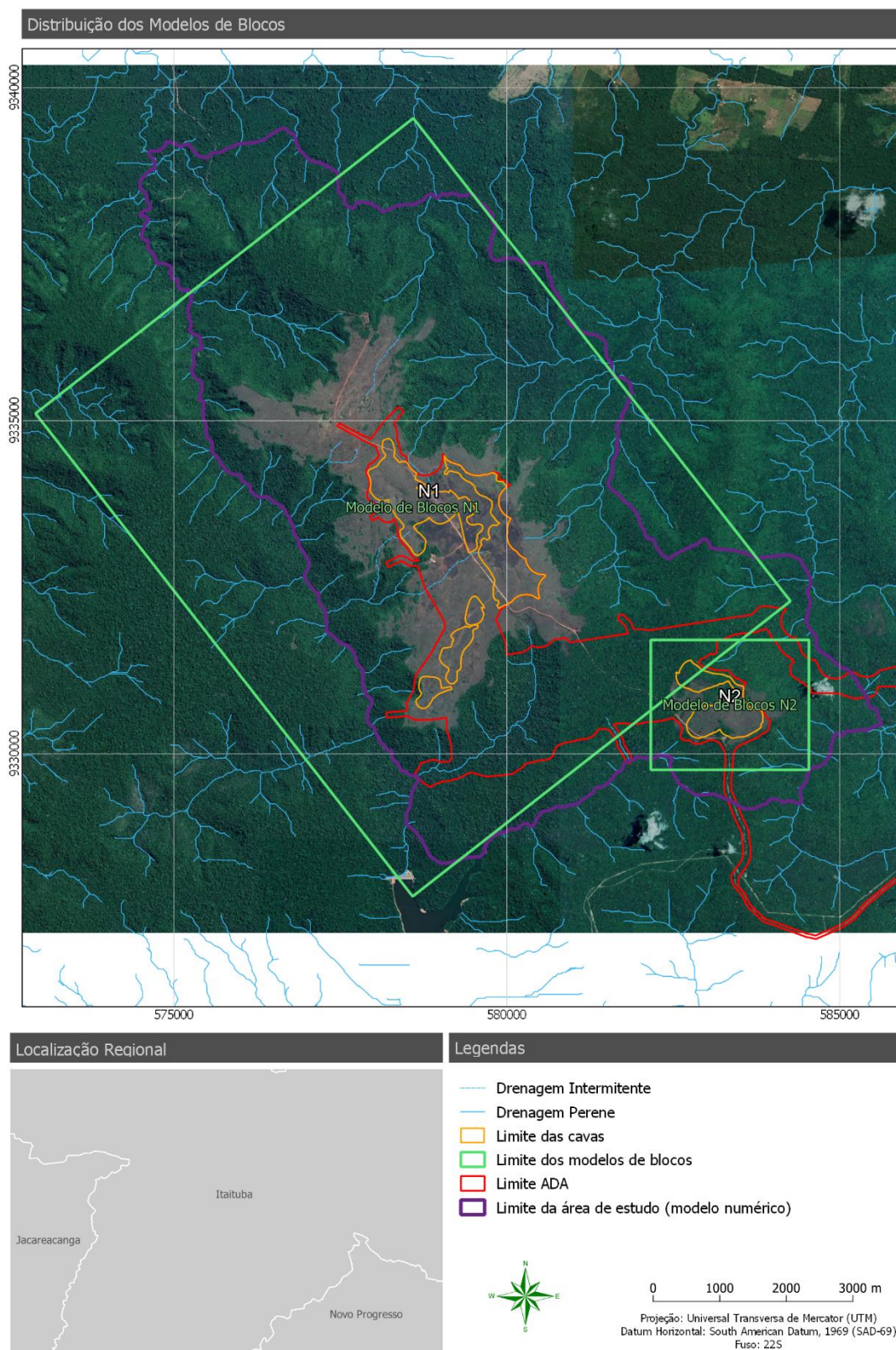
A Província Mineral de Carajás ainda é alvo de intenso debate que se reflete nas dezenas de colunas estratigráficas que foram e são propostas à medida que novos dados são obtidos. Nesse relatório, a disposição litoestratigráfica das unidades presentes na área de interesse está baseada em DOCEGEO (1988) e JUSTO & LOPES (2013). Como já mencionado acima, tais unidades, da base para o topo, correspondem às seguintes: Complexo Xingu, Supergrupo Itacaiúnas (Grupo Grão-Pará: Formações Parauapebas, Carajás e Igarapé Cigarra), Formação Águas Claras, Diques básicos e Coberturas recentes (cangas, lateritas, colúvios e alúvios). A afinidade hídrica destas rochas será traduzida pela definição de sistemas e unidades hidrogeológicas e pelo modelo físico conceitual da área.

### 2.1.2 Modelo geológico tridimensional

Além dos dados de mapeamento de superfície, foram também agregados dados de modelos geológicos de blocos desenvolvidos pela VALE para as áreas dos platôs N1 e N2 (arquivos: *sn1\_0216\_LP.csv* e *sn2\_0316.csv*), conforme ilustrado na Figura 2.2. A geologia destes modelos de blocos foi interpretada em função das sondagens realizadas e identificação dos diferentes litotipos e coberturas da Formação Carajás, unidade hospedeira do minério de ferro na região.





		<b>ELABORAÇÃO DE ESTUDO HIDROGEOLÓGICO NOS PLATÔS DE N1/N2 EM CARAJÁS</b>	
<b>MODELO HIDROGEOLÓGICO CONCEITUAL E NUMÉRICO</b>  <b>RELATÓRIO TÉCNICO EIA</b>		Nº VALE -	PÁGINA <b>9/92</b>
		Nº CONTRATADA -	REV. <b>1</b>



**Figura 2.2 – Modelos geológicos de blocos das áreas dos platôs N1 e N2.**

Fonte: Dados disponibilizados pela VALE.

		<b>ELABORAÇÃO DE ESTUDO HIDROGEOLÓGICO NOS PLATÔS DE N1/N2 EM CARAJÁS</b>	
<b>MODELO HIDROGEOLÓGICO CONCEITUAL E NUMÉRICO</b>  <b>RELATÓRIO TÉCNICO EIA</b>		Nº VALE -	PÁGINA <b>10/92</b>
		Nº CONTRATADA -	REV. <b>1</b>

A integração da geologia de superfície com o modelo de blocos, aproveitando essencialmente o conhecimento sobre a distribuição das formações ferríferas, levou à construção de seções geológicas usadas na geração de um modelo geológico tridimensional mais abrangente, desenvolvido utilizando a ferramenta computacional *Leapfrog*. A Figura 2.3 ilustra o conjunto de informações utilizadas na construção do modelo geológico 3D em *Leapfrog*.

A construção do modelo geológico consistiu em gerar as superfícies de contato entre as diversas unidades geológicas quando essas eram contínuas, e no caso das unidades provenientes da alteração da formação ferrífera, foram gerados sólidos tendo como limite as informações dos modelos de blocos. A partir destas geometrias iniciais, foi possível então gerar o modelo tridimensional, conforme mostra a imagem da Figura 2.4.

O desenvolvimento do modelo geológico nessa ferramenta permitiu a transferência da geometria dos corpos geológicos diretamente para o *FEFLOW*, *software* usado na construção modelo hidrogeológico de fluxo. A elaboração do modelo geológico é fundamental pois permite que se tenha a geometria completa dos corpos geológicos a partir de dados de mapas e perfis, além de permitir incorporar as informações dos modelos de blocos das respectivas áreas de futura lavra.

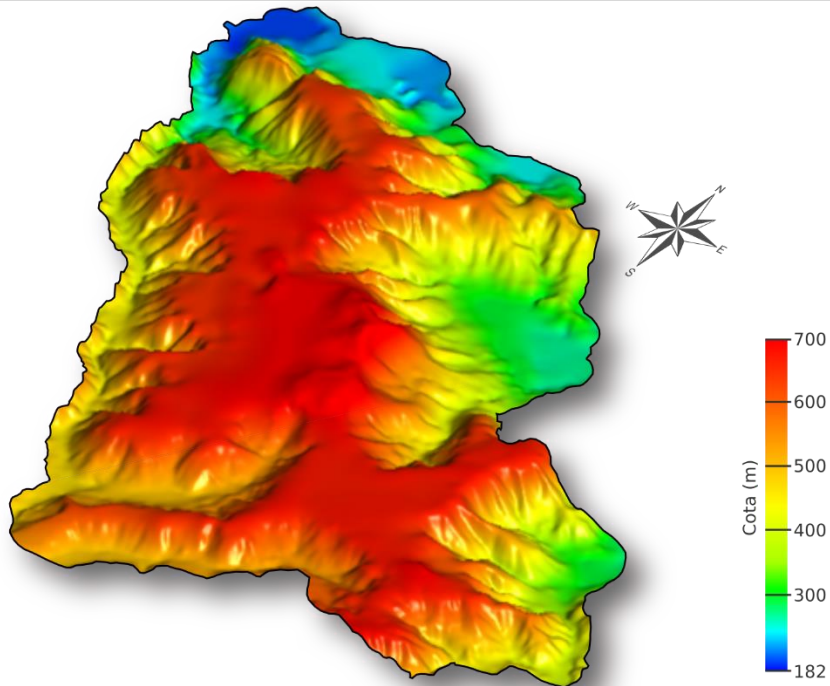
Como forma de verificação e confirmação da geometria do modelo geológico 3D *Leapfrog* com a malha do modelo *FEFLOW*, o passo seguinte consistiu na importação da malha gerada para subsidiar o modelo de fluxo, de forma que para cada elemento desta malha fosse transferida uma condutividade hidráulica relativa da respectiva unidade geológica. Dessa forma, o modelo numérico foi construído sem perda de informação da interpretação geológica.

A Figura 2.5 mostra a imagem da malha do modelo numérico inserida no aplicativo *Leapfrog*. As informações complementares e com maior detalhe sobre o modelo numérico serão apresentadas no item pertinente.

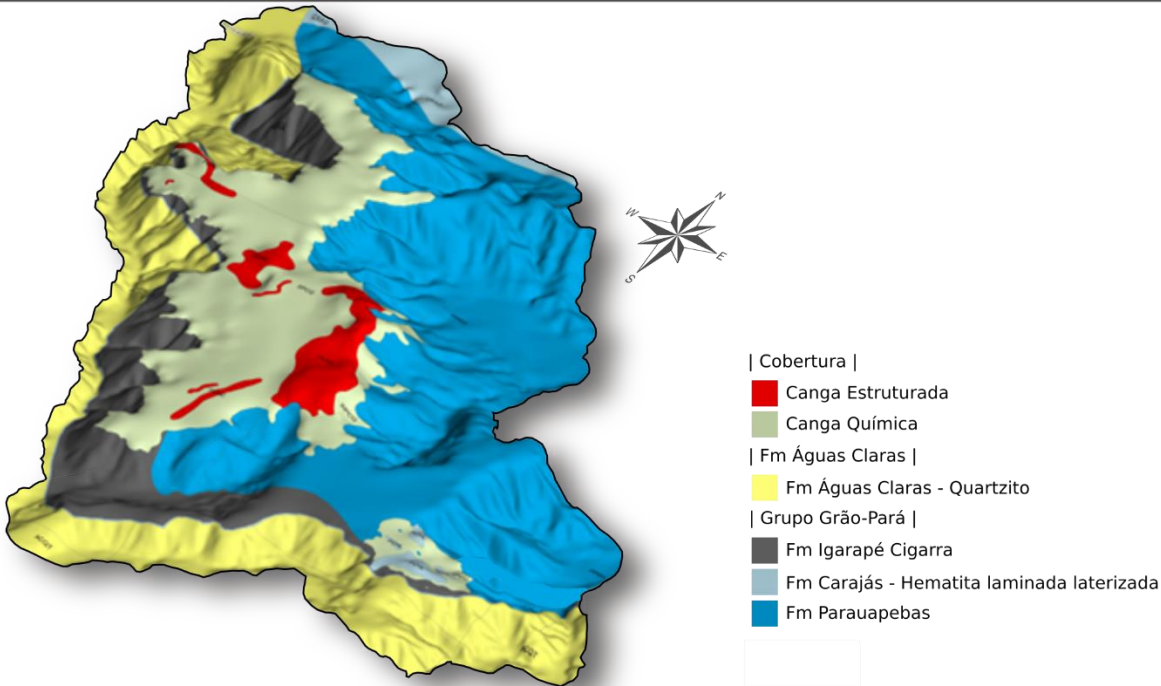


		ELABORAÇÃO DE ESTUDO HIDROGEOLÓGICO NOS PLATÔS DE N1/N2 EM CARAJÁS	
MODELO HIDROGEOLÓGICO CONCEITUAL E NUMÉRICO RELATÓRIO TÉCNICO EIA	Nº VALE	-	PÁGINA 11/92
	Nº CONTRATADA	-	REV. 1

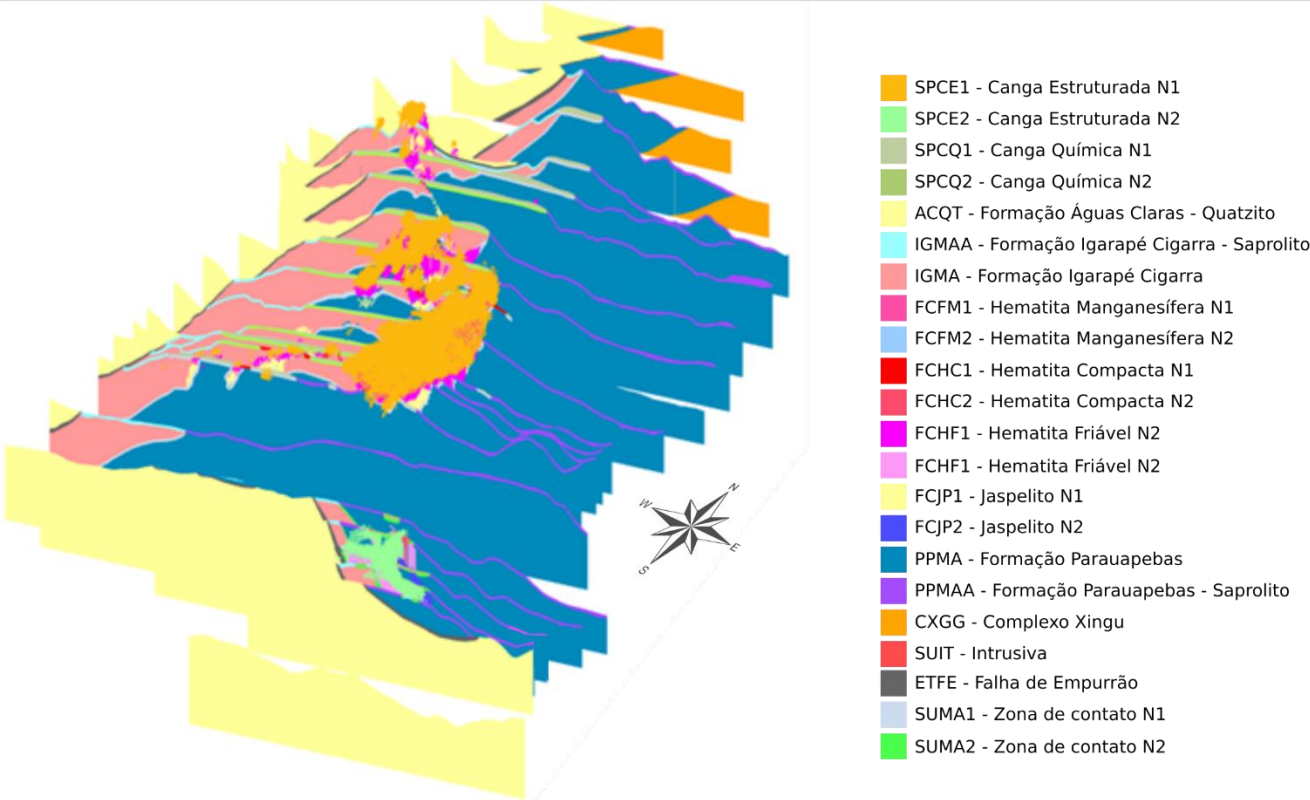
A - Vista 3D do Modelo Digital do Terreno



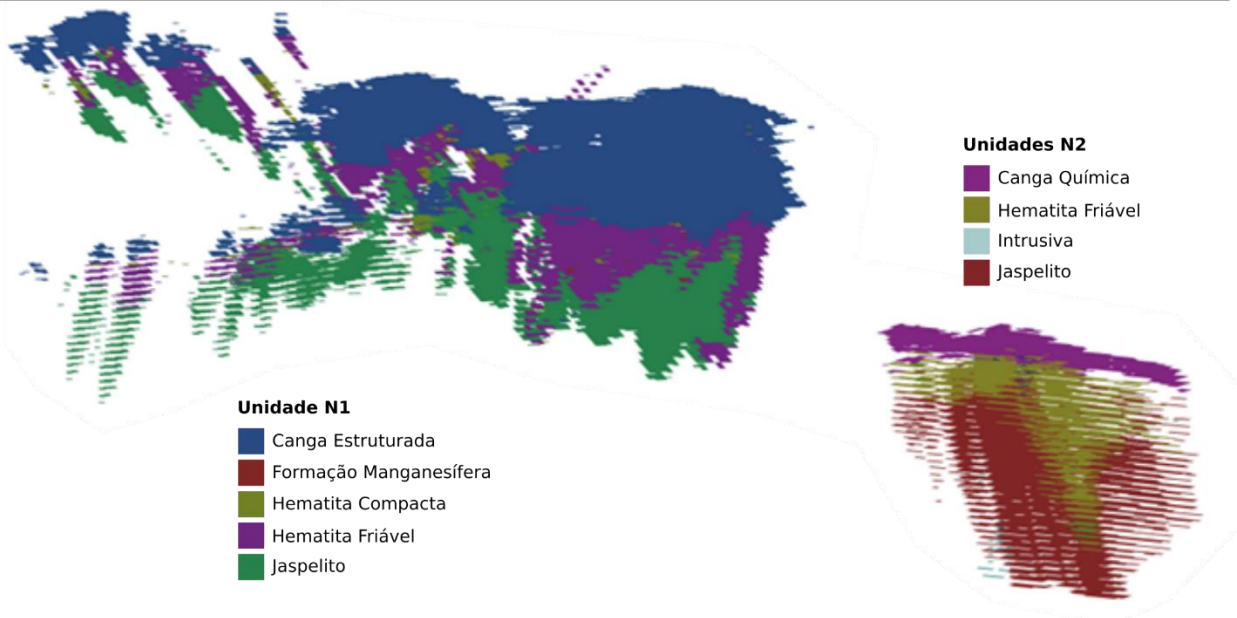
B - Vista 3D da Geologia de Superfície





C - Vista 3D das Seções Geológicas



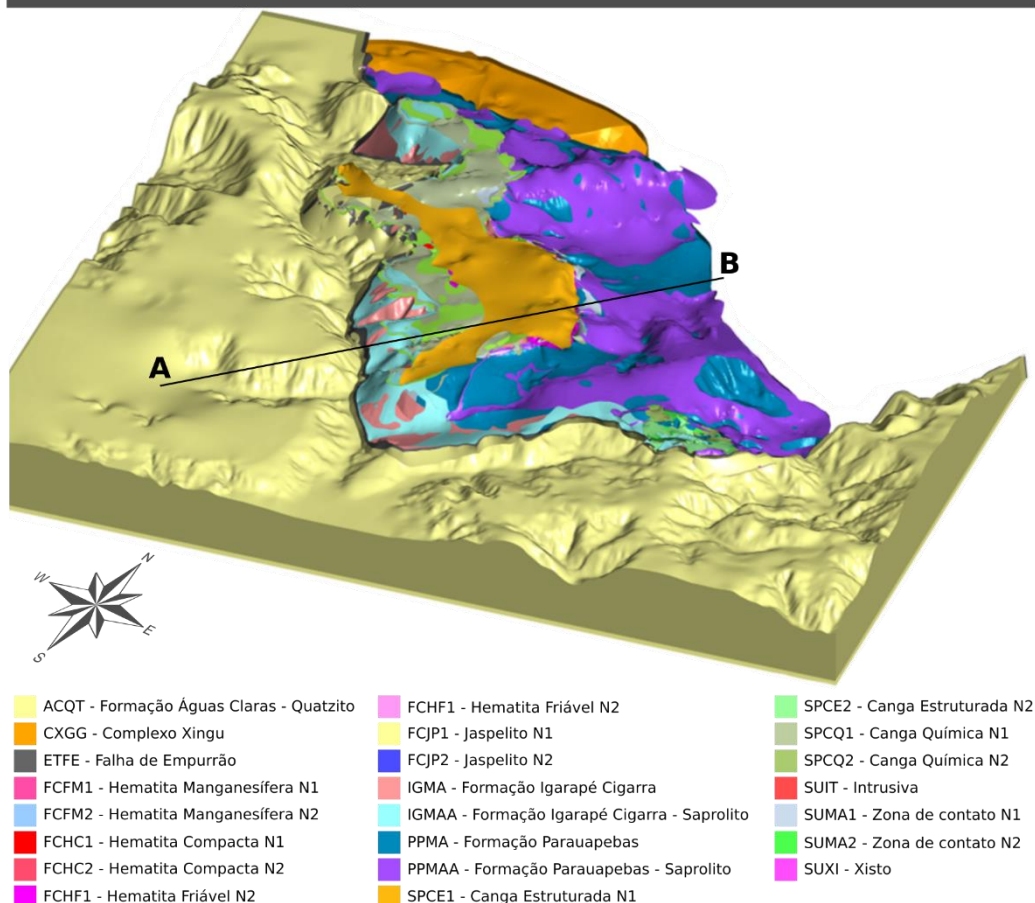
D - Vista 3D das Formações Ferríferas do Modelo de Blocos Vale



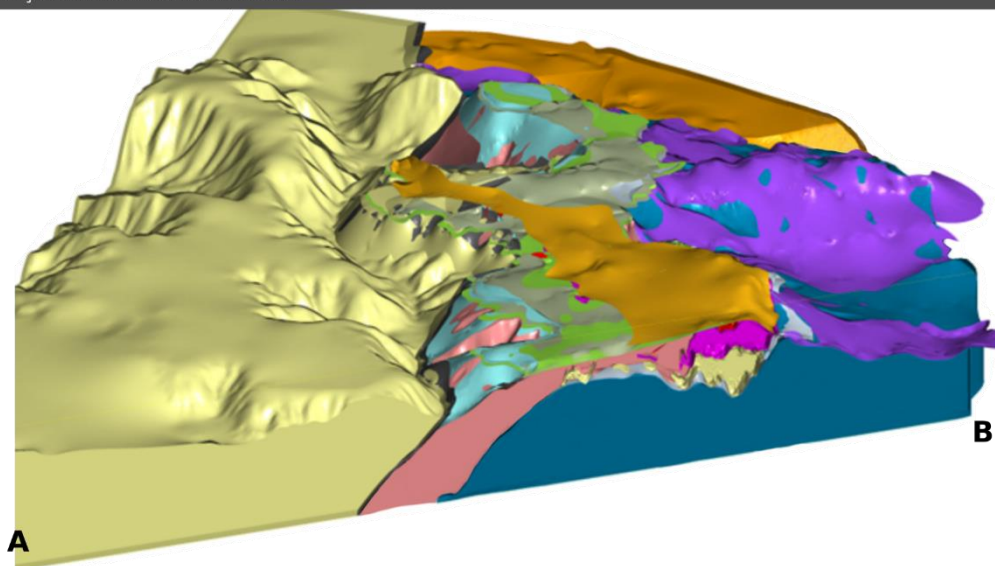
**Figura 2.3** – Dados utilizados para a construção do modelo geológico 3D em *Leapfrog*. (a) Imagens mostrando o modelo digital de terreno; (b) o mapa geológico de superfície; (c) seções geológicas; e (d) formações ferríferas no modelo de blocos VALE.  
Nota: Imagens do aplicativo *Leapfrog*.

		<b>ELABORAÇÃO DE ESTUDO HIDROGEOLÓGICO NOS PLATÔS DE N1/N2 EM CARAJÁS</b>	
<b>MODELO HIDROGEOLÓGICO CONCEITUAL E NUMÉRICO</b>  <b>RELATÓRIO TÉCNICO EIA</b>		Nº VALE -	PÁGINA <b>12/92</b>
		Nº CONTRATADA -	REV. <b>1</b>

Vista 3D do Modelo de Blocos





Seção A-B do Modelo de Blocos



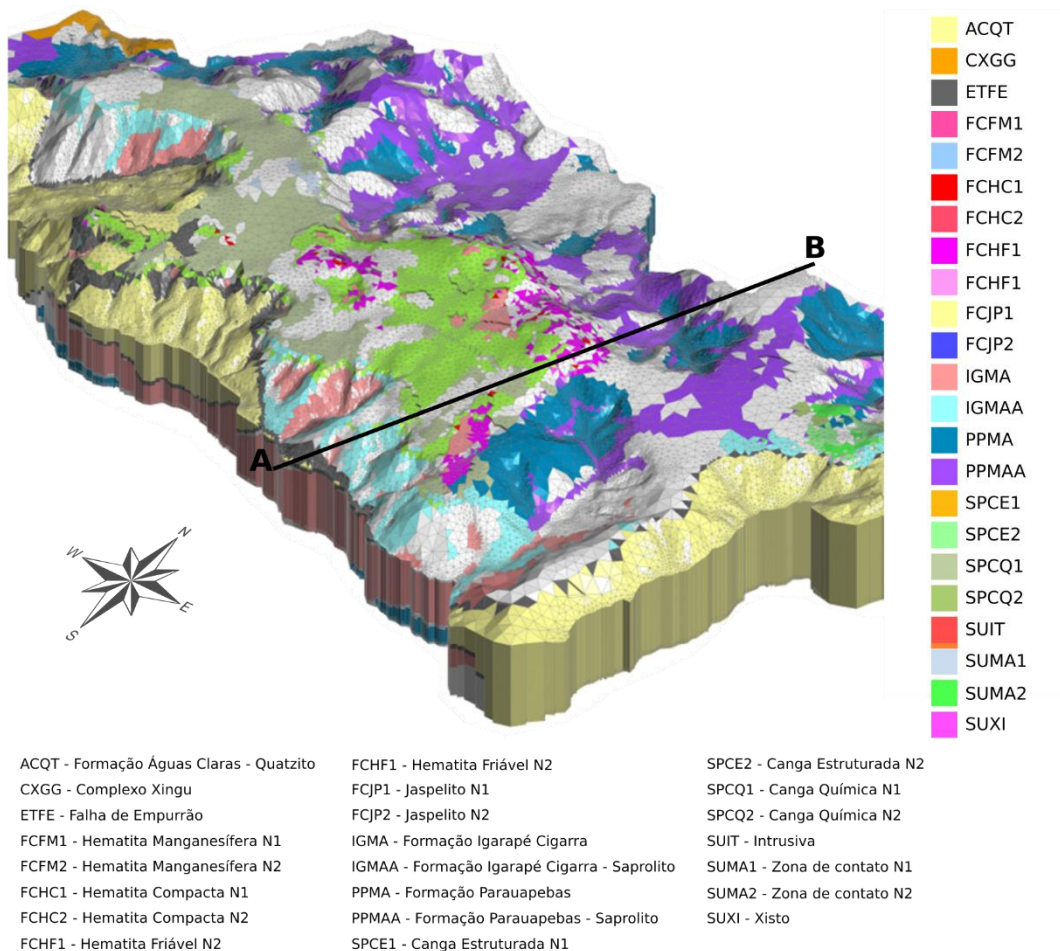
**Figura 2.4** – Imagem do modelo geológico tridimensional, com uma seção A-B passando pelo meio do modelo.

Nota: Imagens do aplicativo *Leapfrog*.

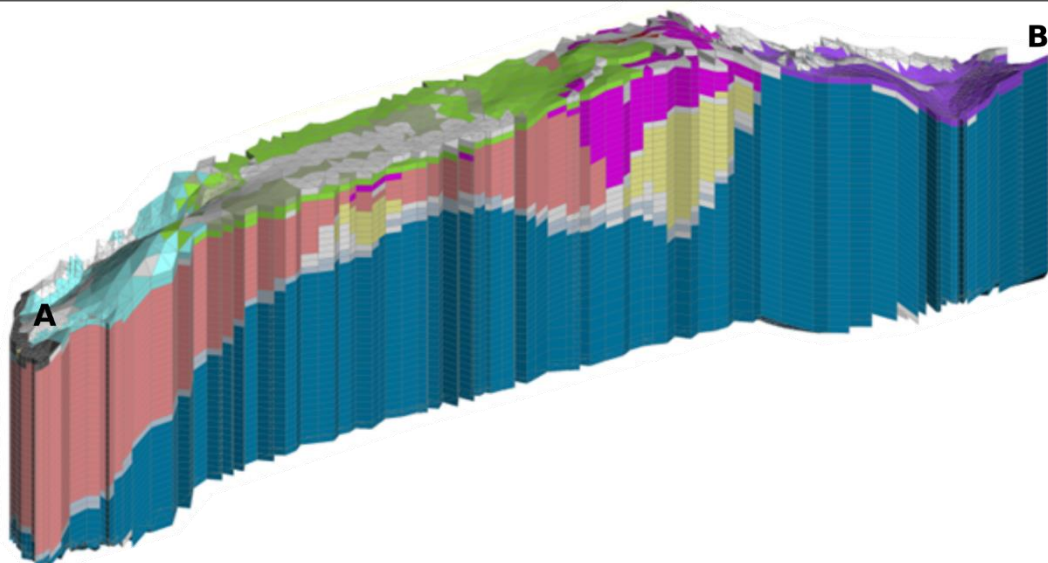


		<b>ELABORAÇÃO DE ESTUDO HIDROGEOLÓGICO NOS PLATÔS DE N1/N2 EM CARAJÁS</b>	
<b>MODELO HIDROGEOLÓGICO CONCEITUAL E NUMÉRICO</b>  <b>RELATÓRIO TÉCNICO EIA</b>		Nº VALE -	PÁGINA <b>13/92</b>
		Nº CONTRATADA -	REV. <b>1</b>



Vista 3D da Malha do Modelo de Fluxo



Seção A-B



**Figura 2.5 – Malha do modelo de fluxo no LEAPFROG.**  
Nota: Imagens do aplicativo *Leapfrog*.

		<b>ELABORAÇÃO DE ESTUDO HIDROGEOLÓGICO NOS PLATÔS DE N1/N2 EM CARAJÁS</b>	
<b>MODELO HIDROGEOLÓGICO CONCEITUAL E NUMÉRICO</b>  <b>RELATÓRIO TÉCNICO EIA</b>		Nº VALE -	PÁGINA <b>14/92</b>
		Nº CONTRATADA -	REV. <b>1</b>

## 2.2 DADOS HIDROGEOLÓGICOS

### 2.2.1 Unidades hidrogeológicas

Dentre os dados e tópicos mais relevantes para o desenvolvimento dos estudos pretendidos citam-se aqueles relacionados a informações sobre a classificação de unidades hidrogeológicas e parâmetros hidrodinâmicos (porosidade efetiva, condutividade hidráulica, transmissividade, armazenamento e recarga). Para as unidades de maior interesse, como as cangas e formações ferríferas, alguns destes parâmetros foram determinados em campo para efetiva utilização na modelagem numérica de fluxo das águas subterrâneas. Para outras unidades estes foram traduzidos a partir da literatura pertinente.

Considerando o caráter litológico predominante na distribuição das unidades geológicas regionais afetas aos platôs N1 e N2, além do comportamento hidrodinâmico e os tipos de permeabilidade (primária e secundária) reconhecidos, foram caracterizadas as diferentes unidades e sistemas hidrogeológicos representados pela distribuição unitária ou conjunta de aquíferos e/ou aquícludes.

A estruturação deste arcabouço hidrogeológico se baseou na definição de REBOUÇAS (1994) e SOUZA (1995), que utilizam a denominação Sistema Aquífero para um conjunto formado por uma ou mais unidades litoestratigráficas que apresentam atributos relativamente semelhantes de condutividade hidráulica, características hidrodinâmicas, condições de recarga, circulação e descarga, além de qualidade das águas. SOUZA (1995) ainda emprega o termo Unidade Aquífera para caracterizar a ocorrência de um ou dois tipos predominantes e bem definidos de rocha portadora de água, associado a uma unidade geológica específica. Neste estudo é considerado o termo Unidade Hidrogeológica, que se presta tanto para os aquíferos como para os aquícludes e aquícludes.

Na Tabela 2.1 estão apresentadas as características principais dos sistemas e unidades hidrogeológicas regionais presentes na área, além de dados sobre intervalos dos valores típicos de porosidade efetiva,  $S_y$  (%), condutividade hidráulica,  $K_{xy}$  (cm/s) e recarga média anual (% da precipitação média anual). A distribuição espacial destas unidades pode ser visualizada na Figura 2.6.

Cumprе ressaltar que em função do desenvolvimento de um modelo geológico tridimensional que levou em consideração as unidades de modelos de blocos da VALE, relativas às formações ferríferas e suas coberturas de canga, deve-se esperar uma caracterização mais detalhada do Aquífero Carajás e de suas coberturas durante o procedimento de construção e calibração do modelo hidrogeológico de fluxo das águas subterrâneas. Este detalhamento deverá refletir os diversos litotipos que, naturalmente, associam-se às formações ferríferas. Quais sejam: hematita friável, hematita compacta, jaspelito, canga química, canga estrutural. O detalhamento de parâmetros hidrodinâmicos destas subunidades será conhecido na calibração do referido modelo.



		<b>ELABORAÇÃO DE ESTUDO HIDROGEOLÓGICO NOS PLATÔS DE N1/N2 EM CARAJÁS</b>	
<b>MODELO HIDROGEOLÓGICO CONCEITUAL E NUMÉRICO</b> <b>RELATÓRIO TÉCNICO EIA</b>		Nº VALE	PÁGINA
		-	<b>15/92</b>
		Nº CONTRATADA	REV.
		-	<b>1</b>

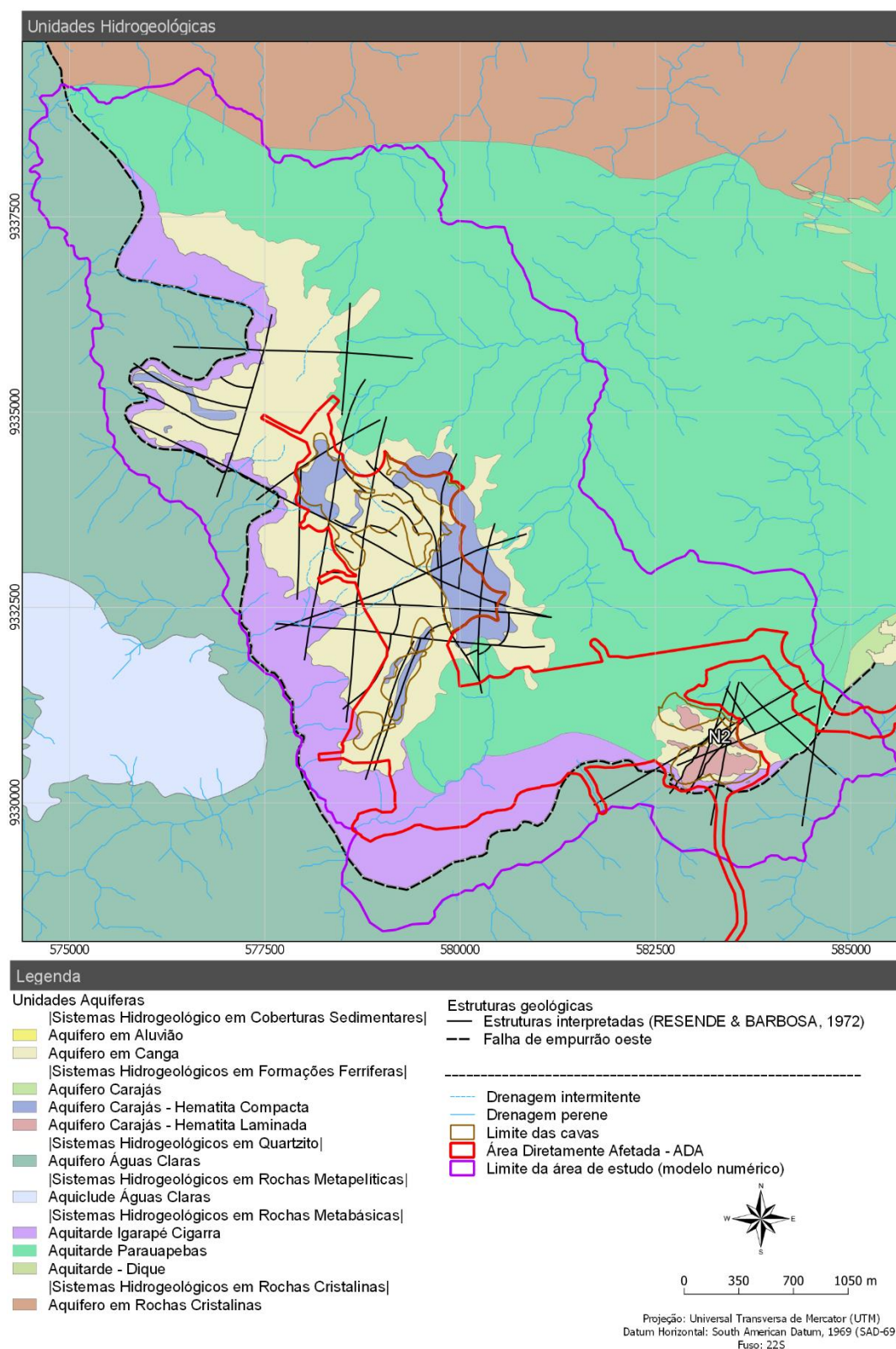
**Tabela 2.1 - Sistemas e unidades hidrogeológicas reconhecidas na área de estudo.**

Sistema Hidrogeológico	Unidades Hidrogeológicas	Espessuras Médias (m)	Intervalos dos Valores Típicos de Porosidade Efetiva, S <sub>v</sub> (%)	Intervalos dos Valores Típicos de Condutividade Hidráulica, K <sub>xy</sub> (cm/s)	Intervalos dos Valores Típicos de Recarga, R (% médio de chuva)	Descrição Geral
em Formações Ferríferas	Aquífero Carajás	410 (superior) 100 (inferior)	4% a 8%	1,0 x 10 <sup>-04</sup> a 1,0 x 10 <sup>-02</sup>	20% < R < 40%	Os aquíferos em Formações Ferríferas são responsáveis pela maior parcela da descarga de água subterrânea que abastece as principais drenagens no entorno dos platôs de N1 e N2. Em geral, apresentam valores elevados de porosidade efetiva e condutividade hidráulica. Trata-se da presença de jaspelitos e corpos de hematitas. A porção composta por hematita é caracterizada como mista composta por hematita friável e pulverulenta, de origem residual ou supergênica, representativas de material poro-permeável que apresenta um tipo de aquífero intergranular que permite a circulação de água através de seus interstícios, além de hematita compacta variavelmente fraturada. Apresenta espessura bastante variável, podendo alcançar até 410 metros. O jaspelito é caraterizado por conter camada com espessura considerável de até 100 metros. Devido as suas características de material compacto, nesta rocha, a água subterrânea circula lentamente através de descontinuidades.
em Rochas Metareníticas	Aquífero Águas Claras-Quartzito	> 1000	2,0% a 3,5%	1,0 x 10 <sup>-05</sup> a 1,0 x 10 <sup>-03</sup>	15% < R < 25%	Os aquíferos em quartzitos são descontínuos, do tipo fissural, livres a confinados por rochas impermeáveis, anisotrópicos e heterogêneos. A porosidade e permeabilidade são secundárias, resultantes dos esforços tectônicos e intemperismo. São considerados de relativo alto potencial hidrogeológico, devido à elevada porosidade efetiva, condutividade hidráulica e capacidade de armazenamento. Isso se deve ao fato de que a circulação e armazenamento de água nesse aquífero ocorrem, predominantemente, nas descontinuidades estruturais representadas por seus planos de fissuras e fraturas interconectadas, além de falhas presentes em nível local e regional. A recarga ocorre de forma direta, pela infiltração de águas de chuva. As direções de fluxo são predominantemente controladas pelo gradiente da topografia, e, subordinadamente, pela presença de contatos geológicos com unidades menos permeáveis.
em Coberturas Sedimentares	Aquífero em Aluviões	~ 20	0,1% a 10,0%	5,0 x 10 <sup>-06</sup> a 5,0 x 10 <sup>-02</sup>	10% < R < 40%	As coberturas sedimentares configuram unidades de potencial aquífero, sendo constituídas por depósitos aluvionares e coluvionares, além de coberturas de cangas e lateritas. O potencial hidrogeológico dessas unidades depende da espessura saturada, continuidade lateral dos pacotes sedimentares e do contexto geomorfológico no qual estão inseridas. Em geral, constituem aquíferos rasos e suas águas são caracterizadas como hipodérmicas. Formam aquíferos localizados, temporários, descontínuos, livres, anisotrópicos e heterogêneos, com porosidades e permeabilidades primárias maiores em horizontes arenosos e conglomeráticos. Esse sistema desempenha papel importante na recarga dos aquíferos sotopostos. As cangas e lateritas, em geral, estão associadas às nascentes de comportamento sazonal, e apresentam capacidade de armazenamento variável, funcionando localmente como aquíferos temporários. Dadas as diferenças texturais e composicionais as cangas e lateritas também compõe horizontes de fluxo rápido na zona vadosa, ora favorecendo a infiltração e percolação para as unidades sotopostas, ora descarregando nas calhas fluviais.
	Aquífero em Colúvios	~ 20				
	Aquífero em Cangas e Lateritas	~ 20				
em Rochas Cristalinas	Aquífero em Rochas Cristalinas	< 100	0,75% a 2,0%	5,0 x 10 <sup>-07</sup> a 5,0 x 10 <sup>-03</sup>	5% < R < 15%	Os aquíferos em rochas do embasamento cristalino constituem um sistema de fluxo misto (intergranular e fissural) associado ao manto de alteração e a rocha são fraturada, de baixo potencial hidrogeológico. No manto de alteração ocorre porosidade intergranular no solo residual e saprolito, caracterizando um aquífero do tipo livre de espessura máxima de 30 metros. O aquífero fissural, sotoposto ao primeiro, ocorre em profundidades de 30 a 100 metros, com boa continuidade lateral, apresentando um potencial hidrogeológico em função da interconexão de fraturas, sendo os mesmos geralmente baixos. O cristalino coeso, mais profundo que 100 metros, já não se caracteriza como aquífero em decorrência do não fraturamento (baixa porosidade secundária) e alta coesão, tendo, portanto, um comportamento de um aquífero de aquitardo ou aquíclode.
em Rochas Metapelíticas	Aquíclode Águas Claras - Pelitos	> 200	0,50 a 0,75%	1,0 x 10 <sup>-08</sup> a 1,0 x 10 <sup>-06</sup>	R < 5%	Os aquícludes em rochas metapelíticas reúnem as unidades geológicas impermeáveis que ocorrem como filitos, metapelitos, siltitos e argilitos. Estão presentes como faixas estreitas interestratificadas ou intraformacionais com unidades de maior potencial hidrogeológico. Embora os argilominerais presentes nesta unidade armazenem água, eles não são capazes de transmiti-la. Sua plasticidade origina fraturas fechadas. Exercem importante papel ao confinar unidades produtoras de água, proporcionando mananciais com expressivas vazões em contatos de cotas elevadas. Porém, podem se configurar em aquíferos em zonas de fraturas ou de descontinuidades nas camadas.
em Rochas Metabásicas	Aquíclode em Diques Máficos	Alterado ~ 20 Saprolítico ~ 20 Fissurado ~ 100	0,25 a 0,50%	5,0 x 10 <sup>-08</sup> a 5,0 x 10 <sup>-06</sup>	R < 5%	Os aquícludes em rochas metabásicas reúnem a ocorrência de diques e corpos de rochas básicas intrusivas ou de derrames. Raramente são reconhecidos em superfície por estarem comumente intemperizados. São identificados nas escavações das minerações e através de testes de aquífero. Constituem importantes barreiras hidráulicas entre aquíferos, e estão presentes, principalmente, nas sequências metassedimentares. Os corpos intrusivos seccionam os aquíferos em diversas direções, compartimentando-os e alterando os fluxos subterrâneos. Contudo, em função de complexo arranjo estrutural podem desempenhar papel de aquíferos localizados.
	Aquíclode Igarapé Cigarra					
	Aquíclode Parauapebas					

Fonte: FETTER (1994); FREEZE & CHERRY (1979), ANDERSON & WOESSNER (1992); GOLDER (2002, 2006); Dados VALE.





		<b>ELABORAÇÃO DE ESTUDO HIDROGEOLÓGICO NOS PLATÔS DE N1/N2 EM CARAJÁS</b>	
<b>MODELO HIDROGEOLÓGICO CONCEITUAL E NUMÉRICO</b>  <b>RELATÓRIO TÉCNICO EIA</b>		Nº VALE -	PÁGINA <b>16/92</b>
		Nº CONTRATADA -	REV. <b>1</b>



**Figura 2.6** – Mapa de distribuição das unidades hidrogeológicas regionais na área de estudo.

Fonte: Construído com base nas informações de geologia traduzidas acima.

		<b>ELABORAÇÃO DE ESTUDO HIDROGEOLÓGICO NOS PLATÔS DE N1/N2 EM CARAJÁS</b>	
<b>MODELO HIDROGEOLÓGICO CONCEITUAL E NUMÉRICO</b> <b>RELATÓRIO TÉCNICO EIA</b>		Nº VALE -	PÁGINA <b>17/92</b>
		Nº CONTRATADA -	REV. <b>1</b>

## 2.2.2 Cadastro de nascentes

Com relação ao cadastro de nascentes, foram realizadas quatro campanhas entre as datas de 08/05/2017 e 12/07/2017, além de uma visita de campo em 25/09/17, tendo sido apontados 59 pontos de nascentes com característica perene, sendo 49 no entorno do platô N1 e 10 no entorno do platô N2, conforme apresentado na Tabela 2.3 e na Figura 2.7. As fichas de cadastro destes pontos foram apresentadas em produto específico.

Além dos pontos de nascentes, foram também reconhecidos pontos de controle na área para tomada de informações diversas (Tabela 2.4), incluindo pontos de surgência em final de período de chuva com características intermitentes.

## 2.2.3 Monitoramento hídrico

### 2.2.3.1 Pluviometria

Na ausência de estação própria de monitoramento de precipitação pluviométrica na região dos platôs N1 e N2, estão sendo apresentados aqui os dados disponíveis da estação da mina de N5W, localizada a cerca de 10 km dos platôs, cujo histórico remonta ao período de janeiro de 2008 a junho de 2017 (Tabela 2.2).

O padrão de variação das precipitações nesta estação (Figura 2.8) denota que a média plurianual é da ordem de 2360 mm/a, sendo o período seco situado entre os meses de maio e outubro (com média da ordem de 470 mm/a) e o período úmido entre os meses de novembro a abril (com média da ordem de 1830 mm/a).

**Tabela 2.2 – Dados de precipitação pluviométrica da estação N5W.**

Ano Hidrológico	Nov	Dez	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Seco	Úmido	Total
2007/2008	-	-	219.5	201.5	283.0	271.5	140.5	3.5	4.5	70.5	55.5	153.5	428.0	-	-
2008/2009	320.0	300.5	193.5	511.5	597.0	445.0	614.5	19.0	21.5	108.5	57.5	89.0	910.0	2367.5	3277.5
2009/2010	127.5	371.0	327.5	216.1	267.0	338.0	69.0	51.5	3.0	18.5	25.5	130.5	298.0	1647.1	1945.1
2010/2011	252.2	208.9	442.8	368.6	299.6	244.4	289.8	38.0	11.0	12.4	0.4	238.8	590.4	1816.5	2406.9
2011/2012	191.3	265.8	970.0	366.0	442.0	124.5	90.5	95.0	68.5	10.5	25.0	57.0	346.5	2359.6	2706.1
2012/2013	208.5	106.5	277.0	177.1	560.5	623.5	281.0	96.5	95.0	11.0	106.5	173.0	763.0	1953.1	2716.1
2013/2014	551.0	508.5	286.0	238.5	283.5	102.5	166.5	16.0	3.5	0.5	19.5	140.7	346.7	1970.0	2316.7
2014/2015	125.4	127.0	313.9	217.8	301.2	315.0	83.0	8.5	36.9	20.2	0.4	40.0	189.0	1400.3	1589.3
2015/2016	55.0	26.5	584.9	114.5	394.5	376.6	89.8	36.7	0.0	7.4	141.4	79.2	354.5	1552.0	1906.5
2016/2017	105.6	101.8	175.3	471.6	379.5	179.6	128.0	9.6	-	-	-	-	-	1413.4	-
Mínima	55.0	26.5	175.3	114.5	267.0	102.5	69.0	3.5	0.0	0.5	0.4	40.0	189.0	1400.3	1589.3
Máxima	551.0	508.5	970.0	511.5	597.0	623.5	614.5	96.5	95.0	108.5	141.4	238.8	910.0	2367.5	3277.5
Média	215.2	224.1	379.0	288.3	380.8	302.1	195.3	37.4	27.1	28.8	48.0	122.4	469.6	1831.1	2358.0

Fonte: Dados disponibilizados pela VALE da Estação N5W.

		ELABORAÇÃO DE ESTUDO HIDROGEOLÓGICO NOS PLATÔS DE N1/N2 EM CARAJÁS	
MODELO HIDROGEOLÓGICO CONCEITUAL E NUMÉRICO  RELATÓRIO TÉCNICO EIA	Nº VALE	-	PÁGINA <b>18/92</b>
	Nº CONTRATADA	-	REV. <b>1</b>

**Tabela 2.3 – Relação de pontos de nascentes cadastradas na área de N1/N2.**

Código de Campo	Código de GPS	Local	Data do Inventário	UTM E (m)	UTM N (m)	Cota (m)	Situação Geológica	Descrição	Vazão (L/s)	Temperatura do Ar (°C)	Temperatura da Água (°C)	Condutividade Elétrica (µS/cm)	Oxigênio Dissolvido (mg/L)	pH	Eh (mv)
N1-02	NA01A	Platô N1	10/05/2017	580346	9331749	616	Canga/Metamáfica	Nascente em canga ferruginosa, com blocos de rocha máfica alterada, em talvegue encaixado, vegetação do tipo floresta. Contato entre a formação Carajás e as rochas metavulcânicas da formação Parauapebas.	0.200	24.64	23.58	22.00	2.79	8.30	259.10
N1-03	NA02	Platô N1	10/05/2017	580017	9331402	644	Metamáfica	Nascente sob afloramento de rocha metabásica, em talvegue encaixado, vegetação do tipo floresta. Fluxo contínuo a jusante deste ponto.	2.000	24.71	23.83	37.00	1.92	5.66	286.90
N1-05	NA03A	Platô N1	11/05/2017	578965	9330266	589	Metamáfica	Nascente difusa sob blocos de rocha em talvegue encaixado, vegetação do tipo floresta. Fluxo com vazão elevada e contínua deste ponto para jusante.	0.500	23.87	23.91	13.00	3.39	4.70	322.60
N1-06	NA04	Platô N1	11/05/2017	579482	9330786	634	Metamáfica	Nascente pontual, em solo argiloso ocre, de alteração de rocha metabásica, em talvegue aberto em meio à floresta.	1.800	25.16	24.64	6.00	2.50	4.52	337.30
N1-07	NA05	Platô N1	12/05/2017	581686	9332254	542	Metamáfica	Nascente pontual, em solo argiloso marrom avermelhado com blocos de rocha metabásica, na parte mais plana do talvegue, em meio à floresta.	0.100	22.04	23.11	30.00	3.59	7.78	225.50
N1-08	NA06	Platô N1	12/05/2017	581328	9332654	521	Metamáfica	Nascente pontual, vegetação do tipo floresta, em talvegue encaixado, em solo argiloso cor ocre. A vazão aumenta a cerca de 10 m a jusante do ponto da nascente.	0.100	24.95	24.23	46.00	2.96	5.73	237.70
N1-09	NA07	Platô N1	12/05/2017	581553	9332190	585	Metamáfica	Nascente pontual, em talvegue encaixado em meio à floresta, em solo argiloso marrom amarelado.	0.300	24.52	23.54	17.00	3.32	5.01	305.20
N1-11	NA08A	Platô N1	15/05/2017	579914	9334872	421	Formação ferrífera/Metamáfica	Nascente pontual, sob bloco de canga, em talvegue rochoso. Fluxo contínuo a partir deste ponto.	0.100	26.51	24.88	17.00	3.98	5.09	319.10
N1-12	NA09	Platô N1	15/05/2017	579781	9334866	456	Formação ferrífera/Metamáfica	Nascente difusa em solo pouco desenvolvido sobre lapa de canga. As águas nascem do topo da lapa (cerca de 30 metros de altura) e, também, do interior da mesma em conduto na canga	3.000	26.81	24.86	15.00	3.92	6.22	307.60
N1-13	N1 04	Platô N1	17/05/2017	578561	9331583	640	Canga/Metamáfica	Nascente difusa localizada na quebra de relevo. Vários pontos de afloramento de água em um talvegue bem definido em superfície de canga. Fluxo contínuo a partir da nascente. Ao longo do talvegue, a montante do ponto da nascente, a canga está fraturada e a superfície irregular permite acúmulo de água em poças. O talvegue se inicia suave no alto do platô e segue em direção a margem, e o leito aprofunda após o desnível abrupto.	3.000	24.57	24.55	14.00	3.51	6.20	251.80
N1-14	N1 02	Platô N1	17/05/2017	578603	9330927	611	Canga/Metamáfica	Nascente pontual próximo ao contato entre canga e rocha máfica. A drenagem começa no topo do platô em uma área aplainada onde ocorre um lago temporário. Progressivamente, a jusante do lago, se forma um talvegue suave na canga até a quebra de relevo, onde um paredão marca o início de um trecho íngreme com muitos blocos e matacões ao longo da drenagem.	1.500	24.71	24.61	16.00	4.14	4.82	317.50
N1-15	N1 11B	Platô N1	19/05/2017	577997	9332611	604	Metamáfica	Nascente difusa em solo avermelhado argiloso com serapilheira. Nascente secundária associada ao talvegue da nascente N1 11.	0.100	25.30	25.00	3.00		4.51	
N1-16	N1 11A	Platô N1	20/05/2017	578064	9332709	645	Metamáfica/Formação ferrífera	Nascente pontual localizada na base do paredão que marca o limite do platô de N1. O ponto da surgência está abaixo de um matacão de escala métrica que compõe uma área rica em blocos e matacões de canga associados ao desmonte do paredão. No entorno da área há solo avermelhado argilosos coberto por serapilheira. Existe a montante do paredão um talvegue suave na canga, cuja origem é uma lagoa de lâmina d'água rasa que verte em períodos de cheia. O talvegue de canga é muito fraturado, com fendas onde acumula e infiltra água. A jusante da surgência o fluxo aumenta, e forma-se um talvegue encaixado com vários trechos encachoeirados. Abaixo da surgência principal ocorrem surgências laterais difusas (ex. N1 11B).	1.500	24.30	24.70	3.00		4.03	
N1-17	N1 14	Platô N1	22/05/2017	577541	9332684	546	Metamáfica	Nascente pontual em talvegue em solo argiloso avermelhado. Vegetação de mata. No ponto da nascente muitos arbustos e capim alto.	0.050	26.70	24.70	5.00		3.69	
N1-18	N1 13	Platô N1	22/05/2017	577254	9333307	539	Metamáfica	Nascente pontual. Talvegue em rocha máfica alterada coberto por blocos e matacões.	0.500	27.80	24.40	1.00		4.41	
N1-19	N1 16	Platô N1	23/05/2017	577659	9333979	629	Metamáfica	Nascente pontual em meio aos blocos de canga. Desenvolve-se próximo ao contato canga rocha. A nascente fica próxima a base do paredão.	0.500	29.80	24.20	1.00		4.75	
N1-20	N1 12D	Platô N1	23/05/2017	577634	9333772	604	Metarenito	Nascente pontual em talvegue encaixado com vários blocos de canga, porções de canga aluvionar e afloramento de arenito grosso ferruginoso (Fm. Águas Claras?). Ponto a jusante do ponto N1 12C, no mesmo talvegue.	0.300	27.60	24.10	1.00		4.27	
N1-21	N1 10	Platô N1	24/05/2017	578586	9334545	663	Canga	Nascente pontual no paredão de canga. Ocorrem fraturas sub-horizontais, canaliculos e feições tipo "marmita". Esse ponto ocorre a jusante da lagoa da Chapinha (lagoa do ponto N1 10A). A lagoa não tem uma nascente associada e no período da visita o talvegue por onde ela verte estava seco. Na base do paredão que marca a quebra de relevo está posicionada a nascente.	0.400	29.60	25.90	4.00		5.54	
N1-22	N1 61	Platô N1	25/05/2017	580256	9333225	717	Canga/Formação ferrífera	Nascente pontual associada a um talvegue em canga coberto por blocos. No ponto da surgência ocorre uma camada de argila alaranjada fétida sobre a canga. O talvegue se forma a partir de uma área brejosa e se prolonga em um declive suave na canga até o ponto da nascente. Deste ponto em diante ocorrem trechos encachoeirados. Em seções verticais, identifica-se a formação ferrífera abaixo da canga, e as estruturas observadas correspondem a descontinuidades sub-horizontais, com planos de dissolução/lixiviação bem marcados.	0.010	28.20	26.40	47.00		6.39	
N1-23	N1 5a7	Platô N1	25/05/2017	578378	9332436	593	Canga/Metamáfica	Nascente pontual associada a um lineamento de relevo na direção NE-SW (mesma estrutura que controla o talvegue da nascente N1 61. A nascente está localizada a jusante do paredão que marca o limite do platô, em um talvegue encaixado. Vários pontos de surgência ocorrem associados a um degrau na canga, por meio de canaliculos e condutos, com volume grande, formando um rio de fluxo rápido na superfície da canga, em um leito de aproximadamente 4 m de largura, com abundantes blocos e matacões.	6.000	26.40	24.50	3.00		5.22	
N1-24	NA77	Platô N1	30/05/2017	580446	9330171	580	Metamáfica	Nascente pontual em solo argiloso cor ocre, em vale encaixado em meio à floresta.	0.300	26.40	23.39	21.00	7.34	5.39	31.90
N1-25	NA19A	Platô N1	31/05/2017	577051	9334342	631	Metarenito	Nascente sob blocos de metarenito no contato com a canga ferrífera, em talvegue encaixado. Observa-se ao longo do talvegue até a confluência com o curso d'água receptor metarenitos fraturados. Principais fraturas possuem direção N240 e N.	0.300	24.80	23.79	12.00	7.85	6.68	33.20
N1-26	NA60	Platô N1	01/06/2017	580757	9333730	549	Metamáfica	Nascente em solo argiloso marrom avermelhado, sob vegetação hidrófila.	0.160	25.80	23.78	12.00	7.49	6.16	44.90
N1-27	NA60A	Platô N1	01/06/2017	580756	9333582	553	Metamáfica	Nascente difusa em solo argiloso marrom avermelhado, em área brejada, com vegetação hidrófila.		25.70	25.47	13.00	6.17	5.44	59.20
N1-28	NA84	Platô N1	01/06/2017	580642	9333187	614	Metamáfica	Nascente pontual, sob raiz de árvore, no contato entre solo argiloso e rocha máfica sã. O leito do talvegue é todo rochoso.	0.500	24.80	24.09	9.00	7.85	4.92	102.80
N1-29	NA54	Platô N1	02/06/2017	580565	9334663	430	Metamáfica	Nascente difusa, em área brejada, em meio a bananeiras e açaizeiros, em solo argiloso marrom avermelhado.		27.04	25.09	12.00	6.87	5.37	31.20
N1-30	NA56	Platô N1	02/06/2017	580688	9334419	496	Metamáfica	Nascente difusa, em meio a bananal e açaizeiros, sob solo argiloso e blocos de canga ferrífera.		25.77	25.23	11.00	7.77	5.78	31.20
N1-31	NA32	Platô N1	03/06/2017	577553	9336171	610	Canga	Nascente pontual, em vale encaixado, sob quebra de talude na canga ferrífera.	1.000	25.40	24.41	13.00	6.64	4.77	69.70
N1-32	NA34A	Platô N1	03/06/2017	578153	9336801	593	Metamáfica	Nascente pontual, em vale encaixado em meio à floresta, sob blocos de canga em meio a solo argiloso marrom avermelhado. Água surge em fratura de direção N220. A partir desse ponto, o curso d'água tem fluxo contínuo.	0.150	24.90	23.60	16.00	7.54	4.92	85.60
N1-34	NA63	Platô N1	05/06/2017	581137	9332656	552	Metamáfica	Nascente pontual, localizada sob uma raiz de árvore e blocos de canga, em contato com solo argiloso marrom. Vale encaixado em meio à floresta.	0.620	28.90	23.92	14.00	6.54	5.92	19.60
N1-35	N1 28	Platô N1	05/06/2017	576530	9335909	458	Metarenito	Nascente difusa em zona brejada com blocos de quartzo.	2.500	22.50	22.94	15.00	8.97	6.44	60.80
N1-36	NA17	Platô N1	06/06/2017	577387	9334079	594	Metarenito	Nascente em três pontos distintos em um talvegue encaixado em meio a vegetação do tipo floresta, no contato entre metarenitos e matacões de canga ferrífera.	0.400	24.26	23.97	4.00	8.43	5.39	104.80



		ELABORAÇÃO DE ESTUDO HIDROGEOLÓGICO NOS PLATÔS DE N1/N2 EM CARAJÁS	
MODELO HIDROGEOLÓGICO CONCEITUAL E NUMÉRICO  RELATÓRIO TÉCNICO EIA	Nº VALE	-	PÁGINA <b>19/92</b>
	Nº CONTRATADA	-	REV. <b>1</b>

Código de Campo	Código de GPS	Local	Data do Inventário	UTM E (m)	UTM N (m)	Cota (m)	Situação Geológica	Descrição	Vazão (L/s)	Temperatura do Ar (°C)	Temperatura da Água (°C)	Condutividade Elétrica (µS/cm)	Oxigênio Dissolvido (mg/L)	pH	Eh (mv)
N1-37	NA49	Platô N1	06/06/2017	578905	9335033	522	Metamáfica	Nascente pontual, sob blocos de canga, em solo argiloso marrom avermelhado.	0.200	25.38	24.44	7.00	8.15	5.97	93.10
N1-38	N1 47	Platô N1	28/06/2017	578591	9335233	566	Metamáfica/ Formação ferrífera	Nascente em zona de contato tectônico entre rocha máfica e jaspelito. Afloramentos de rochas em talvegue muito encaixado.	2.000	27.50	25.16	10.00	6.47	4.95	240.90
N1-39	N1 48	Platô N1	28/06/2017	578647	9334971	560	Metamáfica/ Formação ferrífera	Nascente difusa surgente sob blocos de rocha máfica em área brejada a jusante de bananal. Solo vermelho escuro.	2.000	26.40	25.54	9.00	5.99	4.84	176.20
N1-40	N1 45	Platô N1	01/07/2017	578533	9335897	581	Formação ferrífera /Metamáfica	Nascente pontual surgente sob blocos de rocha máfica, jaspelito e de cangas próximo à quebra do platô.	0.800	21.81	24.62	8.00	7.12	4.59	160.70
N1-41	N1 44	Platô N1	01/07/2017	579300	9336062	425	Metamáfica	Nascente difusa em talvegue de inclinação suave, com blocos de rocha máfica em solo vermelho escuro. Zona brejada em solo orgânico na porção lateral.	0.500	22.99	24.08	6.00	7.58	5.68	114.10
N1-42	N1 35	Platô N1	03/07/2017	578503	9336437	562	Metamáfica	Nascente pontual sob blocos de rocha máfica em talvegue encaixado.	0.500	24.60	23.92	5.00	6.10	4.61	90.70
N1-43	N1 38	Platô N1	04/07/2017	576997	9336426	465	Metarenito	Nascente difusa em solo arenoso com blocos de rocha quartzítica. Blocos de máfica nas proximidades e solo vermelho escuro.	0.200	24.30	23.33	9.00	5.98	5.38	79.80
N1-44	N1 37	Platô N1	04/07/2017	576594	9336753	459	Metarenito	Nascente pontual em zona de contato entre rocha máfica e quartzito ferruginoso.	1.200	25.16	23.80	12.00	7.87	5.40	93.80
N1-45	N1 22	Platô N1	04/07/2017	576449	9334534	591	Metarenito	Nascente pontual em zona de contato de rocha máfica com arenito/quartzito recoberto por canga.	1.500	23.80	24.40	6.00	6.12	4.58	63.12
N1-46	N1 21	Platô N1	04/07/2017	576606	9334478	577	Metarenito	Nascente pontual, em talvegue encaixado, em zona de contato entre canga e arenito/quartzito.	1.500	22.40	22.30	3.00	8.06	5.19	122.00
N1-47	N1 Sem Nome	Platô N1	05/07/2017	576957	9336313	459	Metamáfica	Nascente difusa em zona com solo brejado vermelho. Aparentemente zona de estrutura que transpassa o platô em direção NW.	4.000	23.78	22.79	7.00	9.59	6.28	54.90
N1-48	N1 SN2	Platô N1	05/07/2017	576890	9336229	465	Metamáfica	Nascente pontual em solo vermelho escuro com canga recobrimdo a saída de água. Possível zona de falha NW paralela a outras estruturas que cortam o platô.	1.000	22.30	23.00	10.00	7.53	6.33	52.70
N1-49	N1 29B	Platô N1	05/07/2017	576571	9335956	459	Metarenito	Nascente difusa sob blocos de arenito/quartzito	1.000	23.98	24.37	42.00	6.70	6.29	2.70
N1-50	N1 29A	Platô N1	05/07/2017	576665	9335795	494	Metamáfica	Nascente difusa em solo orgânico com blocos de canga. Aparece solo vermelho escuro no entorno.	0.500	25.60	24.60	29.00	5.21	5.69	-11.70
N1-51	N1 31	Platô N1	05/07/2017	577313	9335753	611	Metamáfica	Nascente em contato canga e rocha máfica. Aparentemente condicionada a uma forte estrutura NW.	0.300	23.80	22.21	5.00	6.20	5.37	107.10
N1-52	N1 41	Platô N1	06/07/2017	577598	9337632	383	Metamáfica	Nascente pontual em solo vermelho escuro com presença de rocha alterada argilosa	0.600	26.46	24.10	23.00	6.70	5.15	36.01
N1-53	N1 24	Platô N1	11/07/2017	576022	9335153	542	Metarenito	Nascente em quartzito marcando zona de falha que atravessa o platô na direção do talvegue. Foliação do quartzito ortogonal à falha.	0.100	25.65	23.42	8.00	8.15	4.82	267.30
N2-01	N2 14	Platô N2	30/06/2017	584506	9331774	366	Metamáfica	Nascente pontual em talvegue coberto por blocos de rocha máfica, canga e jaspelito. Ponto muito próximo da confluência com o igarapé Gelado. Todo o trecho a montante encontra seco.	1.250	23.25	23.79	27.00	3.97	4.81	51.80
N2-02	N2 11e12	Platô N2	07/07/2017	583044	9331346	559	Formação ferrífera	Nascente pontual na borda do platô sob matações de canga e minério. Talvegue muito encaixado.	1.200	25.80	23.44	4.00	9.46	5.60	111.90
N2-03	N2 20	Platô N2	08/07/2017	583485	9329673	633	Metarenito	Nascente difusa em meio a bananal. Aparece solo com areia grossa recoberto por solo orgânico. Presença de blocos de quartzito ferruginoso.	0.600	23.80	22.21	12.00	7.13	4.80	31.00
N2-04	N2 22	Platô N2	08/07/2017	583786	9330000	617	Metarenito	Nascente pontual em afloramento de quartzito encoberto por solo arenoso vermelho escuro.	0.200	24.70	22.17	8.00	5.04	4.69	51.00
N2-05	N2 23B	Platô N2	08/07/2017	584085	9330229	609	Metarenito	Nascente pontual em solo arenoso com blocos de quartzito. Talvegue encaixado.	0.300	23.50	23.01	8.00	5.65	4.52	63.30
N2-06	N2 23A	Platô N2	08/07/2017	584063	9330364	632	Metarenito	Nascente pontual em afloramento de quartzito recoberto por canga e solo vermelho.	0.100	25.10	23.07	14.00	5.50	4.52	48.70
N2-07	N2 09	Platô N2	08/07/2017	582875	9329889	611	Metarenito	Nascente difusa em solo arenoso recoberto por solo orgânico com blocos de quartzito nas imediações.	0.400	27.00	22.10	7.00	8.16	4.98	95.60
N2-08	N2 10	Platô N2	08/07/2017	582565	9330186	632	Metarenito	Nascente pontual em meio a blocos de canga e afloramento de quartzito.	0.300	24.00	22.70	7.00	6.70	4.77	61.10
N2-09	N2 24	Platô N2	10/07/2017	584539	9330508	544	Metarenito	Nascente pontual em solo arenoso com blocos de quartzito e de canga. Vertente íngreme em talvegue encaixado.	0.200	25.74	22.27	7.00	7.22	4.71	322.90
N2-10	N2 01	Platô N2	25/09/2017	581709	9330126	585	Metarenito	Nascente pontual em meio a blocos de canga e solo vermelho argiloso. Talvegue encaixado em meio a mata de porte arbóreo.	0.500	24.00	23.30	15.00	0.00	4.93	311.50

Fonte: Dados de campo HIDROVIA.

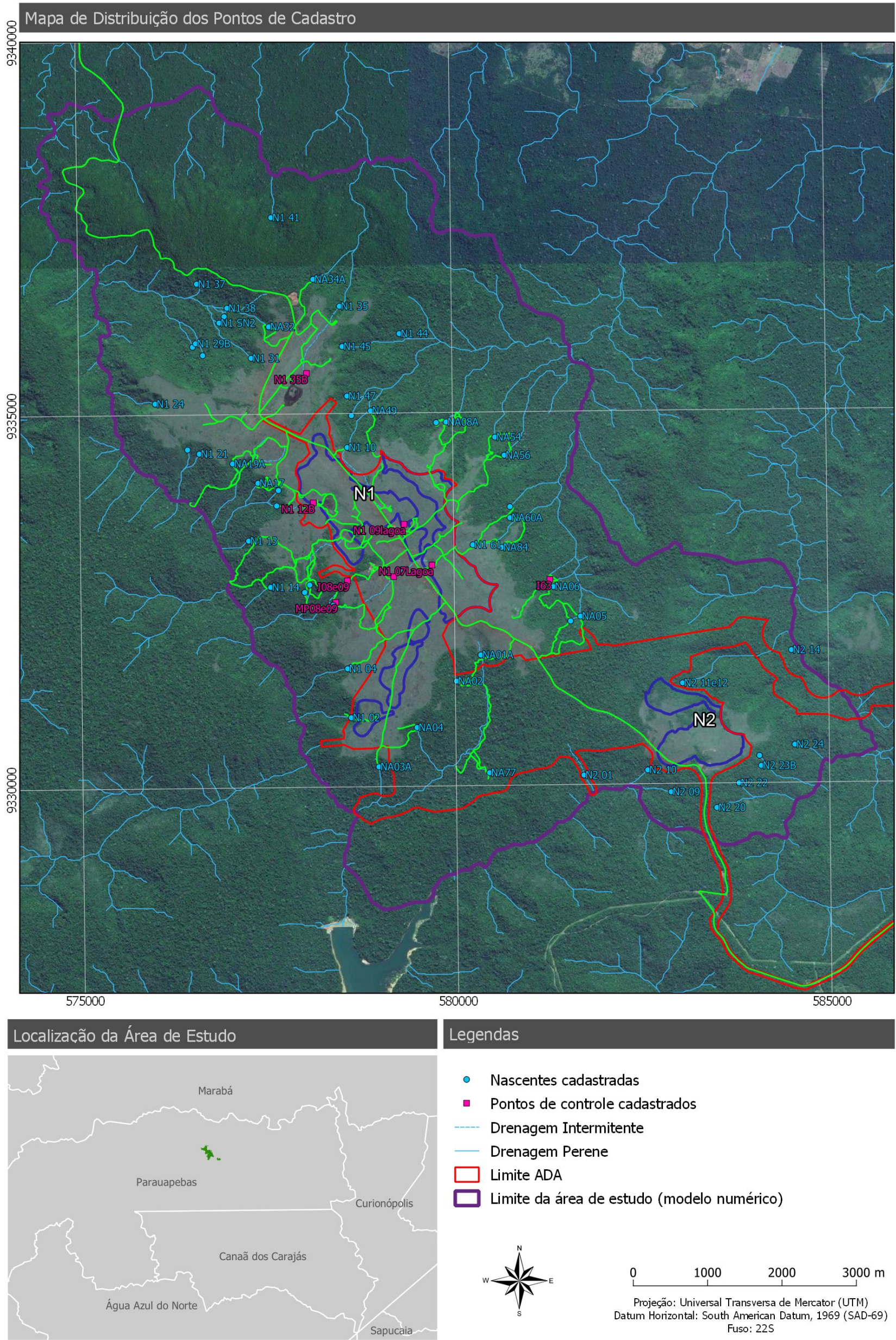
			<b>ELABORAÇÃO DE ESTUDO HIDROGEOLÓGICO NOS PLATÔS DE N1/N2 EM CARAJÁS</b>	
<b>MODELO HIDROGEOLÓGICO CONCEITUAL E NUMÉRICO</b>  <b>RELATÓRIO TÉCNICO EIA</b>			Nº VALE	PÁGINA
			-	<b>20/92</b>
			Nº CONTRATADA	REV.
			-	<b>1</b>

**Tabela 2.4 – Relação de pontos de controle cadastrados na área de N1/N2.**

Código de campo	Código de GPS	Local	Data do Inventário	UTM E (m)	UTM N (m)	Cota (m)	Situação Geológica	Descrição	Vazão (L/s)	Temperatura do Ar (°C)	Temperatura da Água (°C)	Condutividade Elétrica (µS/cm)	Oxigênio Dissolvido (mg/L)	pH	Eh (mv)
CT-01	I08e09	Platô N1	18/05/2017	578521	9332719	665	Canga/Metamáfica	Ponto de infiltração da nascente N108eN109. Desse ponto em diante talvegue seco.	-	-	-	-	-	-	-
CT-02	MP08e09	Platô N1	19/05/2017	578361	9332431	589	Solo	Drenagem a montante da confluência com o talvegue seco onde foi marcado o ponto N108eN109. Fluxo rápido, lâmina d'água rasa, trechos encachoeirados, com muitos blocos e matacões de canga no leito e nas margens.	0.001	-	-	3.00	-	4.23	-
CT-03	N1 07Lagoa	Platô N1	25/05/2017	579656	9332918	691	Canga	Lagoa do Jacarezinho. Ponto da régua.		26.90	29.20	3.00		5.66	
CT-04	N1 07vertimento	Platô N1	25/05/2017	579140	9332769	696	Canga	Ponto de vertimento da lagoa do ponto N1 07lagoa. A água da lagoa passa pela manilha abaixo da estrada principal de N1, e segue fluindo por um talvegue marcado na superfície de canga no alto do platô.	0.150	29.10	33.40	2.00	-	5.90	
CT-05	N1 09lagoa	Platô N1	24/05/2017	579288	9333469	718	Canga	Lagoa da Bomba - ponto da régua	-	29.20	31.20	2.00	-	5.61	
CT-06	N1 35B	Platô N1	24/05/2017	578002	9335502	674	Canga	Ponto de vertimento da lagoa do ponto N1 35. Maior lagoa observada, localizada na porção norte do platô de N1.	0.500	26.60	27.40	6.00	-	6.07	
CT-07	I63	Platô N1	05/06/2017	581233	9332709	544	Canga	Ponto de infiltração da nascente N63. Desse ponto em diante talvegue seco.					-		
CT-08	NA19B	Platô N1	31/05/2017	577290	9334491	681	Canga	Nascente no platô da canga ferífera, sob vegetação arbustiva.	0.100	25.80	25.00	10.00	3.77	5.80	217.60
CT-09	NA19C	Platô N1	31/05/2017	577329	9334530	673	Canga	Nascente difusa na canga ferífera, em área brejada, em vegetação gramínea.	0.200	25.80	24.78	10.00	3.28	5.51	242.80
CT-10	NA19	Platô N1	31/05/2017	577513	9334683	678	Canga	Nascente difusa em área brejada, sobre canga semi-exposta, parcialmente recoberta por vegetação de gramíneas.	-	25.500	30.20	11.00	4.39	5.72	123.40
CT-11	NA18	Platô N1	31/05/2017	577747	9334568	678	Canga	Nascente difusa em área brejada, sobre canga semi-exposta, parcialmente recoberta por vegetação de gramíneas.	-	25.60	31.97	10.00	5.78	5.83	102.10
CT-12	N1 12B	Platô N1	23/05/2017	578077	9333768	681	Canga	Da lagoa Maior há um ponto de vertimento formando um talvegue suave na canga. A água segue até formar poças e o leito ficar seco. Logo à frente a água surge novamente de forma difusa, e flui até infiltrar no ponto N1 12C: 578046; 9333771; 681 m. Desse ponto em diante o talvegue fica seco, formando um trecho encaixado, com blocos de canga.	0.075	28.90	33.90	10.00	-	4.38	-
CT-13	N1 12A	Platô N1	23/05/2017	578443	9333684	684	Canga/Formação ferífera	Nascente pontual na canga a montante da lagoa Maior. Talvegue pouco encaixado, vegetação de campo, com poucos arbustos.	0.150	25.00	24.30	11.00	-	4.85	-
CT-14	NA33	Platô N1	03/06/2017	577530	9336610	632	Solo	Surgência intermitente, no topo do platô, em terreno ainda plano, em solo orgânico na floresta. Água infiltra 3 metros depois, permanecendo talvegue seco até a confluência com o próximo vale a jusante.	0.200	24.80	24.10	10.00	4.27	5.00	71.40
CT-15	NA01	Platô N1	10/05/2017	580308	9331925	648	Canga/Formação ferífera	Surgência intermitente em canga ferruginosa, com vegetação de baixo porte. Neste ponto, a vazão é baixa e o fluxo é descontínuo, infiltrando em blocos e ressurgindo pontualmente a jusante até o ponto NA01A, a partir do qual o fluxo se torna maior e mais contínuo.	0.010	24.23	24.70	59.00	2.56	7.20	239.00
CT-16	NA03	Platô N1	11/05/2017	578918	9330374	637	Canga/Metamáfica	Surgência intermitente em canga ferruginosa, no contato com as rochas metamáficas da formação Parauapebas, em talvegue na floresta. A água para de fluir a 10 metros a jusante deste ponto, voltando a correr superficialmente a partir do ponto NA-03A.	0.180	25.05	23.36	37.00	2.53	5.49	325.30
CT-17	NA08	Platô N1	15/05/2017	579826	9334694	492	Formação ferífera/Metamáfica	Surgência em canga ferífera, com fluxo de vazão baixa e descontínua a jusante; (provavelmente trata-se de uma nascente efêmera ou intermitente). A vazão neste curso d'água torna-se contínua a partir do ponto NA08A.	0.010	28.57	25.90	23.00	3.23	6.40	296.30
CT-18	NA34	Platô N1	03/06/2017	578121	9336760	620	Metamáfica	Surgência intermitente, em vale encaixado na floresta, em meio a blocos de canga sobre solo argiloso marrom avermelhado. Deste ponto até o ponto de jusante, a água infiltra e ressurge sob os blocos de canga.	0.010	24.70	23.40	19.00	6.32	4.89	31.60
CT-19	N1 08e09	Platô N1	18/05/2017	578555	9332737	667	Metamáfica	Surgência intermitente em talvegue marcado em solo avermelhado argiloso, coberto por serapilheira e blocos de canga. A água surge nesse ponto e infiltra lago a jusante. Após o ponto de infiltração permanece seca até a confluência com o Rio Azul. O talvegue segue encaixado, com muitos blocos e matacões no leito da drenagem. As vertentes nas margens são muito íngremes e o solo é avermelhado e argiloso. Apesar da nascente ter pouca água e se infiltrar logo a jusante, o talvegue tem marca de fluxo expressivo. A água do escoamento superficial é conduzida pelas calhas suaves no alto do platô seguindo por um trecho de drenagem encaixada na borda do platô até o rio Azul.	0.030	24.80	23.50	16.00		4.90	



Fonte: Dados de campo HIDROVIA.

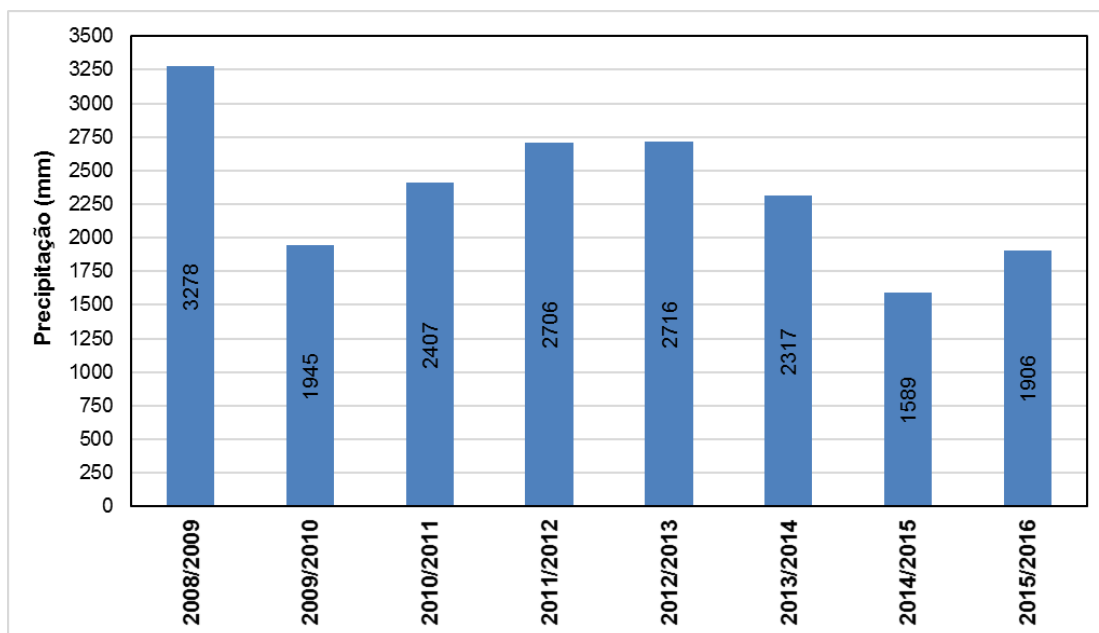




**Figura 2.7** – Distribuição dos pontos de nascentes cadastradas na área de N1/N2 e reconstituição da rede de drenagem.  
Fonte: Dados disponibilizados pela VALE e cadastro de nascente HIDROVIA (2017).



		<b>ELABORAÇÃO DE ESTUDO HIDROGEOLÓGICO NOS PLATÔS DE N1/N2 EM CARAJÁS</b>	
<b>MODELO HIDROGEOLÓGICO CONCEITUAL E NUMÉRICO</b>  <b>RELATÓRIO TÉCNICO EIA</b>		Nº VALE -	PÁGINA <b>22/92</b>
		Nº CONTRATADA -	REV. <b>1</b>



**Figura 2.8** – Distribuição das precipitações anuais conforme ano hidrológico.

Fonte: Dados disponibilizados pela VALE da Estação N5W.

### 2.2.3.2 Piezômetros



Dados fornecidos pela VALE revelam a presença de 10 piezômetros no alto do platô N1 (Tabela 2.5). Estes pontos de monitoramento foram instalados em 2008, tratando-se de furos de sondagem inclinados (70° a 75°) transformados em piezômetros, tendo revestimento em tubo PVC branco de 1 polegada de diâmetro.

**Tabela 2.5** – Relação dos pontos antigos de monitoramento piezométrico na área do platô N1.

Nome	UTM-E (m)	UTM-N (m)	Cota (m)	Cota Média do NA (m)
FS-57	580.026	9.333.212	717	634
FS-58	579.870	9.333.088	710	638
FS-62	580.057	9.333.492	769	695
FS-63	579.901	9.333.368	743	679
FS-65	579.590	9.333.121	709	667
FS-83	579.029	9.333.138	702	687
FS-182	578.317	9.334.398	681	609
FS-188	576.010	9.335.377	635	-
FS-194	577.482	9.335.776	673	608
FS-206	579.095	9.333.744	695	657

Fonte: Compilação de dados fornecidos pela VALE.



O monitoramento nestes pontos foi executado preventivamente com o objetivo de reconhecer o comportamento da dinâmica natural das oscilações de cota da água subterrânea em função das variações sazonais, visto que não existe um sistema de rebaixamento ou poços de abastecimento interferentes nas proximidades. Os dados disponíveis são do período entre 10/2008 e 12/2013 (Tabela 2.6 e Figura 2.10). Dados mais recentes não foram disponibilizados.

		<b>ELABORAÇÃO DE ESTUDO HIDROGEOLÓGICO NOS PLATÔS DE N1/N2 EM CARAJÁS</b>	
<b>MODELO HIDROGEOLÓGICO CONCEITUAL E NUMÉRICO</b>  <b>RELATÓRIO TÉCNICO EIA</b>		Nº VALE -	PÁGINA <b>23/92</b>
		Nº CONTRATADA -	REV. <b>1</b>

**Tabela 2.6 – Variação das cotas de NA dos piezômetros instalados em furos de sondagem (mNM)**

Data	FS-57	FS-58	FS-62	FS-63	FS-65	FS-83	FS-182	FS-188	FS-194	FS-206
out-08	633.3	634.6	693.6	675.4	663.0	687.0	609.5		611.6	657.1
nov-08		637.5		678.3	666.0	685.7	608.0		611.6	655.8
dez-08		637.4		678.9	666.0	687.6	607.8		611.6	656.0
jan-09		636.6		679.1	665.6	687.4	607.1		611.6	656.1
fev-09		637.5		679.7	666.0	688.0	608.1		611.6	656.5
mar-09		636.8		679.8	665.7	689.4	607.3		611.6	656.5
abr-09		637.0		681.5	665.9	689.8	608.4		611.8	657.1
mai-09		637.2		681.8	666.0	689.7	609.4		613.0	657.6
jun-09		637.7		682.4	666.4	689.9	611.0		612.9	658.3
jul-09		637.1		680.7	665.1	687.4	611.8		608.0	656.8
jul-09		637.5		679.7	666.2	686.3	610.9		605.6	658.0
ago-09		637.7		678.6	666.2	685.7	611.6		604.6	657.6
set-09		637.6		678.0	666.2	686.5	611.0		604.6	657.2
out-09		637.6		677.7	666.2	685.6	610.4		605.3	656.7
nov-09		637.4		677.7	666.2	686.1	609.7			656.5
dez-09		637.3		678.7	666.4	689.1	609.3			656.6
jan-10		637.5		679.0	666.3	690.1	610.0		605.8	656.5
mar-10		638.6		680.4	667.1	688.6	610.7			657.6
abr-10		638.1		679.8	666.9	688.3	609.4		605.6	657.4
mai-10		638.4		679.9	666.9	688.4	609.3		607.0	657.5
jun-10		637.9		679.7	666.0	687.6	609.0		606.3	656.4
jul-10		637.9		678.5	666.9	685.7	610.6		605.8	657.1
ago-10		637.6		677.9	666.2	684.4	609.1		605.5	656.5
set-10		637.7		677.6	666.9	684.5	609.3		605.4	656.2
out-10	633.8	637.5	696.6	677.7	666.5	685.7	608.4		605.6	655.8
nov-10		637.4		677.9	666.4	686.7	607.8		605.5	655.8
jan-11		637.6		678.2	666.6	687.9	608.1		604.8	656.3
jan-11		637.4		678.1	666.4	687.7	607.9			656.2
mar-11		637.7		678.6	667.0	688.1	608.2			656.4
abr-11	633.6	639.7		680.0	667.0	689.8	610.7			657.8
mai-11		637.5		681.7	666.8	689.0	610.7			658.0
jun-11		638.6		681.1	667.1	687.3	611.9			658.1
jul-11		638.6		679.9	667.1	686.1	611.9			657.8
ago-11		638.1		679.7	666.8	686.0	610.9			657.5
set-11		637.9		678.0	666.7	684.4	610.0			656.6
out-11		638.1		678.7	667.1	686.7	610.0			656.6
dez-11		637.8		678.6	666.9	686.1	610.8			656.5
abr-12		638.1		679.3	667.5	686.8	611.9			657.6
mai-12		637.8		679.0	666.9	687.4	610.3			657.5
jun-12		637.7		678.9	666.5	686.5	609.9			657.2
jul-12		638.4		678.9	666.9	685.8	608.7			656.3
set-12		638.1		676.7	666.8	685.7	609.0			655.8
set-12		637.9		676.4	666.8	685.6	608.8			655.3
out-12		639.1		678.3	667.2	685.4	608.3			656.0
nov-12		639.1		677.4	667.2	685.4	606.5			655.6
jan-13		638.8		676.5	667.2	684.9	606.0			655.1
fev-12		638.9		674.9	667.3	689.2	607.9			656.4
mar-13		637.6		674.6	666.5	687.3	606.3			655.2
abr-13		638.8		678.2	667.3	688.2	611.2			658.1
mai-13		639.6		680.0	667.2	688.1				657.5
jun-13		639.4		682.9	667.3	688.5				657.6
jul-13		639.5		681.2	667.2	687.9				657.5
ago-13		640.1		679.8	667.2	686.3				657.2
set-13		639.8		678.9	667.2	686.1				656.8
out-13		639.8		678.7	667.2	684.7				656.4
nov-13		639.7		678.6	667.2	684.8				656.0
dez-13		639.0		678.0	667.1	685.3				655.7

Fonte: Compilação de dados fornecidos pela VALE.

		<b>ELABORAÇÃO DE ESTUDO HIDROGEOLÓGICO NOS PLATÔS DE N1/N2 EM CARAJÁS</b>	
<b>MODELO HIDROGEOLÓGICO CONCEITUAL E NUMÉRICO</b>  <b>RELATÓRIO TÉCNICO EIA</b>		Nº VALE -	PÁGINA <b>24/92</b>
		Nº CONTRATADA -	REV. <b>1</b>

Em 2018 foram instalados mais 09 piezômetros na área do platô N1 e 4 em N2, cujas informações estão apresentadas na Tabela 2.7. Estes dispositivos não apresentam dados de monitoramento contínuo, porém o valor de nível d'água registrado em campo foi utilizado como referência no processo de calibração. O instrumento PZ-01 não foi instalado pois o furo de sondagem se encontrava seco no momento da perfuração. Os instrumentos PZ-06 e N2-PZ-07 se encontravam secos durante a visita de campo.

**Tabela 2.7** – Relação dos novos pontos de monitoramento piezométrico na área dos platôs N1 e N2

Nome	UTM-E (m)	UTM-N (m)	Cota do terreno (mNM)	Cota Média do NA (mNM)
PZ-01	577.318	9.334.895	680	Seco
PZ-02	576.757	9.334.964	676	613
PZ-03	578.514	9.334.180	684	599
PZ-04	578.551	9.333.321	678	651
PZ-05	579.323	9.333.924	721	665
PZ-06	579.918	9.333.508	753	Seco
PZ-07	580.140	9.332.912	731	648
PZ-08	580.146	9.332.663	759	649
PZ-09	580.151	9.332.413	770	647
PZ-10	579.116	9.331.197	656	652
N2-PZ-01	582700	9.330.800	666	597
N2-PZ-02	583.100	9.330.600	675	611
N2-PZ-05	583.368	9.330.493	712	Seco
N2-PZ-07	583.463	9.330.437	712	585

Fonte: Dados fornecidos pela VALE.



A distribuição espacial destes dispositivos pode ser visualizada na Figura 2.9.

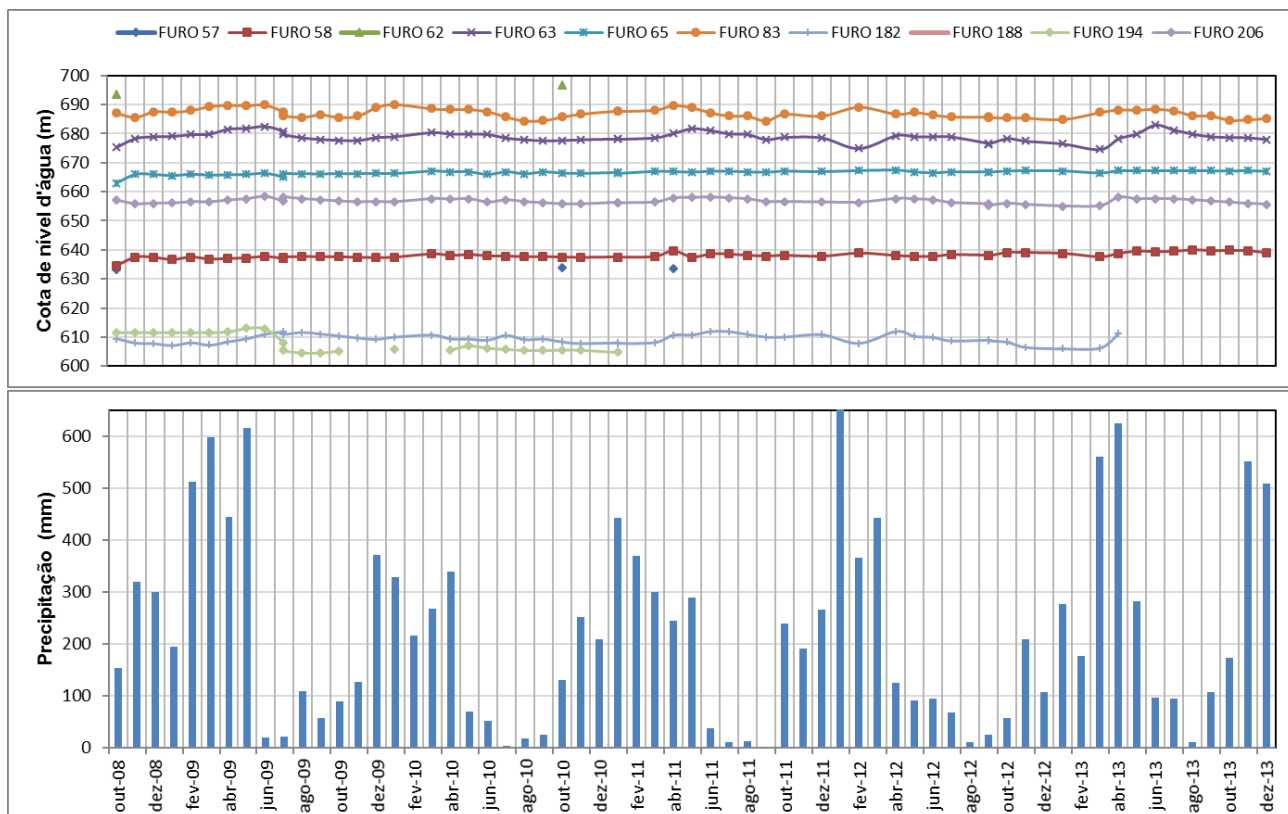
Os dados disponíveis de precipitação pluviométrica da estação da mina de N5W foram apresentados juntamente ao gráfico de cota do nível d'água nos piezômetros mais antigos (Figura 2.10), revelando que os níveis d'água subterrânea apresentados variam naturalmente com a precipitação, visto que não existe um sistema de rebaixamento ou poços de abastecimento interferentes nas proximidades. A amplitude média de variação sazonal da profundidade do nível d'água subterrânea é 5 metros, sendo mais pronunciada nos furos 63 e 83.







		<b>ELABORAÇÃO DE ESTUDO HIDROGEOLÓGICO NOS PLATÔS DE N1/N2 EM CARAJÁS</b>	
<b>MODELO HIDROGEOLÓGICO CONCEITUAL E NUMÉRICO</b>  <b>RELATÓRIO TÉCNICO EIA</b>		Nº VALE -	PÁGINA <b>26/92</b>
		Nº CONTRATADA -	REV. <b>1</b>



**Figura 2.10 – Padrão de variação da cota de nível da água subterrânea no alto do Platô N1.**

Fonte: Dados disponibilizados pela VALE.

### 2.2.3.3 Régua linimétrica



Dados fornecidos pela VALE revelam o monitoramento através de régua linimétrica de 6 lagoas intermitentes no alto do platô N1 (Figura 2.9), conforme dados de localização apresentados na Tabela 2.8. Os dados disponíveis de oscilação de cotas de nível da água nas lagoas são do período entre 05/2006 e 05/2017 (Tabela 2.9). Dados mais recentes não foram disponibilizados.

**Tabela 2.8 – Relação dos pontos de monitoramento das lagoas na área do platô N1.**

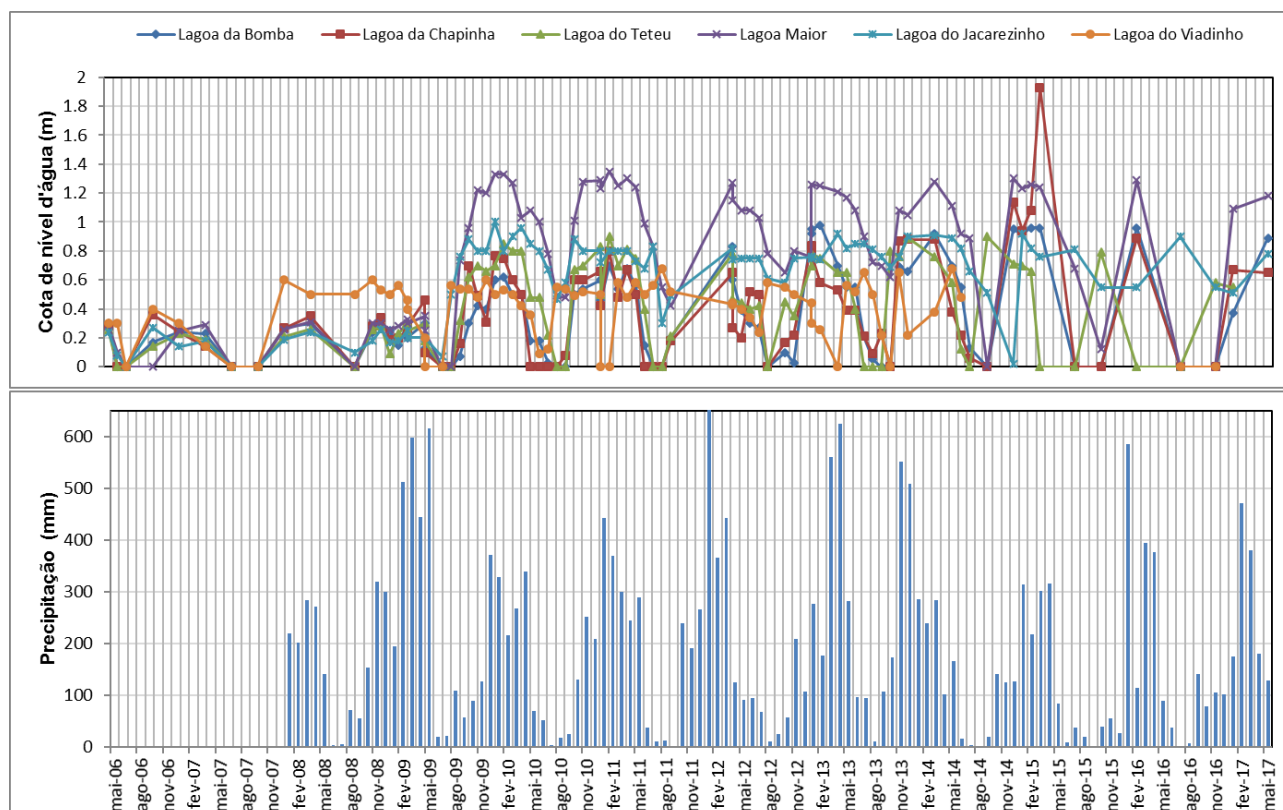
Nome	UTM-E (m)	UTM-N (m)	Cota (mNM)
Lagoa da Bomba	579.292	9.333.469	713
Lagoa da Chapinha	578.819	9.333.958	709
Lagoa do Teteu	578.547	9.333.302	683
Lagoa Maior	578.341	9.333.648	682
Lagoa do Jacarezinho	579.652	9.332.932	714
Lagoa do Viadinho	577.892	9.335.150	672

Fonte: Dados disponibilizados pela VALE.

Pela Figura 2.11 percebe-se nitidamente o caráter intermitente destes corpos hídricos expresso no pico do período seco, próximo aos meses de outubro e setembro. Acredita-se que tais lagoas sejam exclusivamente pluviais, ainda que seu regime de manutenção seja

		<b>ELABORAÇÃO DE ESTUDO HIDROGEOLÓGICO NOS PLATÔS DE N1/N2 EM CARAJÁS</b>	
<b>MODELO HIDROGEOLÓGICO CONCEITUAL E NUMÉRICO</b>  <b>RELATÓRIO TÉCNICO EIA</b>		Nº VALE -	PÁGINA <b>27/92</b>
		Nº CONTRATADA -	REV. <b>1</b>

plurianual, e que em alguns casos nunca seque completamente devido ao alto índice de precipitação pluviométrica na região.





**Figura 2.11 – Padrão de variação da cota de nível da água nas lagoas no alto do Platô N1.**

Fonte: Dados disponibilizados pela VALE.

**Tabela 2.9 – Variação da altura da lâmina d'água (m) de réguas linimétricas em lagoas do platô N1**



Data	Lagoa da Bomba	Lagoa da Chapinha	Lagoa do Teteu	Lagoa Maior	Lagoa do Jacarezinho	Lagoa do Viadinho
mai-06	0.3	0.3	0.3	0.3	0.2	0.3
jun-06	0.0	0.0	0.0	0.1	0.1	0.3
jul-06	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
out-06	0.2	0.4	0.1	0.0	0.3	0.4
jan-07	0.2	0.2	0.2	0.3	0.1	0.3
abr-07	0.2	0.1	0.2	0.3	0.2	0.1
jul-07	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
out-07	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
jan-08	0.3	0.3	0.2	0.3	0.2	0.6
abr-08	0.3	0.4	0.3	0.3	0.2	0.5
set-08	0.0	0.0	0.0	0.0	0.1	0.5
nov-08	0.2	0.3	0.3	0.3	0.2	0.6
dez-08	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.5
jan-09	0.3	0.2	0.1	0.3	0.2	0.5
fev-09	0.2	0.2	0.2	0.3	0.2	0.6
mar-09	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.5
mar-09	0.2	0.3	0.3	0.3	0.2	0.4
mai-09	0.3	0.5	0.3	0.4	0.2	0.2
mai-09	0.1	0.1	0.2	0.3	0.2	0.0
jul-09	0.0	0.0	0.0	0.0	0.1	0.0
ago-09	0.0	0.0	0.0	0.0	0.5	0.6
set-09	0.1	0.2	0.3	0.7	0.8	0.5

		<b>ELABORAÇÃO DE ESTUDO HIDROGEOLÓGICO NOS PLATÔS DE N1/N2 EM CARAJÁS</b>	
<b>MODELO HIDROGEOLÓGICO CONCEITUAL E NUMÉRICO</b>  <b>RELATÓRIO TÉCNICO EIA</b>		Nº VALE -	PÁGINA <b>28/92</b>
		Nº CONTRATADA -	REV. <b>1</b>

Data	Lagoa da Bomba	Lagoa da Chapinha	Lagoa do Teteu	Lagoa Maior	Lagoa do Jacarezinho	Lagoa do Viadinho
out-09	0.3	0.7	0.6	1.0	0.9	0.5
nov-09	0.4	0.5	0.7	1.2	0.8	0.5
dez-09	0.4	0.3	0.7	1.2	0.8	0.6
jan-10	0.6	0.8	0.7	1.3	1.0	0.5
fev-10	0.6	0.8	0.9	1.3	0.8	0.5
mar-10	0.5	0.6	0.8	1.3	0.9	0.5
abr-10	0.5	0.5	0.8	1.0	1.0	0.4
mai-10	0.2	0.0	0.5	1.1	0.9	0.4
jun-10	0.2	0.0	0.5	1.0	0.8	0.1
jul-10	0.0	0.0	0.2	0.8	0.7	0.1
ago-10	0.0	0.0	0.0	0.5	0.5	0.6
set-10	0.0	0.1	0.0	0.5	0.6	0.5
out-10	0.5	0.6	0.7	1.0	0.9	0.5
nov-10	0.5	0.6	0.7	1.3	0.8	0.5
jan-11	0.6	0.7	0.8	1.3	0.8	0.5
jan-11	0.5	0.4	0.5	1.2	0.7	0.0
fev-11	0.7	0.8	0.9	1.4	0.8	0.0
mar-11	0.5	0.5	0.7	1.3	0.8	0.6
abr-11	0.7	0.7	0.8	1.3	0.8	0.5
mai-11	0.6	0.5	0.8	1.2	0.7	0.6
jun-11	0.2	0.0	0.4	1.0	0.7	0.5
jul-11	0.0	0.0	0.0	0.8	0.8	0.6
ago-11	0.0	0.0	0.0	0.6	0.3	0.7
set-11	0.2	0.2	0.2	0.4	0.5	0.5
abr-12	0.8	0.7	0.8	1.3	0.8	0.4
abr-12	0.6	0.3	0.5	1.2	0.7	0.4
mai-12	0.4	0.2	0.4	1.1	0.8	0.4
jun-12	0.3	0.5	0.4	1.1	0.8	0.3
jul-12	0.3	0.5	0.4	1.0	0.8	0.2
ago-12	0.0	0.0	0.0	0.8	0.6	0.6
out-12	0.1	0.2	0.5	0.7	0.6	0.6
nov-12	0.0	0.2	0.4	0.8	0.8	0.5
jan-13	0.9	0.8	0.7	0.8	0.8	0.4
jan-13	1.0	0.8	0.8	1.3	0.8	0.3
fev-13	1.0	0.6	0.8	1.3	0.7	0.3
abr-13	0.7	0.5	0.7	1.2	0.9	0.0
mai-13	0.6	0.4	0.7	1.2	0.8	0.6
jun-13	0.6	0.4	0.4	1.1	0.9	0.5
jul-13	0.2	0.2	0.0	0.9	0.9	0.7
ago-13	0.1	0.1	0.0	0.7	0.8	0.5
set-13	0.0	0.2	0.0	0.7	0.8	0.2
out-13	0.0	0.0	0.8	0.6	0.7	0.0
nov-13	0.7	0.9	0.8	1.1	0.8	0.7
dez-13	0.7	0.9	0.9	1.1	0.9	0.2
mar-14	0.9	0.9	0.8	1.3	0.9	0.4
mai-14	0.7	0.4	0.6	1.1	0.9	0.7
jun-14	0.6	0.2	0.1	0.9	0.8	0.5
jul-14	0.1	0.1	0.0	0.9	0.7	
set-14	0.0	0.0	0.9	0.0	0.5	
dez-14	1.0	1.1	0.7	1.3	0.0	
jan-15	0.9	0.9	0.7	1.2	0.9	
fev-15	1.0	1.1	0.7	1.3	0.8	
mar-15	1.0	1.9	0.0	1.2	0.8	
jul-15	0.0	0.0	0.0	0.7	0.8	
out-15	0.0	0.0	0.8	0.1	0.6	
fev-16	1.0	0.9	0.0	1.3	0.6	
jul-16	0.0	0.0	0.0	0.0	0.9	0.0
nov-16	0.0	0.0	0.6	0.0	0.6	0.0
jan-17	0.4	0.7	0.6	1.1	0.5	
mai-17	0.9	0.7		1.2	0.8	

Fonte: Dados disponibilizados pela VALE.



		<b>ELABORAÇÃO DE ESTUDO HIDROGEOLÓGICO NOS PLATÔS DE N1/N2 EM CARAJÁS</b>	
<b>MODELO HIDROGEOLÓGICO CONCEITUAL E NUMÉRICO</b> <b>RELATÓRIO TÉCNICO EIA</b>		Nº VALE -	PÁGINA <b>29/92</b>
		Nº CONTRATADA -	REV. <b>1</b>

#### 2.2.4 Ensaios de infiltração em canga

Foram realizados 12 ensaios de infiltração nos diferentes tipos de canga presentes em N1 e N2 com o intuito de avaliar as taxas de infiltração e verificar se há diferenças entre estas nos platôs. Os ensaios de infiltração foram realizados por meio de infiltrômetro de duplo anel, conforme metodologia apresentada em relatório específico. A Figura 2.12 mostra localização dos pontos ensaiados.



As anotações das leituras dos níveis de água foram registradas em planilha, e com os dados dos valores de rebaixamento, associados ao tempo, foi possível calcular as taxas de infiltração e valores de condutividade hidráulica vertical de cada ensaio. A Tabela 2.10 apresenta os valores de infiltração acumulada de cada ensaio e a Tabela 2.11 apresenta as taxas de infiltração calculadas para cada ponto onde foi realizado o ensaio. Esta tabela apresenta, também, os valores de taxa de infiltração inicial e taxa de infiltração básica para as cangas estudadas. Para a taxa de infiltração inicial optou-se por desconsiderar os valores iniciais iguais a zero. A Figura 2.13 contém o gráfico das taxas de infiltração por ponto ensaiado e a Figura 2.14 apresenta o mesmo gráfico, porém com simbologia que diferencia os tipos de canga.

A curva da canga química hematítica do ponto EP-03 é a que apresenta o comportamento mais próximo ao ideal, com maior taxa de infiltração no início, tendendo a um valor constante final para a taxa de infiltração básica em torno de  $1,14 \times 10^{-4}$  cm/s. O outro ensaio realizado sobre esse tipo de canga, EP-04, indicou valores bastante baixos, com taxa de infiltração básica igual a  $2,80 \times 10^{-6}$  cm/s. Tal taxa de infiltração baixa quando comparada ao ponto EP-03 poderia ser explicada pela maior proximidade com a lagoa e maior quantidade de argila e matéria orgânica que obstruiriam parcialmente os poros.

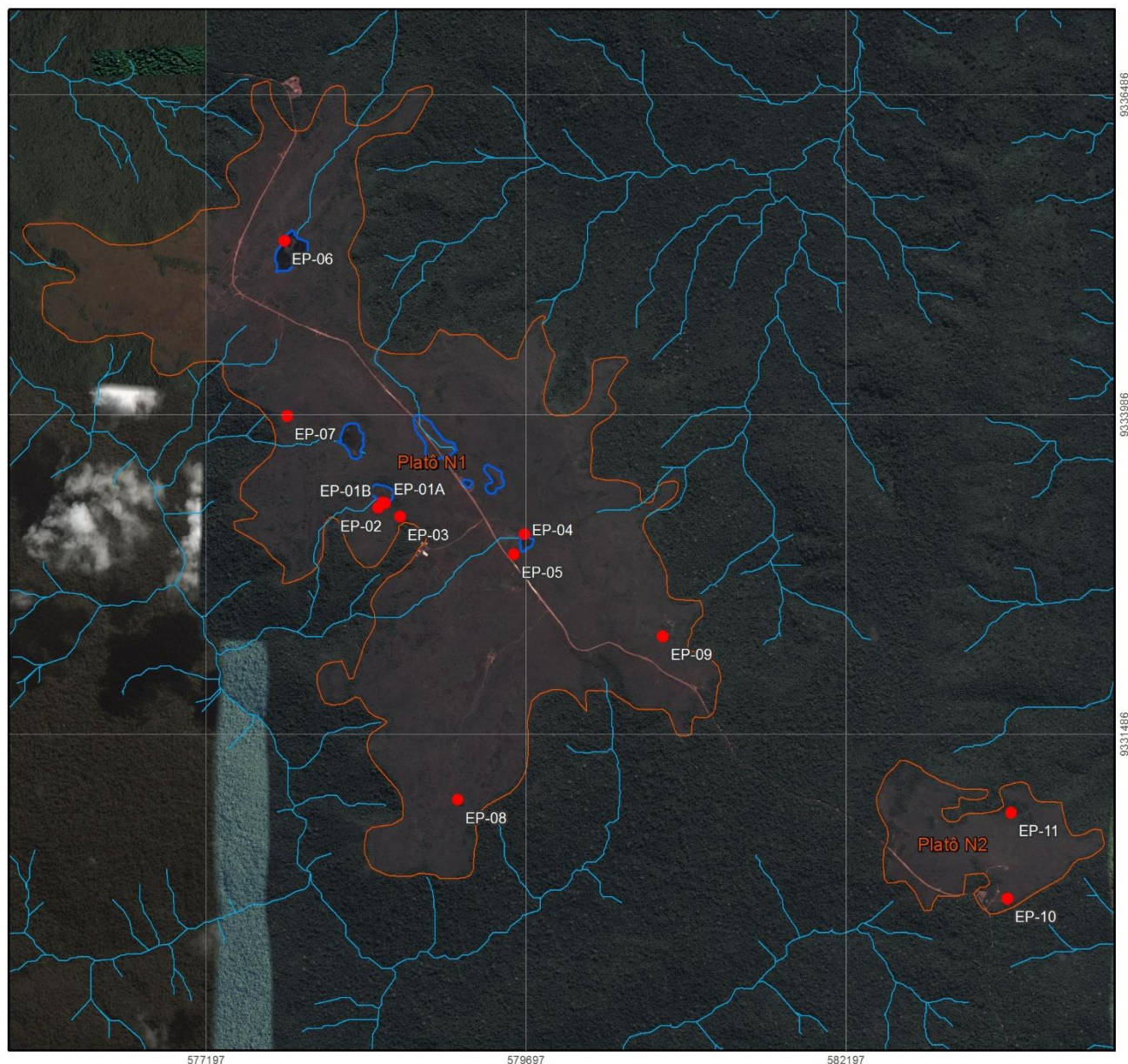
**Tabela 2.10** - Valores de infiltração acumulada de cada ensaio

Tempo (min)	Infiltração acumulada (cm)											
	EP-01 A	EP-01 B	EP-02	EP-03	EP-04	EP-05	EP-06	EP-07	EP-08	EP-09	EP-10	EP-11
0	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
3	0.00	0.00	0.00	0.10	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
5	0.00	0.00	0.00	0.10	0.00	0.00	0.00	0.00	0.10	0.15	0.00	0.00
10	0.00	0.00	0.00	0.15	0.00	0.00	0.00	0.10	0.20	0.30	0.00	0.00
15	0.00	0.00	0.05	0.20	0.00	0.00	0.00	0.10	0.30	0.45	0.00	0.00
20	0.00	0.00	0.10	0.25	0.00	0.00	0.05	0.10	0.40	0.60	0.00	0.00
30	0.05	0.00	0.10	0.30	0.00	0.00	0.05	0.15	0.50	1.00	0.00	0.00
40	0.10	0.05	0.20	0.30	0.00	0.05	0.05	0.20	0.60	1.25	0.00	0.00
45	0.10	0.05	0.20	0.35	0.00	0.05	0.05	0.20	0.70	1.50	0.00	0.00
50	0.10	0.05	0.20	0.40	0.00	0.05	0.05	0.20	0.75	1.65	0.00	0.00
60	0.10	0.05	0.30	0.40	0.01	0.10	0.05	0.25	0.80	1.80	0.01	0.01
70	0.13	0.05	0.37	0.47		0.10		0.27	0.90	2.20		
75	0.17	0.05	0.43	0.53		0.10		0.28	1.00			
90	0.20	0.05	0.50	0.60		0.10		0.30	1.10			
120	0.30	0.15	0.70			0.10		0.30	1.20			
180	0.50											

Fonte: Interpretação de dados de campo.

		<b>ELABORAÇÃO DE ESTUDO HIDROGEOLÓGICO NOS PLATÔS DE N1/N2 EM CARAJÁS</b>	
<b>MODELO HIDROGEOLÓGICO CONCEITUAL E NUMÉRICO</b>  <b>RELATÓRIO TÉCNICO EIA</b>		Nº VALE -	PÁGINA <b>30/92</b>
		Nº CONTRATADA -	REV. <b>1</b>

### Pontos de Teste de Infiltração



### Mapa Localização



### Legendas



- Pontos de teste de infiltração
- Drenagem
- Limite das Lagoas
- Limites dos Platôs N1 e N2

0 0.375 0.75 1.5  
km



Projeção: Universal Transversa de Mercator (UTM)  
Datum: South American Datum, 1969  
Fuso: 22S

**Figura 2.12 – Localização dos ensaios de infiltração em canga.**

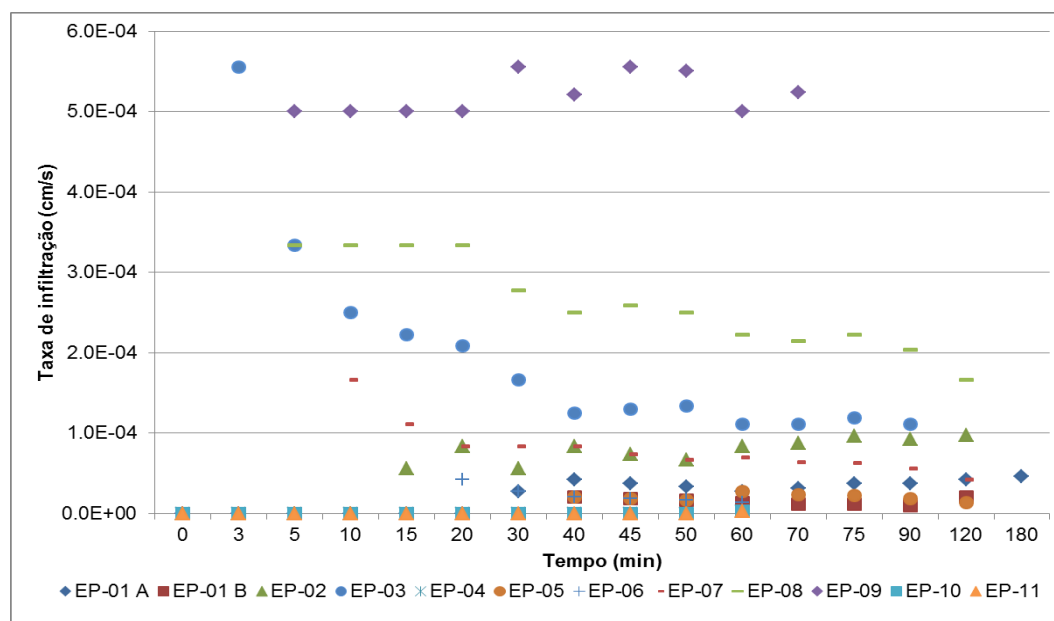
		<b>ELABORAÇÃO DE ESTUDO HIDROGEOLÓGICO NOS PLATÔS DE N1/N2 EM CARAJÁS</b>	
<b>MODELO HIDROGEOLÓGICO CONCEITUAL E NUMÉRICO</b>  <b>RELATÓRIO TÉCNICO EIA</b>		Nº VALE -	PÁGINA <b>31/92</b>
		Nº CONTRATADA -	REV. <b>1</b>

De forma geral, a canga detrítica foi o tipo que apresentou valores mais regulares e baixos, que variam entre  $4,17 \times 10^{-5}$  cm/s e  $2,78 \times 10^{-6}$  cm/s. Esse comportamento se deve à deposição de sedimentos finos em camadas horizontais, as quais favorecem o fluxo horizontal em detrimento do vertical, avaliado nesses ensaios. O ensaio no ponto EP-01B foi realizado na interseção de duas famílias de fraturas e apresentou taxa de infiltração baixa, o que indica que tais estruturas, embora bastante presentes e contínuas, encontram-se seladas ou são apenas superficiais, tendo pouca importância o fluxo vertical na área das lagoas.

**Tabela 2.11 - Taxa de infiltração calculada**

Tempo (min)	Taxa de infiltração (cm/s)											
	EP-01 A	EP-01 B	EP-02	EP-03	EP-04	EP-05	EP-06	EP-07	EP-08	EP-09	EP-10	EP-11
0	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00
3	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	5.6E-04	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00
5	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	3.3E-04	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	3.3E-04	5.0E-04	0.0E+00	0.0E+00
10	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	2.5E-04	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	1.7E-04	3.3E-04	5.0E-04	0.0E+00	0.0E+00
15	0.0E+00	0.0E+00	5.6E-05	2.2E-04	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	1.1E-04	3.3E-04	5.0E-04	0.0E+00	0.0E+00
20	0.0E+00	0.0E+00	8.3E-05	2.1E-04	0.0E+00	0.0E+00	4.2E-05	8.3E-05	3.3E-04	5.0E-04	0.0E+00	0.0E+00
30	2.8E-05	0.0E+00	5.6E-05	1.7E-04	0.0E+00	0.0E+00	2.8E-05	8.3E-05	2.8E-04	5.6E-04	0.0E+00	0.0E+00
40	4.2E-05	2.1E-05	8.3E-05	1.3E-04	0.0E+00	2.1E-05	2.1E-05	8.3E-05	2.5E-04	5.2E-04	0.0E+00	0.0E+00
45	3.7E-05	1.9E-05	7.4E-05	1.3E-04	0.0E+00	1.9E-05	1.9E-05	7.4E-05	2.6E-04	5.6E-04	0.0E+00	0.0E+00
50	3.3E-05	1.7E-05	6.7E-05	1.3E-04	0.0E+00	1.7E-05	1.7E-05	6.7E-05	2.5E-04	5.5E-04	0.0E+00	0.0E+00
60	2.8E-05	1.4E-05	8.3E-05	1.1E-04	2.8E-06	2.8E-05	1.4E-05	6.9E-05	2.2E-04	5.0E-04	2.8E-06	2.8E-06
70	3.2E-05	1.2E-05	8.7E-05	1.1E-04		2.4E-05		6.3E-05	2.1E-04	5.2E-04		
75	3.7E-05	1.1E-05	9.6E-05	1.2E-04		2.2E-05		6.3E-05	2.2E-04			
90	3.7E-05	9.3E-06	9.3E-05	1.1E-04		1.9E-05		5.6E-05	2.0E-04			
120	4.2E-05	2.1E-05	9.7E-05			1.4E-05		4.2E-05	1.7E-04			
180	4.6E-05											
Taxa Inicial	2.78E-05	2.08E-05	5.56E-05	5.56E-04	2.78E-06	4.17E-05	4.17E-05	1.67E-04	3.33E-04	5.00E-04	2.78E-06	2.78E-06
Taxa Básica	4.17E-05	1.37E-05	9.54E-05	1.14E-04	2.78E-06	1.82E-05	1.64E-05	5.34E-05	1.98E-04	5.25E-04	2.78E-06	2.78E-06



Fonte: Interpretação de dados de campo.

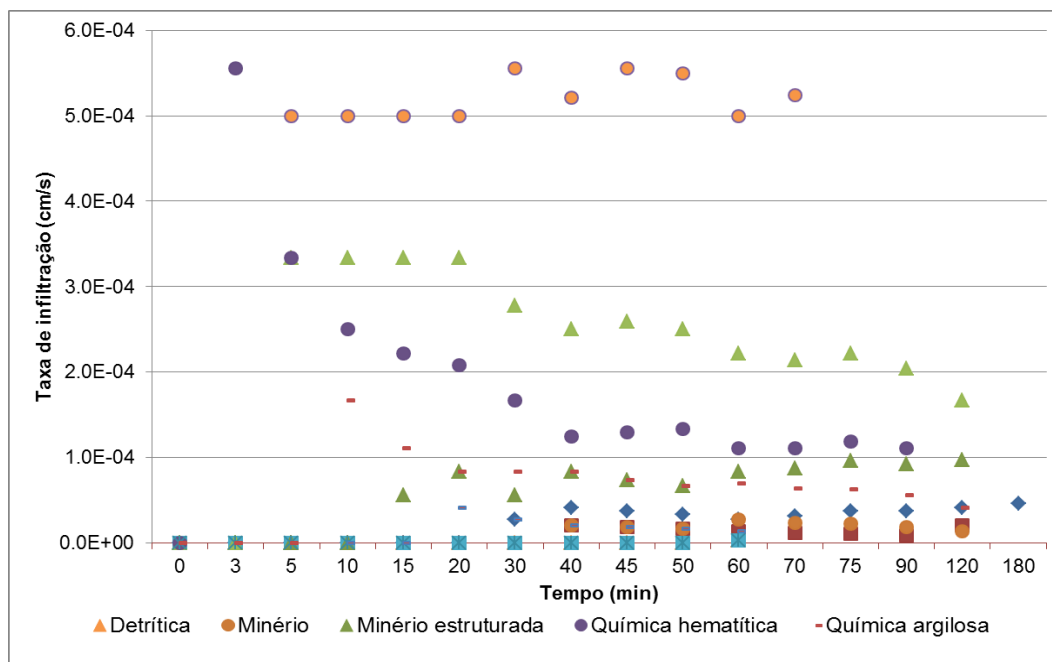


**Figura 2.13 - Taxa de infiltração dos pontos ensaiados.**

Fonte: Interpretação de dados de campo.



		<b>ELABORAÇÃO DE ESTUDO HIDROGEOLÓGICO NOS PLATÔS DE N1/N2 EM CARAJÁS</b>	
<b>MODELO HIDROGEOLÓGICO CONCEITUAL E NUMÉRICO</b>  <b>RELATÓRIO TÉCNICO EIA</b>		Nº VALE -	PÁGINA <b>32/92</b>
		Nº CONTRATADA -	REV. <b>1</b>



**Figura 2.14 - Taxa de infiltração por tipo de canga.**



Fonte: Interpretação de dados de campo.

Os valores de taxa de infiltração básica da canga química argilosa mostraram-se igualmente baixos, entre  $1,64 \times 10^{-5}$  cm/s e  $5,34 \times 10^{-5}$  cm/s. Esse material, embora bastante poroso quando analisado em superfície, apresenta baixa conectividade dentre os poros, o que dificulta a infiltração da água.

Dentre os pontos ensaiados, a canga de minério estruturada apresentou valores medianos e que mostraram tendência a se estabilizar em torno de  $1,46 \times 10^{-4}$  cm/s, valor de taxa de infiltração básica mais alto quando considerados os ensaios por tipo de canga. Isso se deve à existência do bandamento subvertical, no qual o fluxo vertical é favorecido.

Por fim, nos pontos ensaiados sobre a canga de minério, a taxa de infiltração se manteve constante, com oscilação entre um valor médio e não decrescendo como a maioria dos tipos de canga. Quando avaliadas em conjunto, as taxas de infiltração básica apresentaram maior amplitude, sendo  $5,25 \times 10^{-4}$  cm/s para o ponto EP-09 a maior taxa observada e  $2,78 \times 10^{-6}$  cm/s a menor dentre elas e dentre todos os pontos ensaiados. O ponto EP-09 está situado junto à borda do platô N1 e próximo a uma zona de cisalhamento e de outras estruturas que poderiam favorecer fluxo de água, tanto na vertical como na horizontal.

Para efeito de comparação, foram calculadas as condutividades hidráulicas verticais de acordo com a metodologia apresentada por FIORI (2010). Esses valores são apresentados na Tabela 2.12. Para realizar o cálculo é necessário que haja variação de nível de água em relação ao tempo. Assim, na tabela abaixo são apresentados os valores de condutividade hidráulica de cada intervalo da variação do nível de água, e valores de condutividade hidráulica com a variação do nível de água acumulada.

		<b>ELABORAÇÃO DE ESTUDO HIDROGEOLÓGICO NOS PLATÔS DE N1/N2 EM CARAJÁS</b>	
<b>MODELO HIDROGEOLÓGICO CONCEITUAL E NUMÉRICO</b>  <b>RELATÓRIO TÉCNICO EIA</b>		Nº VALE -	PÁGINA <b>33/92</b>
		Nº CONTRATADA -	REV. <b>1</b>

**Tabela 2.12 - Condutividade hidráulica obtida por meio dos ensaios de infiltração**

EP-01 A			
Tempo (min.)	Variação do nível de água (cm)	K (cm/s) intervalo	K (cm/s) acumulado
0	0.00		
30	0.05	2.7E-05	2.7E-05
40	0.10	7.8E-05	4.0E-05
90	0.20	2.9E-05	3.4E-05
120	0.30	4.4E-05	3.6E-05
180	0.50	4.0E-05	3.8E-05
Média		4.4E-05	3.5E-05

EP-01 B			
Tempo (min.)	Variação do nível de água (cm)	K (cm/s) intervalo	K (cm/s) acumulado
0	0.00		
40	0.05	2.0E-05	2.0E-05
120	0.15	1.9E-05	1.9E-05
Média		2.0E-05	2.0E-05

EP-02			
Tempo (min.)	Variação do nível de água (cm)	K (cm/s) intervalo	K (cm/s) acumulado
0	0.00		
30	0.10	5.3E-05	5.3E-05
50	0.20	7.3E-05	6.1E-05
60	0.30	1.3E-04	7.3E-05
90	0.50	8.0E-05	7.5E-05
120	0.70	7.0E-05	7.4E-05
Média		8.2E-05	6.7E-05

EP-03			
Tempo (min.)	Variação do nível de água (cm)	K (cm/s) intervalo	K (cm/s) acumulado
0	0.00		
5	0.10	3.2E-04	3.2E-04
10	0.15	1.5E-04	2.3E-04
15	0.20	1.4E-04	2.0E-04
20	0.25	1.4E-04	1.9E-04
40	0.30	3.3E-05	1.1E-04
60	0.40	6.2E-05	9.3E-05
90	0.60	7.4E-05	8.7E-05
Média		1.3E-04	1.8E-04

EP-04			
Tempo (min.)	Variação do nível de água (cm)	K (cm/s) intervalo	K (cm/s) acumulado
0	0.00		
60	0.01	2.8E-06	2.8E-06
Média		2.8E-06	2.8E-06

EP-05			
Tempo (min.)	Variação do nível de água (cm)	K (cm/s) intervalo	K (cm/s) acumulado
0	0.00		
40	0.05	2.0E-05	2.0E-05
60	0.10	3.9E-05	2.6E-05
Média		3.0E-05	2.3E-05

EP-06			
Tempo (min.)	Variação do nível de água (cm)	K (cm/s) intervalo	K (cm/s) acumulado
0	0.00		
20	0.05	4.1E-05	4.1E-05
Média		4.1E-05	4.1E-05

EP-07			
Tempo (min.)	Variação do nível de água (cm)	K (cm/s) intervalo	K (cm/s) acumulado
0	0.00		
10	0.10	1.6E-04	1.6E-04
30	0.15	3.7E-05	7.8E-05
40	0.20	7.1E-05	7.6E-05
60	0.25	3.4E-05	6.2E-05
120	0.30	1.1E-05	3.6E-05
Média		6.2E-05	8.2E-05



EP-08			
Tempo (min.)	Variação do nível de água (cm)	K (cm/s) intervalo	K (cm/s) acumulado
0	0.00		
10	0.20	3.0E-04	3.0E-04
15	0.30	2.7E-04	2.9E-04
20	0.40	2.5E-04	2.8E-04
30	0.50	1.1E-04	2.3E-04
45	0.70	1.4E-04	2.0E-04
60	0.80	6.4E-05	1.6E-04
120	1.20	5.6E-05	1.1E-04
Média		1.7E-04	2.2E-04

EP-09 A			
Tempo (min.)	Variação do nível de água (cm)	K (cm/s) intervalo	K (cm/s) acumulado
0	0.00		
10	0.30	4.4E-04	4.4E-04
20	0.60	3.5E-04	3.9E-04
45	1.50	3.0E-04	3.4E-04
60	1.80	1.3E-04	2.9E-04
70	2.20	2.2E-04	2.8E-04
Média		2.9E-04	3.5E-04

EP-10			
Tempo (min.)	Variação do nível de água (cm)	K (cm/s) intervalo	K (cm/s) acumulado
0	0.00		
60	0.01	2.8E-06	2.8E-06
Média		2.8E-06	2.8E-06

EP-11			
Tempo (min.)	Variação do nível de água (cm)	K (cm/s) intervalo	K (cm/s) acumulado
0	0.00		
60	0.01	2.8E-06	2.8E-06
Média		2.8E-06	2.8E-06

Fonte: Interpretação de dados de campo.

		<b>ELABORAÇÃO DE ESTUDO HIDROGEOLÓGICO NOS PLATÔS DE N1/N2 EM CARAJÁS</b>	
<b>MODELO HIDROGEOLÓGICO CONCEITUAL E NUMÉRICO</b> <b>RELATÓRIO TÉCNICO EIA</b>		Nº VALE -	PÁGINA <b>34/92</b>
		Nº CONTRATADA -	REV. <b>1</b>

O menor valor encontrado de condutividade hidráulica vertical foi de  $2,80 \times 10^{-7}$  cm/s nos pontos EP-04, EP-10 e EP-11. A maior média de condutividade hidráulica encontrada foi no ponto EP-09 com o valor de  $3,50 \times 10^{-5}$  cm/s, seguidos pelos pontos EP-08 e EP-03, todas na mesma ordem de grandeza.

Quando comparados com os valores obtidos a partir da taxa de infiltração básica, nota-se que esses valores são bastante próximos entre si, estando todos na mesma ordem de grandeza e com pouca diferença nos valores. As maiores diferenças foram observadas nos ensaios realizados nos pontos EP-06 e EP-09. Esses dois ensaios, juntamente àqueles em que a infiltração foi próxima a zero na maior parte do tempo, foram os que tiveram a menor duração, o que poderia explicar essa diferença nos valores. Na Tabela 2.13 é apresentada a comparação entre as taxas de infiltração básica e as médias de condutividade hidráulica calculadas em todos os pontos, juntamente com os respectivos tipos de canga.



**Tabela 2.13** - Taxa de infiltração básica (SELBY, 1993) e média da condutividade hidráulica (FIORI, 2010)

Ponto	Taxa de infiltração básica (cm/s)	Média K (cm/s)	Local	Tipo de canga
EP-01 A	4.2E-05	4.4E-05	N1	Detrítica
EP-01 B	1.4E-05	2.0E-05	N1	Detrítica
EP-02	9.5E-05	8.2E-05	N1	Minério estruturada
EP-03	1.1E-04	1.3E-04	N1	Química hematítica
EP-04	2.8E-06	2.8E-06	N1	Química hematítica
EP-05	1.8E-05	3.0E-05	N1	Minério
EP-06	1.6E-05	4.1E-05	N1	Química argilosa
EP-07	5.3E-05	6.2E-05	N1	Química argilosa
EP-08	2.0E-04	1.7E-04	N1	Minério estruturada
EP-09	5.2E-04	2.9E-04	N1	Minério
EP-10	2.8E-06	2.8E-06	N2	Minério
EP-11	2.8E-06	2.8E-06	N2	Detrítica

Fonte: Interpretação de dados de campo.

#### 2.2.5 Ensaio de infiltração por perda d'água em piezômetros e furos de sondagem

Foram realizadas duas campanhas como parte da atividade de “determinação de parâmetros hidrodinâmicos do aquífero Carajás na área dos platôs N1 e N2”. A primeira campanha foi executada entre os dias 5 e 18 de março de 2018 no platô N1, ao passo que a segunda campanha foi realizada no platô N2, entre os dias 23 e 31 de agosto de 2018. Os resultados destes ensaios forneceram subsídios para a compreensão das condições de circulação da água subterrânea nos platôs, auxiliando na construção do modelo hidrogeológico conceitual.

		<b>ELABORAÇÃO DE ESTUDO HIDROGEOLÓGICO NOS PLATÔS DE N1/N2 EM CARAJÁS</b>	
<b>MODELO HIDROGEOLÓGICO CONCEITUAL E NUMÉRICO</b>  <b>RELATÓRIO TÉCNICO EIA</b>		Nº VALE -	PÁGINA <b>35/92</b>
		Nº CONTRATADA -	REV. <b>1</b>

Foram indicados 10 pontos para instalação de piezômetros e medidores de nível d'água na área do platô N1, sendo associados a estes mais 10 furos rasos, sem revestimento, para ensaios específicos na canga. No platô N2 foram indicados 3 piezômetros, 1 medidor de nível d'água e 4 furos rasos associados. Na primeira campanha foram realizados 17 ensaios em N1, 9 destes em piezômetros e medidores de nível d'água e 8 ensaios em furos rasos. Na segunda campanha foram executados os três ensaios restantes de N1 e os 8 ensaios em N2, 4 destes em piezômetros e medidor de nível d'água e 4 em furos rasos.

No total, foram realizados 28 ensaios de aquífero, sendo 14 ensaios em piezômetros e medidores de nível d'água e 14 ensaios em furos rasos, caracterizados como ensaios de perda de água, para a determinação de parâmetros específicos do aquífero onde as porções de filtro foram instaladas. No caso dos ensaios em canga, onde o nível d'água é temporário ou ausente, o objetivo foi determinar aspectos relacionados à permeabilidade horizontal do meio e seu potencial para a efetivação da recarga. As Tabelas 2.14 e 2.15 contêm as características dos furos de sondagem executados em N1 e N2, respectivamente, e a Figura 2.15 mostra a localização dos furos de sondagem. O Anexo I contém os perfis litológicos e construtivos dos piezômetros e medidores de nível d'água onde foram realizados os ensaios.

**Tabela 2.14 – Piezômetros e furos rasos executados e ensaiados no platô N1.**

Nome	Furo de Sondagem Executado	UTM E (m)	UTM N (m)	Cota do Topo (mNM)	Profundidade proposta (m)	Data de Início	Data de Término	Profundidade Final	Observação
PZ-01	SN1-FH00001	577318	9334895	672	80	15/11/2017	17/11/2017	80.85	Seco
PZ-02	SN1-FH00004	576757	9334964	669	90	22/11/2017	01/12/2017	90.00	Medidor de nível d'água
PZ-03	SN1-FH00008	578514	9334180	678	220	07/12/2018	14/12/2017	220.45	PZ
PZ-04	SN1-FH00010	578551	9333321	675	125	10/01/2018	17/01/2018	125.00	PZ
PZ-05	SN1-FH00006	579323	9333924	716	240	30/11/2017	02/02/2018	240.05	Medidor de nível d'água
PZ-06	SN1-FH00019	579918	9333508	753	200	21/03/2018	28/03/2018	191.70	PZ
PZ-07	SN1-FH00012	580140	9332912	724	250	19/01/2018	30/01/2018	202.25	PZ
PZ-08	SN1-FH00016	580146	9332663	751	250	02/02/2018	22/02/2018	250.00	PZ
PZ-09	SN1-FH00014	580151	9332413	763	250	01/02/2018	22/02/2018	250.00	PZ
PZ-10	SN1-FH00002	579116	9331097	670	135	15/11/2017	22/11/2017	108.85	PZ
FR-01	SN1-FH00003	577318	9334895	672	-	20/11/2017	20/11/2017	31.8	Auxiliar PZ-01
FR-02	SN1-FH00007	576757	9334964	669	-	06/12/2017	06/12/2017	10.15	Auxiliar PZ-02
FR-03	SN1-FH00009	578514	9334180	678	-	15/12/2017	15/12/2017	25	Auxiliar PZ-03
FR-04	SN1-FH00011	578551	9333321	675	-	18/01/2018	18/01/2018	11	Auxiliar PZ-04
FR-05	SN1-FH00015	579323	9333924	716	-	03/02/2018	03/02/2018	16	Auxiliar PZ-05
FR-06	-	579918	9333508	753	-	-	-	16.54	Auxiliar PZ-06
FR-07	SN1-FH00013	580140	9332912	724	-	31/1/2018	31/01/2018	8	Auxiliar PZ-07
FR-08	SN1-FH00018	580146	9332663	751	-	26/02/2018	26/02/2018	22	Auxiliar PZ-08
FR-09	SN1-FH00017	580151	9332413	763	-	23/02/2018	23/02/2018	9	Auxiliar PZ-09
FR-10	-	579116	9331097	670	-	-	-	20.15	Auxiliar PZ-10

**Tabela 2.15 – Piezômetros e furos rasos executados e ensaiados no platô N2.**

Nome	Furo de Sondagem Executado	UTM E (m)	UTM N (m)	Cota do Topo (mNM)	Profundidade proposta (m)	Data de Início	Data de Término	Profundidade Final	Observação
N2-PZ-01	SN2-FH00006	582700	9330800	671	100	11/07/2018	14/07/2018	130.10	Medidor de nível d'água
N2-PZ-02	SN2-FH00004	583100	9330600	684	90	09/07/2018	14/07/2018	90.00	PZ
N2-PZ-05	SN2-FH00002	583368	9330493	718	100	03/07/2018	09/07/2018	100.05	PZ
N2-PZ-07	SN2-FH00001	583463	9330437	718	130	30/06/2018	06/07/2018	130.10	PZ
N2-FR-01	SN2-FH00008	582700	9330808	670	-	14/07/2018	16/07/2018	15.00	Auxiliar PZ-01
N2-FR-02	SN2-FH00007	583104	9330588	684	-	14/07/2018	16/07/2018	14.60	Auxiliar PZ-02
N2-FR-05	SN2-FH00005	583377	9330487	718	-	09/07/2018	10/07/2018	24.5	Auxiliar PZ-05
N2-FR-07	SN2-FH00003	-	9330431	718	-	06/07/2018	08/07/2018	19	Auxiliar PZ-07



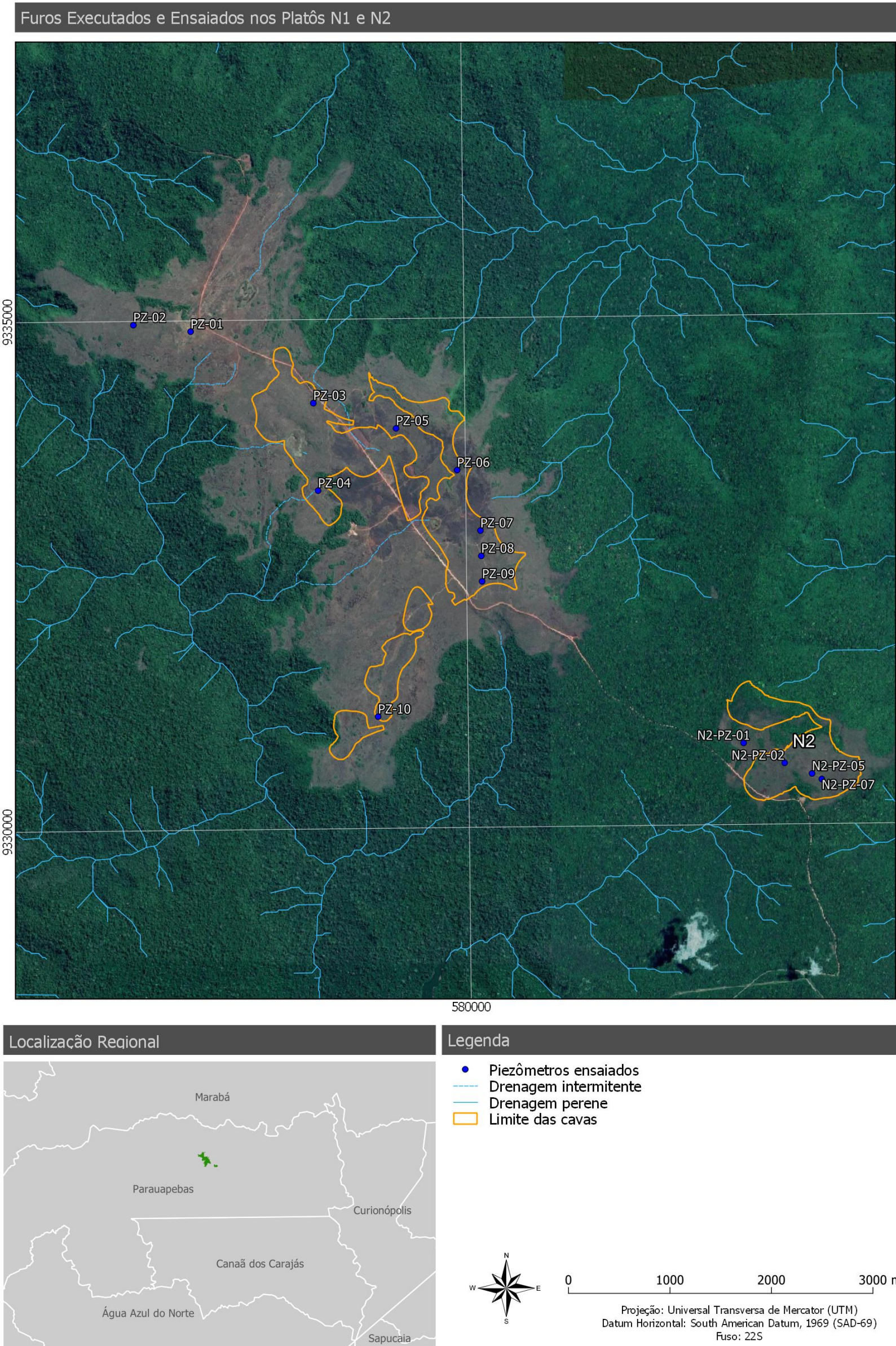




Figura 2.15 – Distribuição dos furos executados e ensaios no platô de N1 e N2.





		<b>ELABORAÇÃO DE ESTUDO HIDROGEOLÓGICO NOS PLATÔS DE N1/N2 EM CARAJÁS</b>	
<b>MODELO HIDROGEOLÓGICO CONCEITUAL E NUMÉRICO</b>  <b>RELATÓRIO TÉCNICO EIA</b>		Nº VALE -	PÁGINA <b>37/92</b>
		Nº CONTRATADA -	REV. <b>1</b>

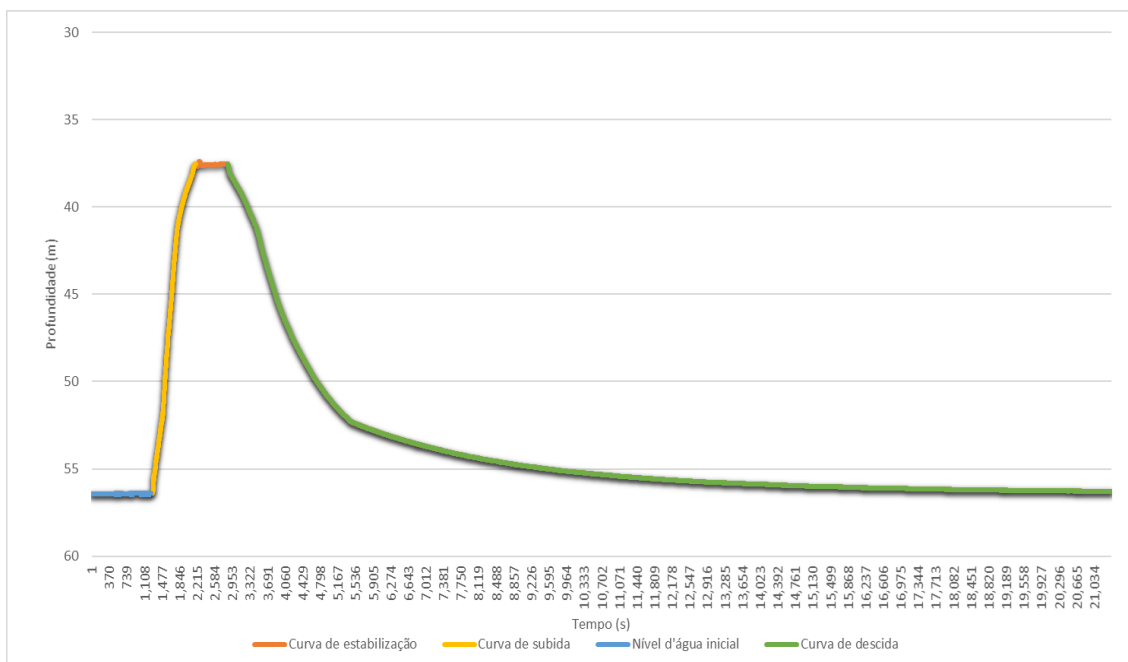
Os ensaios de campo foram feitos segundo a metodologia proposta por ABGE (1996) e o cálculo da permeabilidade foi realizado de acordo com os métodos de Gilg-Gavard (VIDAL, 1962). Os ensaios consistiram na injeção de água nos furos com uso de caminhão pipa, cuja vazão é restrita e controlada pela diferença de carga entre o nível da água no caminhão e a boca do furo. A injeção foi feita até que o nível d'água se estabilizasse. Por meio de sonda de pressão, foram registrados o nível d'água antes do início do ensaio e o nível na cota de estabilização, além da curva de descida do nível d'água à sua condição original de equilíbrio. O ensaio foi dado por encerrado quando o rebaixamento atingiu 20% da carga inicial aplicada conforme orientação de ABGE (1996). Outros dados registrados durante o ensaio incluíram a vazão necessária para manter o nível d'água estabilizado e acima da cota original e o tempo de descida. Em alguns ensaios, a vazão de estabilização foi alta ou baixa demais e não foi possível fazer sua medição de forma confiável.

A Figura 2.16 ilustra o momento do teste em campo. Já a Figura 2.17 demonstra uma curva típica obtida como resultado do ensaio de infiltração por perda d'água.



**Figura 2.16** – Local de ensaio de perda d'água com injeção de água por caminhão pipa.

		<b>ELABORAÇÃO DE ESTUDO HIDROGEOLÓGICO NOS PLATÔS DE N1/N2 EM CARAJÁS</b>	
<b>MODELO HIDROGEOLÓGICO CONCEITUAL E NUMÉRICO</b>  <b>RELATÓRIO TÉCNICO EIA</b>		Nº VALE -	PÁGINA <b>38/92</b>
		Nº CONTRATADA -	REV. <b>1</b>



**Figura 2.17** – Exemplo de curva de subida e descida de nível da água *versus* tempo de ensaio de perda d'água.

Segundo VIDAL (1962), se no furo de sondagem é inserida água de tal modo que o nível no piezômetro se mantém constante, é possível afirmar que:

$$k = \frac{1}{600 \times A} \times \frac{Q}{h_m}$$

Onde:

$k$  = é permeabilidade em cm/s

600 é um fator de conversão de unidades

$Q$  = vazão de estabilização em l/min

$h_m$  = diferença entre nível inicial e nível de estabilização



$A$  = coeficiente que é dependente do comprimento da seção filtrante  $\lambda$  e diâmetro  $d$  do piezômetro ou do furo de sondagem.

O coeficiente  $A$  pode ser calculado a partir da equação abaixo.

$$A = a \times (1.032\lambda + 30d)$$

$$a = \begin{cases} 1, & \text{se } \lambda \geq 6 \text{ m} \\ 0.481 + 0.178 \times \lambda - 0.014 \times \lambda^2, & \text{se } \lambda < 6 \text{ m} \end{cases}$$

Para aqueles casos em que não é possível manter o nível estável ou medir a vazão de estabilização de maneira confiável, VIDAL (1962) apresenta uma variação no método de Gilg-Gavard que considera a descida do nível d'água após atingir o nível d'água máximo e o tempo de ensaio decorrido. Nesse caso, a permeabilidade pode ser calculada a partir da fórmula:

		<b>ELABORAÇÃO DE ESTUDO HIDROGEOLÓGICO NOS PLATÔS DE N1/N2 EM CARAJÁS</b>	
<b>MODELO HIDROGEOLÓGICO CONCEITUAL E NUMÉRICO</b>  <b>RELATÓRIO TÉCNICO EIA</b>		Nº VALE -	PÁGINA <b>39/92</b>
		Nº CONTRATADA -	REV. <b>1</b>

$$k = \frac{1.308 \times d^2 \times \Delta h}{A \times h_m \times \Delta t}$$

Onde:

$k$  = é permeabilidade em cm/s

1.308 é um fator de conversão de unidades

$d$  = diâmetro do piezômetro ou do furo de sondagem

$\Delta t$  = intervalo de tempo considerado

$\Delta h$  = descenso do nível no intervalo de tempo  $\Delta t$

$h_m$  = altura média do nível d'água no intervalo de tempo  $\Delta t$



$A$  = coeficiente que é dependente do comprimento da seção filtrante  $\lambda$  e diâmetro  $d$  do piezômetro ou do furo de sondagem e é definido da mesma forma que para os casos em que a carga é constante.

As Tabelas 2.16 e 2.17 contêm os dados registrados em campo, juntamente com os valores de permeabilidade calculados para os piezômetros e furos raso dos platôs N1 e N2. Os valores de permeabilidade calculados pelos dois métodos para os ensaios de N1 e N2 são mostrados nos gráficos da Figura 2.18. Nos piezômetros, a seção filtrante  $\lambda$  foi considerada como tendo comprimento igual ao comprimento do filtro. Para os furos não revestidos, a seção filtrante  $\lambda$  foi definida como sendo igual à extensão do furo sob o nível máximo de água durante a realização do ensaio. Por se tratar de um medidor de nível d'água com múltiplos filtros conectados por zona pré-filtro, para o PZ-05 em N1, foi considerado como comprimento da seção filtrante  $\lambda$  a extensão de filtro e pré-filtro sob o nível d'água máximo durante a realização do ensaio.

Não foi possível calcular a permeabilidade para o furo FR-09 em N1 devido à ausência de alteração no nível da água presente no furo após 20 minutos de injeção de água na vazão igual a 0,40 l/s. Nos pontos de N1 PZ-01 e FR-01, a vazão de enchimento disponível para os ensaios se mostrou insuficiente para seu total enchimento e para esses furos a permeabilidade não foi calculada pelo método da carga constante. Nestes furos, a vazão de enchimento foi da ordem de 18 l/s e foi mantida até que o caminhão pipa esvaziasse, porém, a elevação do nível d'água registrada foi pouco superior a dois metros para o PZ-01. É importante destacar que o furo onde seria instalado o piezômetro PZ-01 não foi revestido por se encontrar seco. O perfil construtivo deste poço mostra a ocorrência de zona sem recuperação com cerca de 1 metro localizada em máfica decomposta, a cerca de 36 metros de profundidade, e esses dois fatores podem ser os responsáveis pela grande perda de água e pelo colapso e entupimento verificado na maior parte do furo já que, dos 81 metros originais, somente 37 se encontravam desobstruídos.

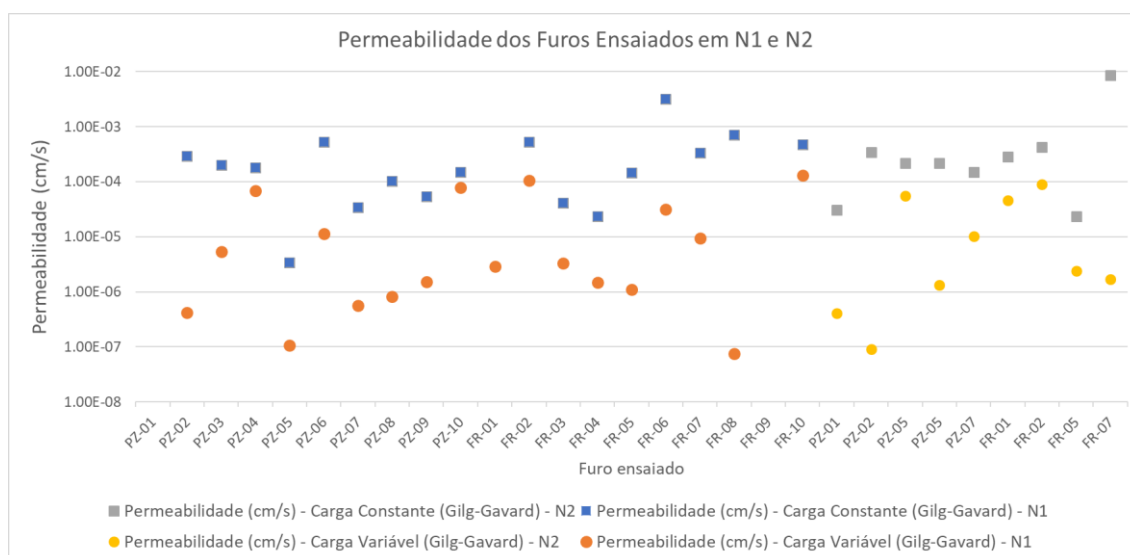
O valor da permeabilidade variou entre  $3,42 \times 10^{-6}$  e  $8,61 \times 10^{-3}$  cm/s quando calculado pelo método da carga constante e entre  $7,63 \times 10^{-8}$  e  $1,30 \times 10^{-4}$  cm/s para as permeabilidades calculadas pelo método da carga variável. O método da carga constante calcula valores mais altos e com menor dispersão quando comparados aos valores de permeabilidade calculados pelo método das cargas variáveis. O método da carga constante apresenta como vantagens o uso de seções filtrantes de comprimento constante e uso da vazão de estabilização como uma de suas variáveis, o que permite maior controle do ensaio, na medida em que a duração deste tem pouca influência no resultado. Além disso, os valores de permeabilidade calculados



		<b>ELABORAÇÃO DE ESTUDO HIDROGEOLÓGICO NOS PLATÔS DE N1/N2 EM CARAJÁS</b>	
<b>MODELO HIDROGEOLÓGICO CONCEITUAL E NUMÉRICO</b>  <b>RELATÓRIO TÉCNICO EIA</b>		Nº VALE -	PÁGINA <b>40/92</b>
		Nº CONTRATADA -	REV. <b>1</b>

pelo método da carga constante nas cangas foram iguais ou superiores aos valores obtidos nos ensaios de infiltração realizados em canga e descritos na seção 2.2.4 do presente relatório. Por esses motivos, optou-se por usar os resultados obtidos pelo método da carga constante no processo de calibração do modelo hidrogeológico numérico para o melhor entendimento de ambientes hidrogeológicos em cangas e rochas ferruginosas.

Dentre os piezômetros em N1, o PZ-06 e o PZ-10 apresentaram os maiores valores de permeabilidade, a depender do método utilizado: PZ-06 apresenta permeabilidade igual a  $5,30 \times 10^{-4}$  cm/s, pelo método das cargas constantes, e PZ-10 apresenta permeabilidade igual a  $8,92 \times 10^{-5}$  cm/s quando calculado pelo método das cargas variáveis. O filtro do piezômetro PZ-06 está localizado em porção intensamente fraturada e durante o ensaio foi observada conexão desta porção com a base do furo raso FR-06, situado a cerca de 2 metros de distância. Esta conexão é a provável responsável pelo carreamento de material para o interior do piezômetro PZ-06, ocasionando seu entupimento da profundidade de 31 metros até a base do furo, a 190 metros de profundidade. O piezômetro PZ-10 está situado em baixa cota altimétrica e seu nível d'água se encontra próximo à superfície, a cerca de 4 metros de profundidade. O medidor de nível d'água PZ-05 apresentou o menor valor de permeabilidade dentre todos os ensaios realizados,  $3,42 \times 10^{-6}$  cm/s devido ao maior comprimento da seção filtrante e à composição do perfil litológico do furo, formado por máfica sã e jaspelito.



**Figura 2.18 – Permeabilidade dos piezômetros, medidores de nível d'água e furos rasos ensaiados em N1 e N2.**



		ELABORAÇÃO DE ESTUDO HIDROGEOLÓGICO NOS PLATÔS DE N1/N2 EM CARAJÁS	
MODELO HIDROGEOLÓGICO CONCEITUAL E NUMÉRICO	Nº VALE	-	PÁGINA
			41/92
RELATÓRIO TÉCNICO EIA	Nº CONTRATADA	-	REV.
			1

**Tabela 2.16 – Parâmetros de campos dos ensaios em piezômetro e em furos rasos de N1**

Nome	Data da Realização dos Ensaio	Profundidade do nível d'água inicial (m)	Carga de Elevação Máxima Durante o Ensaio ou de Estabilização (m)	Vazão de estabilização (l/s)	Tempo de Descida do Nível d'água (min)	Profundidade Total do Furo (m)	Comprimento da Seção Filtrante (m)	Litotipo da Seção Filtrante (m0)	Permeabilidade (cm/s) - Gal & Gavard – Carga Constante	Permeabilidade (cm/s) - Gal & Gavard – Carga Variável
PZ-01	16/03/2018	Seco		-		80.85	-		-	-
PZ-02	12/03/2018	62.96	10.83	0.46	83.1	90.00	12.50	Jaspelito e Hematita Friável	2.94E-04	4.16E-07
PZ-03	13/03/2018	85.26	17.94	0.50	8.4	220.45	12.00	Hematita Friável Fraturada	2.00E-04	5.31E-06
PZ-04	08/03/2018	27.36	13.59	0.49	1.2	125.00	18.00	Hematita Friável Fraturada	1.79E-04	6.94E-05
PZ-05	14/03/2018	56.43	18.87	0.13	48.4	240.05	194.00	Jaspelito e Máfica Sã	3.42E-06	1.07E-07
PZ-06	25/07/2018	Seco	16.70	-	8.1	191.70	18.00	Hematita Friável Fraturada	5.30E-04	1.14E-05
PZ-07	09/03/2018	83.15	18.65	0.33	23.4	202.25	48.00	Hematita Friável Fraturada	3.47E-05	5.58E-07
PZ-08	10/03/2018	109.47	20.21	0.42	32.2	250.00	18.00	Hematita Friável	1.03E-04	8.31E-07
PZ-09	15/03/2018	123.24	17.22	0.13	18.7	250.00	12.00	Hematita Friável	5.43E-05	1.54E-06
PZ-10	07/03/2018	3.92	3.87	0.08	4.0	108.85	12.00	Hematita Friável	1.49E-04	5.92E.05
FR-01	16/03/2018	Seco	6.19	-	86.1	31.80	6.19	Canga de minério		
FR-02	12/03/2018	Seco	8.83	0.54	7.5	10.15	8.83	Canga química	5.32E-04	1.06E-04
FR-03	13/03/2018	9.94	8.91	0.10	94.2	25.00	23.97	Canga química	4.15E-05	3.34E-06
FR-04	08/03/2018	7.48	7.48	0.02	489.0	11.00	11.00	Canga química	2.37E-05	1.47E-06
FR-05	14/03/2018	11.92	7.52	0.16	328.0	16.00	11.60	Canga química	1.45E-04	1.10E-06
FR-06	25/07/2018	Seco	10.11	4.11	10.9	16.54	10.11	Canga de minério e canga química fraturada	3.20E-03	3.13E-05
FR-07	09/03/2018	Seco	6.19	0.18	31.6	8.00	6.19	Canga química	3.33E-04	9.33E-06
FR-08	10/03/2018	4.39	3.01	0.51	2687.8	22.00	20.62	Canga de minério e canga química	7.13E-04	7.63E-08
FR-09	15/03/2018	3.19	0	-	-	9.00	-	Canga química e de minério	6.05E-03	2.24E-05
FR-10	27/07/2018	7.72	6.82	-	2.9	20.15	19.25		4.70E-04	1.30E-04

**Tabela 2.17 – Parâmetros de campos dos ensaios em piezômetro e em furos rasos de N2**

Nome	Data da Realização dos Ensaio	Profundidade do nível d'água (m)	Carga de Elevação Máxima Durante o Ensaio ou de Estabilização (m)	Vazão de estabilização (l/s)	Tempo de Descida do Nível d'água (min)	Comprimento da Seção Filtrante (m)	Litotipo da Seção Filtrante (m0)	Permeabilidade (cm/s) - Gal & Gavard – Carga Constante	Permeabilidade (cm/s) - Gal & Gavard – Carga Variável
PZ-01	26/07/2018	69.02	49.25	0.49	204.0	30	Hematita friável	3.06E-05	4.07E-07
PZ-02	24/07/2018	63.70	15.56	1.09	362.2	18	Hematita friável e jaspelito	3.49E-04	9.00E-08
PZ-05	27/07/2018	Seco	70.13	3.97	1.7	24	Hematita friável fraturada e jaspelito	2.15E-04	5.55E-05
PZ-07	26/07/2018	127.49	127.42	2.67	96.3	12	Hematita friável e jaspelito	1.51E-04	1.01E-05
N2-FR-PZ-01	24/07/2018	Seco	3.99	0.07	31.9	3.99	Canga química	2.83E-04	4.55E-05
N2-FR-PZ-02	24/07/2018	Seco	3.65	0.09	20.4	3.65	Canga de minério fraturada	4.31E-04	8.92E-05
N2-FR-PZ-05	27/07/2018	Seco	24.74	0.16	18.6	24.74	Canga de minério fraturada	2.32E-05	2.37E-06
N2-FR-PZ-07	26/07/2018	Seco	3.03	1.26	151.6	3.03	Canga de minério fraturada	8.61E-03	1.71E-06

		<b>ELABORAÇÃO DE ESTUDO HIDROGEOLÓGICO NOS PLATÔS DE N1/N2 EM CARAJÁS</b>	
<b>MODELO HIDROGEOLÓGICO CONCEITUAL E NUMÉRICO</b>  <b>RELATÓRIO TÉCNICO EIA</b>		Nº VALE -	PÁGINA <b>42/92</b>
		Nº CONTRATADA -	REV. <b>1</b>

O ensaio realizado no furo raso N2-FR-07 apresentou permeabilidade de  $8,61 \times 10^{-3}$  cm/s, sendo este o maior valor dentre todos os ensaios. Este furo está localizado em canga de minério muito fraturada e a elevação do nível d'água foi de apenas 3 metros, a uma vazão de injeção de 1,26 l/s.

Quanto aos furos rasos, todos foram construídos em canga química e/ou de minério muitas vezes intensamente fraturadas, o que explica suas permeabilidades iguais ou superiores àquelas calculadas para os piezômetros. Estes valores estão entre  $2,32 \times 10^{-5}$  cm/s e  $8,61 \times 10^{-3}$  cm/s e destaca-se que são, pelo menos, uma ordem de grandeza maiores que os valores calculados nos ensaios de duplo anel, já mostrados no item 2.2.4, acima.



É importante destacar que a primeira campanha foi realizada durante o período das chuvas, quando foram feitos 17 dos 20 ensaios de N1. Em alguns desses ensaios foi observada influência da chuva, sobretudo em furos rasos, onde fluxos subsuperficiais foram responsáveis por aporte de água nos furos de sondagem, diminuindo a taxa de descida no nível d'água e, em alguns casos, elevando-o. Os ensaios executados em N1 no PZ-06, FR-06 e FR-10 aconteceram no período da seca e os valores de permeabilidade estão entre os maiores que, além da presença de fraturas, podem estar associados à menor influência da chuva e menor saturação natural do terreno quando do início do ensaio. Os piezômetros e furos de N2 foram ensaiados durante o período da seca e as permeabilidades obtidas apresentaram menor dispersão que os N1, porém todos estão na mesma ordem de grandeza.

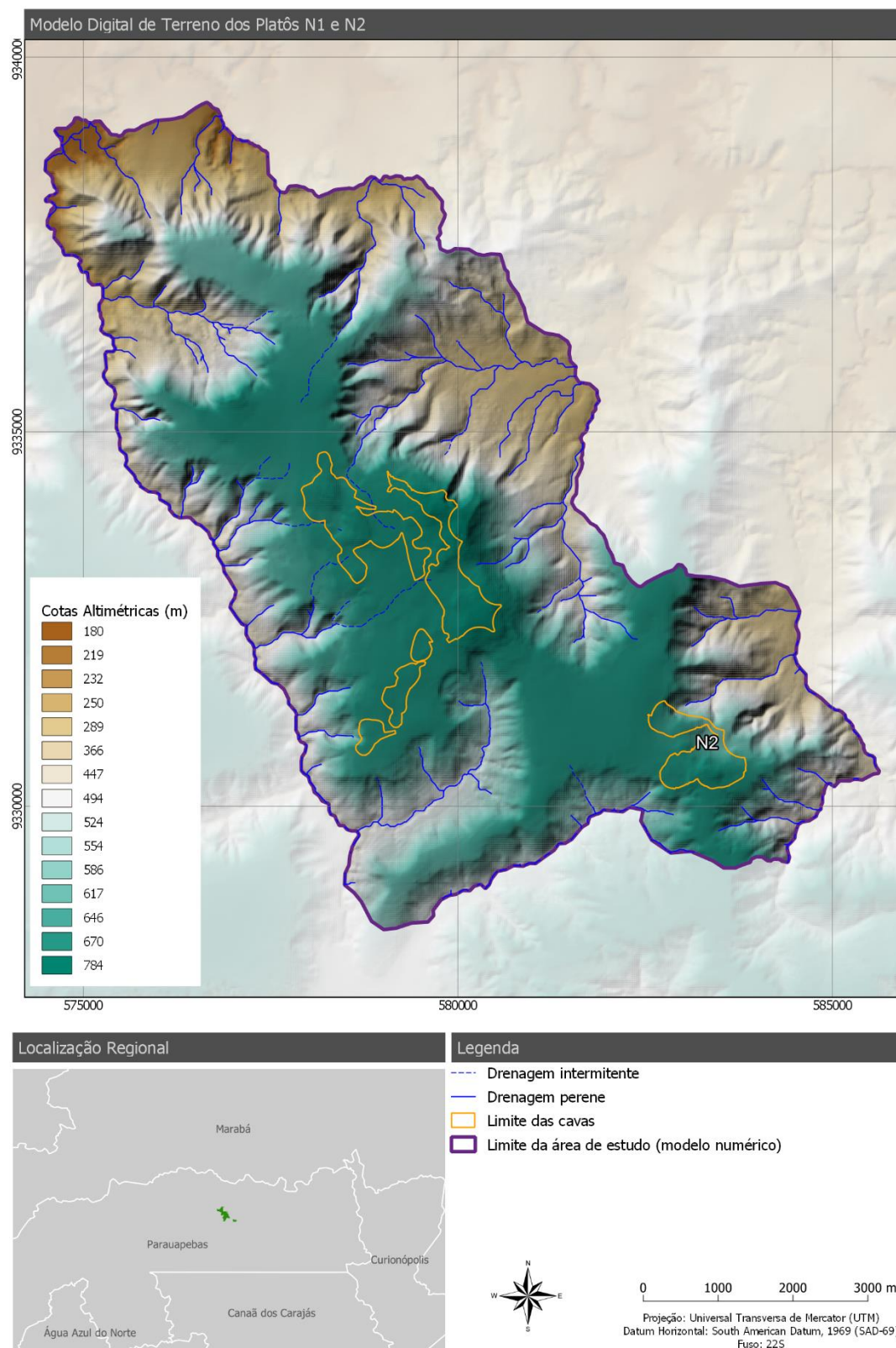
## 2.3 BASE TOPOGRÁFICA, HIDROGRÁFICA E IMAGENS DE ALTA RESOLUÇÃO

A base topográfica utilizada como limite superior para os estudos de modelagem hidrogeológica se refere à junção de informações SRTM (resolução de 30 metros) com aquelas geradas em campanhas de aerolevantamento realizadas pela VALE, as quais apresentam informações altimétricas com resolução de 5 metros. Nos ajustes de curvas altimétricas para esta junção foi dada prioridade às bases de maior resolução. A partir delas foi gerado um modelo digital de terreno (MDT) interpolado com resolução de 10 metros que facilitou a visualização da distribuição espacial de bacias hidrográficas, nascentes e pontos de monitoramento (Figura 2.19).

O desenvolvimento do modelo numérico de fluxo das águas subterrâneas levou em consideração também as linhas de topografia de cava planejadas como cenários de lavra final para os platôs N1 e N2. Estes dados foram disponibilizados pela VALE no arquivo *POLIGONAIS\_DE\_CONTORNO\_-\_ADA-N1-\_R21\_editado.dwg*. Em função da presença de área de influência de cavidades, as cavas são apresentadas com a denominação de cava restrita. A partir destes cenários é que serão tecidas as considerações sobre resultados de simulações futuras quanto à possibilidade de impactos nas disponibilidades hídricas locais.





		<b>ELABORAÇÃO DE ESTUDO HIDROGEOLÓGICO NOS PLATÔS DE N1/N2 EM CARAJÁS</b>	
<b>MODELO HIDROGEOLÓGICO CONCEITUAL E NUMÉRICO</b>  <b>RELATÓRIO TÉCNICO EIA</b>		Nº VALE -	PÁGINA <b>43/92</b>
		Nº CONTRATADA -	REV. <b>1</b>





**Figura 2.19** – Modelo digital de terreno com malha de drenagem em escala regularizada.

Fonte: Construído com base em dados disponibilizados pela VALE.

		<b>ELABORAÇÃO DE ESTUDO HIDROGEOLÓGICO NOS PLATÔS DE N1/N2 EM CARAJÁS</b>	
<b>MODELO HIDROGEOLÓGICO CONCEITUAL E NUMÉRICO</b>  <b>RELATÓRIO TÉCNICO EIA</b>		Nº VALE -	PÁGINA <b>44/92</b>
		Nº CONTRATADA -	REV. <b>1</b>

A base hidrográfica original (1:50.000) trata todas as drenagens e lagoas com traço contínuo, sem diferenciação entre cursos d'água perenes e intermitentes. Com a finalização do cadastro de nascentes no entorno dos platôs foi feita essa diferenciação. A montante dos pontos de surgências principais os talwegues de drenagem são notadamente intermitentes, ou efêmeros, sendo que alguns guardam continuidade com as lagoas, também intermitentes, atuando como exutório destas no auge do período das chuvas. O resultado do mapa de drenagens reinterpretado com base nas observações de campo é apresentado na Figura 2.7 e Figura 2.15.

Se somando a estas bases foram, ainda, agregadas informações disponibilizadas pela VALE, citando-se o mosaico de imagens SRTM (*Shuttle Radar Topography Mission*) do estado do Pará, em alta resolução e em formato TIFF, além do mosaico de imagens obtidas pelo sensor de satélite SPOT na região de Itacaiúnas, em fevereiro de 2008.

		<b>ELABORAÇÃO DE ESTUDO HIDROGEOLÓGICO NOS PLATÔS DE N1/N2 EM CARAJÁS</b>	
<b>MODELO HIDROGEOLÓGICO CONCEITUAL E NUMÉRICO</b>  <b>RELATÓRIO TÉCNICO EIA</b>		Nº VALE -	PÁGINA <b>45/92</b>
		Nº CONTRATADA -	REV. <b>1</b>

### 3.0 MODELO HIDROGEOLÓGICO CONCEITUAL

O modelo conceitual constitui-se em um entendimento físico da dinâmica de circulação hídrica subterrânea e de sua interação com as águas superficiais. Para sua concepção, pautou-se em informações primárias, de notória correlação com os fenômenos que descrevem tal dinâmica, para que fosse possível representar o contexto hidrogeológico com satisfatória acuidade. Informações secundárias utilizadas nesta concepção consistiram na caracterização regional de unidades geológicas.

Portanto, a construção deste modelo conceitual está fortemente embasada na utilização de dados primários coletados na área, conforme apresentado no Capítulo 2 deste documento. Dentre estes dados citam-se: modelo geológico tridimensional construído com base em informações de sondagens, mapa geológico de superfície, cadastro de nascentes, monitoramento de cotas de nível da água subterrânea e de nível de água suspensos em lagoas intermitentes, ensaios de infiltração em cangas e ensaios de aquífero em piezômetros.



Como todo modelo desta natureza pressupõe um entendimento tridimensional da dinâmica de fluxo hídrico, é de extrema importância que a caracterização geológica local seja feita em igual dimensão. Esta foi a base fundamental para caracterização das unidades hidrogeológicas e para a associação de seus parâmetros mais representativos buscados em campo. Ressalta-se que este modelo geológico 3D, que será transposto diretamente para a ferramenta de simulação de fluxo, foi consolidado pelas informações primárias de mapeamento de superfície e de modelo de blocos gerado através da interpretação de furos de sondagem. Alguns destes furos também foram usados para a instalação de dispositivos de monitoramento das cotas de nível da água subterrânea e para a realização de testes de infiltração, outro conjunto de dados de alta relevância na concepção de modelos hidrogeológicos. Já as informações de ensaios de infiltração em cangas ajustam-se com o entendimento da capacidade de recarga local, sendo a descarga um reflexo das vazões de nascentes relatadas no entorno da área.

Portanto, em uma visão integrada, a dinâmica hídrica local pode ser traduzida pela interpretação das condições de recarga, circulação e descarga das águas infiltradas na região, conforme apresenta-se a seguir.

#### 3.1 DINÂMICA DE CIRCULAÇÃO E INTERAÇÃO HÍDRICA

Na visão hidrogeológica mais ampla, reconhece-se que a principal unidade aquífera ocorrente nos platôs N1 e N2 constitui-se nas rochas ferríferas da Formação Carajás, composta por hematitas friáveis, compactas, compactas manganíferas e lateríticas, além de jaspelitos, unidades cobertas por cangas química e de minério evidentes no alto do platô. A afinidade aquífera destas unidades foi comprovada pelos valores relativamente mais altos de condutividade hidráulica obtidos em ensaios de campo. Ainda que não visíveis em mapeamento de superfície, diques máficos intrudidos nestas unidades podem estar presentes, condicionando barreiras hidráulicas que desempenham papel de compartimentação do aquífero em determinadas porções restritas.





		<b>ELABORAÇÃO DE ESTUDO HIDROGEOLÓGICO NOS PLATÔS DE N1/N2 EM CARAJÁS</b>	
<b>MODELO HIDROGEOLÓGICO CONCEITUAL E NUMÉRICO</b>  <b>RELATÓRIO TÉCNICO EIA</b>		Nº VALE -	PÁGINA <b>46/92</b>
		Nº CONTRATADA -	REV. <b>1</b>

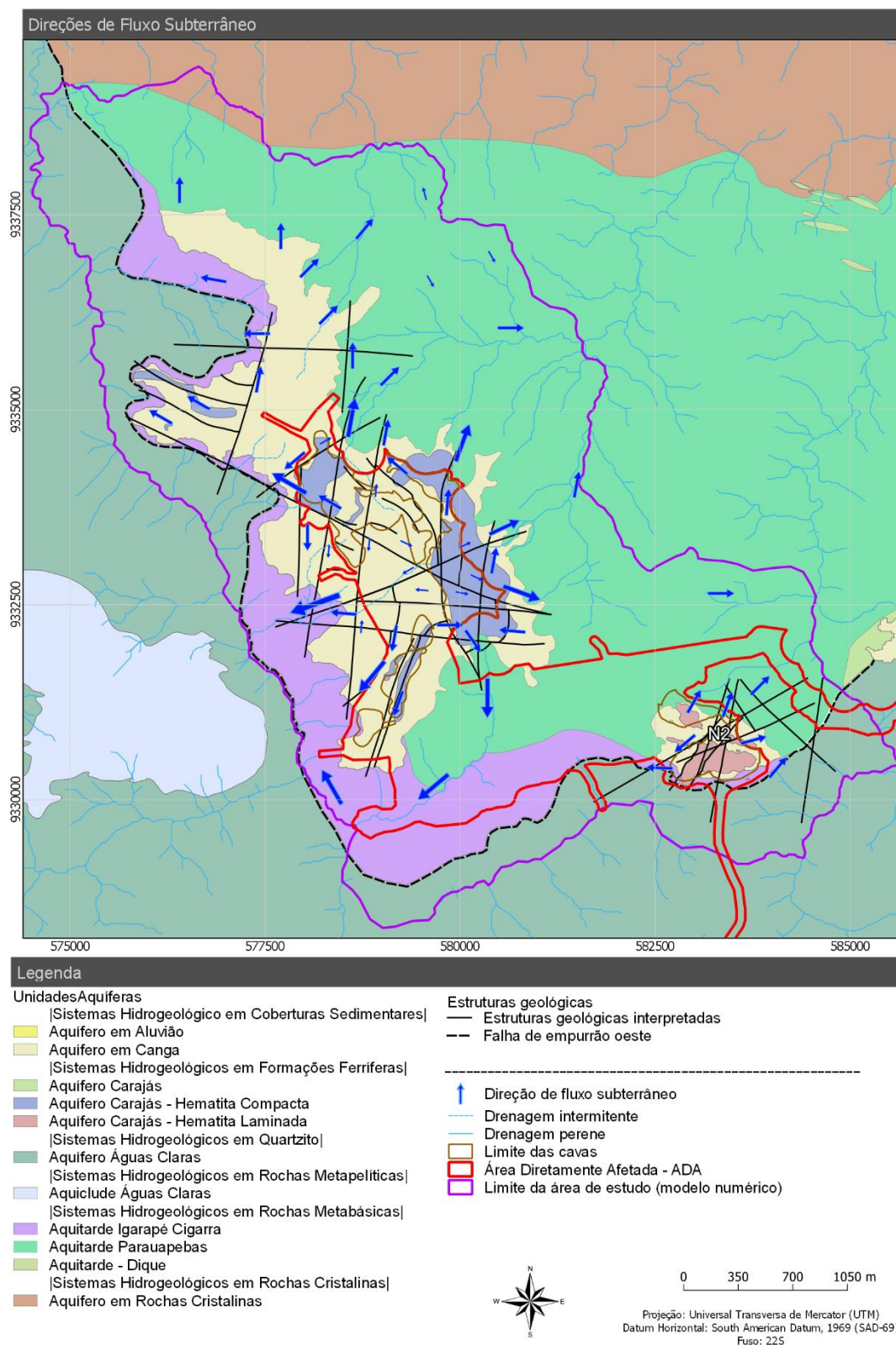
Conforme demonstrado pela interpretação de sondagens traduzida no modelo geológico tridimensional, a unidade aquífera é circundada por rochas vulcânicas associadas às formações Parauapebas e Igarapé Cigarra, conhecidamente com características de aquícludes a aquitardes, a depender do grau de intemperismo e fraturamento nestas (alterado, saprolítico e fraturado). Rochas da Formação Águas Claras ocorrem em posições afastadas do platô, conformando aquífero parcialmente conectado ao Aquífero Carajás por meio de falhas e fraturas às quais estão associadas as nascentes de maior vazão cadastradas nesta unidade.

O arranjo geológico tridimensional complexo na região dos platôs imputa às formações ferríferas diferenciado contexto de circulação hídrica subterrânea, que passa a fazer maior sentido quando se consideram as diversas estruturas penetrativas reconhecidas na área. As feições estruturais que podem demonstrar tal comportamento são traduzidas através de foliações com mergulhos médios a suaves para W; juntas e fraturas NW-SE em rochas metavulcânicas máficas; falhas estriadas e espelhadas em zonas de fraturas; e, lineamentos NW-SE, N-S e E-W evidenciados pelas drenagens. Tais estruturas são importantes para o controle dinâmico de fluxo de água subterrânea, somadas aos potenciais hídricos subterrâneos dos materiais geológicos presentes, sendo também responsáveis pela formação de nascentes pontuais com vazão expressiva quando comparadas a outras nascentes situadas no entorno e no mesmo litotipo.



Como já aventado acima, contribuindo para o potencial hidrogeológico da área dos platôs N1 e N2, a presença de grandes lineamentos revela a importância do fator estrutural associado. Estas direções guardam estreita relação com a evolução tectônica destes platôs, os quais correspondem aos blocos mais ocidentais da Serra Norte. A partir desta percepção, a interpretação de imagens de satélite somada à base estrutural existente corroborou a ocorrência de diversos alinhamentos estruturais. Independentemente de sua classificação evolucionária temporal, estas estruturas tiveram e têm grande importância no desenvolvimento de feições de interesse hidrogeológico e, por conseguinte, para a composição do modelo conceitual de fluxo das águas subterrâneas e de interação com as águas superficiais, bem como para o modelo numérico. Conforme apresentado na Figura 3.1, estas direções se caracterizam na região dos platôs como NE/SW, NW/SE, S/N e E/W e são corroboradas pelas direções apresentadas em bases citadas no capítulo de geologia. Supondo uma correlação destas direções com aquelas descritas na história evolucionária da região de Carajás, pode-se conjecturar o seguinte:

- NE/SW: Direção de encurtamento regional associada a uma tectônica compressiva oblíqua.
- NW/SE: direção paralela/subparalela a eixos de dobras e estruturas regionais (Dobra Carajás e falhas Carajás e Cinzento).
- S/N: ramificações lítricas do tipo *splay* desenvolvidas a partir de falhas regionais principais (Falhas Carajás e Cinzento).
- E/W: falhas subparalelas ao plano axial de dobras.

		<b>ELABORAÇÃO DE ESTUDO HIDROGEOLÓGICO NOS PLATÔS DE N1/N2 EM CARAJÁS</b>	
<b>MODELO HIDROGEOLÓGICO CONCEITUAL E NUMÉRICO</b>  <b>RELATÓRIO TÉCNICO EIA</b>		Nº VALE -	PÁGINA <b>47/92</b>
		Nº CONTRATADA -	REV. <b>1</b>



**Figura 3.1 – Direções de fluxo interpretadas nos platôs N1 e N2.**

		<b>ELABORAÇÃO DE ESTUDO HIDROGEOLÓGICO NOS PLATÔS DE N1/N2 EM CARAJÁS</b>	
<b>MODELO HIDROGEOLÓGICO CONCEITUAL E NUMÉRICO</b>  <b>RELATÓRIO TÉCNICO EIA</b>		Nº VALE -	PÁGINA <b>48/92</b>
		Nº CONTRATADA -	REV. <b>1</b>

Durante as etapas de campo destinadas ao cadastramento de nascentes e ensaios de infiltração e perda d'água em cangas e piezômetros nos platôs ficou clara a significância do controle estrutural na dinâmica de circulação hídrica da área.



A principal unidade aquífera da área de estudos é o Aquífero Carajás. Tendo em vista a sua ocorrência restrita e encapsulada pelas encaixantes máficas, além de suas distintas composições, admitem-se comportamentos variados quanto às condições de circulação de águas subterrâneas. Em se tratando do potencial hidrogeológico, o litotipo mais representativo é a hematita friável que, devido à porosidade granular decorrente da lixiviação de minerais e à porosidade secundária resultante de fraturamentos, apresentam alto potencial de armazenamento e transmissão hídrica. As hematitas compactas, por sua vez, não possuem porosidade primária, e, em geral, apresentam-se pouco fraturadas, revelando potenciais hidrogeológicos moderados a baixos segundo os aspectos de armazenamento e transmissão de água subterrânea. Este comportamento é similar nos jaspelitos, já que estes possuem características semelhantes às hematitas compactas.

As informações sobre características hidráulicas das rochas máficas alteradas e encaixantes do corpo ferrífero não são bem conhecidas, porém, piezômetros de cavas dos platôs vizinhos mostram que o nível d'água nestes litotipos sofre pouca interferência do rebaixamento imposto à formação ferrífera. Tais rochas assumem, em geral, características de aquitardes, com melhores condições de circulação de água nas zonas de falhas, e de aquícludes em regiões pouco fraturadas. A presença dessas unidades pouco permeáveis é fator hidrogeológico importante, pois auxilia na manutenção das cotas de nível d'água no aquífero hospedado nas formações ferríferas, além de determinar as cotas de exutórios de nascentes localizadas na região de meia encosta dos platôs e notadamente mantidas por estruturas geológicas de longo alcance e funcionalidade na regulação hídrica.

Em relação às nascentes, registraram-se, em alguns pontos, vazões elevadas no sopé e meia encosta dos platôs, associadas a certas direções estruturais, ou interseções destas que cortam os platôs em quase toda sua extensão, inclusive suas encaixantes máficas, sendo mais nítidas no platô de N1 devido à sua maior dimensão. A montante dos pontos de surgência principais, os talvegues de drenagem são notadamente intermitentes ou efêmeros, sendo que alguns guardam ligação em termos de entalhamento até as lagoas, mantendo o fluxo durante o período úmido, por pequenos trechos a partir destas, caracterizando a ocorrência de surgências e sumidouros localizados, com vazão pouco expressiva. Na região de encosta e sopé dos platôs, os talvegues são fortemente encaixados, com a presença de enormes blocos rolados de canga, marcando o seu desmonte a partir de direções estruturais importantes. Na porção elevada do platô, os talvegues são mais suavemente encaixados devido à carapaça de cangas, porém guardam, também, a continuidade dos alinhamentos percebidos. Outros pontos de nascentes se mostraram com vazões muito menores, apesar de apresentarem alguma associação com direções estruturais, o que pode denotar que nem todas as direções percebidas são proeminentemente favoráveis à descarga do aquífero.

Admite-se que estruturas como falhas e fraturas desempenham papel fundamental na manutenção dos aportes hídricos recarregados no alto do platô ao direcionar as águas infiltradas nas cangas para níveis mais profundos, além de conectar estes níveis a exutórios



		<b>ELABORAÇÃO DE ESTUDO HIDROGEOLÓGICO NOS PLATÔS DE N1/N2 EM CARAJÁS</b>	
<b>MODELO HIDROGEOLÓGICO CONCEITUAL E NUMÉRICO</b>  <b>RELATÓRIO TÉCNICO EIA</b>		Nº VALE -	PÁGINA <b>49/92</b>
		Nº CONTRATADA -	REV. <b>1</b>



nas bordas dos platôs. Sob esta perspectiva, há que se considerar ainda o comportamento das cangas no contato com rochas subjacentes (formações ferríferas e rochas máficas), observado a partir de furos de sondagem e de instalação de piezômetros nestes platôs, onde foram realizados ensaios de perda d'água. Muito comumente e independente do tipo de rocha ou de canga acima zonas sem recuperação de testemunho nestes contatos são reportadas a partir destes furos, com espessuras métricas. Provavelmente, estas regiões vazias ou de materiais extremamente friáveis são o resultado da intensa circulação hídrica na região de contato canga/rocha, materializando zonas de fluxo preferencial em sub-superfície no platô.

Contudo, esta região de contato favorável ao fluxo hídrico não sustenta nível de água subterrânea, pois via de regra, as águas circulantes encontram zonas de falha ou fraturas que as conduzem para níveis mais profundos nas rochas máficas, ou para níveis friáveis a fraturados nas formações ferríferas. Portanto, as potencialidades hídricas nas formações ferríferas são entendidas como relativamente altas, estando condicionadas pela conexão hidráulica em corredores horizontais e verticais de recarga e circulação.

Ainda que o potencial de circulação hídrica dado pela situação descrita acima seja elevado, os quantitativos de precipitação que efetivamente participam da recarga do sistema são controlados pela cobertura de cangas e suas restrições quanto à infiltração. Como mostraram os ensaios realizados nos diferentes tipos de cobertura de cangas, pontualmente, estas apresentam baixa percolação nos centímetros iniciais concrecionados. Contudo, considerando sua vasta área de ocorrência e a possibilidade de conexão por estruturas e canaliculos, estas cangas se transformam, em profundidades não muito inferiores (10 a 20 metros), em zonas de elevada condutividade hidráulica, desenvolvendo amplas áreas de circulação no platô, que quando não recarregam o sistema profundo, mantêm o fluxo intermitente em determinadas posições de talvegues, a montante de exutórios perenes, logo após os períodos de chuva.



Aliás, o escoamento superficial e subsuperficial no período úmido ocorre de forma bastante marcante, pois, mesmo após dias de um episódio de precipitação este prevalece de maneira intensa, como resultado da descarga hipodérmica das cangas. Quando estas águas não aproveitam o talvegue natural desenvolvido na canga, elas fluem pelas vias de acesso abertas, principalmente nas porções mais baixas do platô até alcançarem os talvegues naturais em zona de meia encosta. Tais águas são responsáveis pela recuperação dos níveis de água nas lagoas do platô, reconhecidas pelos dados de monitoramento como de caráter de manutenção puramente pluvial, não guardando relação com o aquífero, uma vez que abaixo destas ocorrem níveis argilosos amplamente desenvolvidos. Considerando a baixa espessura dos pontos alagadiços, durante o período chuvoso as lagoas tendem a extravasar pelos talvegues naturais, cessando poucos dias ou meses depois, quando passam a perder água por evaporação direta de seu espelho, até secar ou manter níveis lamacentos em áreas restritas e rebaixadas do terreno durante o pico do período seco.

Portanto, quanto às lagoas, além do controle estrutural visivelmente associado à sua distribuição no alto do platô de N1, percebeu-se que estas se caracterizam como feições doliniformes, com áreas de contribuição relativamente pouco extensas, pequena espessura de lâmina d'água, não vertentes no período seco, e, aparentemente, sem indícios de conexão

		<b>ELABORAÇÃO DE ESTUDO HIDROGEOLÓGICO NOS PLATÔS DE N1/N2 EM CARAJÁS</b>	
<b>MODELO HIDROGEOLÓGICO CONCEITUAL E NUMÉRICO</b>  <b>RELATÓRIO TÉCNICO EIA</b>		Nº VALE -	PÁGINA <b>50/92</b>
		Nº CONTRATADA -	REV. <b>1</b>

com o aquífero, seja de maneira efluente ou influente. Além disso, os dados de monitoramento corroboram a provável origem exclusivamente pluvial para as águas das lagoas, ainda que seu regime de manutenção possa ser plurianual, e que em alguns casos possam não secar completamente devido ao alto índice de precipitação pluviométrica na região. Como mencionado anteriormente, estas lagoas constituem o ponto de partida de talwegues alinhados estruturalmente. Apesar de talwegues predominantemente intermitentes, a presença de surgências e sumidouros em determinados trechos pode evidenciar o caráter de conexão destes com níveis mais profundos, quiçá, até com o aquífero, porém, dada sua funcionalidade sazonal, não implicam em aportes contínuos ou efetivos para a manutenção das nascentes localizadas mais abaixo.

As cargas hidráulicas dos piezômetros e medidores de nível d'água medidas em campo mostram que o fluxo no platô N1 se dá da porção central do platô N1, onde se situam os instrumentos PZ-05, FS-62, FS-63, FS-65, FS-83 e FS-206, em direção às bordas, sendo as trajetórias dos fluxos controladas pelas estruturas (fraturas e falhas), conforme mostra a Figura 3.1. Apesar de se situar a menos de 720 metros de distância do FS-206, a carga hidráulica medida no piezômetro PZ-03 é cerca de 65 metros inferior, sendo a menor carga hidráulica medida nos instrumentos de N1. O filtro do PZ-03 foi instalado a 213 metros de profundidade, na cota 465 metros. Não há informações quando à posição do filtro do instrumento FS-206, entretanto, sabe-se que a profundidade do furo de sondagem é de 120,6 metros e a profundidade máxima de hematita é de 101,50 metros. No cenário mais extremo, o filtro deste instrumento estaria instalado na cota mínima de 580 metros, 115 metros acima do filtro do instrumento PZ-03. Essa diferença entre as cotas dos filtros e das cargas hidráulicas entre dois instrumentos situados próximos sugere que cada valor de carga hidráulica pertença a aquíferos compartimentados por diques intrusivos ou mesmo fraturas preenchidas por argila ou outro material selante.

		<b>ELABORAÇÃO DE ESTUDO HIDROGEOLÓGICO NOS PLATÔS DE N1/N2 EM CARAJÁS</b>	
<b>MODELO HIDROGEOLÓGICO CONCEITUAL E NUMÉRICO</b>  <b>RELATÓRIO TÉCNICO EIA</b>		Nº VALE -	PÁGINA <b>51/92</b>
		Nº CONTRATADA -	REV. <b>1</b>

## 4.0 MODELO HIDROGEOLÓGICO NUMÉRICO

Os modelos numéricos são ferramentas estruturadas para integrar múltiplos dados (geologia, níveis da água, informações de poços de bombeamento, topografia, drenagem) a um entendimento conceitual, com o intuito de descrever o escoamento das águas subterrâneas e entender a suas relações com as águas superficiais. Com o passar dos anos, as aplicações migraram de modelos simplificados, onde as complexidades geológicas eram grosseiramente representadas, para modelos mais detalhados, nos quais são utilizados todos os dados disponíveis em um esforço para representar o sistema hidrogeológico da maneira mais precisa possível.

Do ponto de vista técnico, a incorporação de dados geológicos e hidrogeológicos detalhados tende a produzir um modelo mais realístico e defensável como ferramenta de entendimento auxiliar. Contudo, cumpre ressaltar que, apesar dos esforços em construir um modelo representativo, incertezas naturais são sempre inerentes às previsões numéricas, pois as complexas relações da água com o meio subterrâneo acontecem em uma escala que foge à capacidade do modelo em representá-las matematicamente. Na construção desse modelo todos os dados disponíveis (como o nível da água subterrânea, drenagens, unidades hidrogeológicas, topografia e propriedades hidráulicas) foram incorporados numericamente.

O entendimento conceitual detalhado é uma condição crítica para o desenvolvimento do modelo que, uma vez construído, deve ser calibrado para representar as condições médias de campo observadas em determinado período, garantido a sua confiabilidade e assertividade para simulações preditivas.



Posto isso, nesta seção é descrita a sequência lógica de construção do modelo numérico representativo dos platôs N1 e N2, conforme os itens que se seguem.

### 4.1 ESCOLHA DO APLICATIVO

O modelo numérico de fluxo da água subterrânea para a área que circunscreve os platôs N1 e N2 foi desenvolvido usando o aplicativo *FEFLOW* (WASY, 2005), versão 6.2. O *FEFLOW* (*Finite Element Subsurface Flow & Transport Simulation System*) é uma sofisticada ferramenta computacional de simulação do fluxo de calor e massa no solo, em duas e três dimensões, em condições saturadas e não saturadas. Ele utiliza o método numérico de elementos finitos (FEM) para a resolução das equações diferenciais parciais que descrevem esses fenômenos (DIERSCH, 2002). O método de elementos finitos proporciona maior flexibilidade no desenho da malha do que as grades retilíneas empregadas por aplicativos que utilizam o método de diferenças finitas (e.g. MODFLOW). Isso permite o refinamento da malha em torno de pontos específicos, como poços, e de características lineares, tais como drenagens, fraturas e condutos abertos.

Além das vantagens decorrentes do fato de o *FEFLOW* utilizar a técnica dos elementos finitos, ele ainda apresenta uma excelente interface gráfica e comunicação direta com outros programas computacionais de grande utilidade e ampla utilização, como a ferramenta de geoprocessamento QGIS e a planilha eletrônica Microsoft Excel. Associadas a essas



		<b>ELABORAÇÃO DE ESTUDO HIDROGEOLÓGICO NOS PLATÔS DE N1/N2 EM CARAJÁS</b>	
<b>MODELO HIDROGEOLÓGICO CONCEITUAL E NUMÉRICO</b>  <b>RELATÓRIO TÉCNICO EIA</b>		Nº VALE -	PÁGINA <b>52/92</b>
		Nº CONTRATADA -	REV. <b>1</b>

características, as funções do *FEFLOW* possibilitam grande flexibilidade na representação do sistema a ser modelado e na visualização de seus resultados, permitindo o aproveitamento de toda a informação conhecida da área e gerada na modelagem.

Algumas dessas funções incluem: i) ferramentas gráficas de geração da malha de elementos finitos para ambientes simples ou complexos, permitindo a atribuição de características do meio, de suas condições iniciais e de contorno de forma completamente distribuída; ii) interface direta com bases de dados pontuais, lineares e poligonais; iii) rotinas internas de interpolação de dados discretos; iv) ferramentas de visualização e extração dos resultados da modelagem que, em sua forma mais discreta, podem ser exportados diretamente para a planilha Excel com os valores obtidos em cada nó do domínio espacial do problema.

Em relação à integração entre os recursos hídricos superficiais e subterrâneos, o *FEFLOW* possui ferramentas que permitem o acoplamento entre essas duas fases do ciclo hidrológico. A forma discreta com que o *FEFLOW* é capaz de introduzir elementos unidimensionais (1D) e bidimensionais (2D) no meio poroso (2D ou 3D) possibilita a representação de canais, drenos, fraturas, poços, rios, reservatórios, túneis e outras formas de condução e armazenamento de água no sistema. A esses elementos discretos pode-se atribuir diferentes leis que regem o fluxo da água, como as equações de *Darcy*, *Hagen-Poiseuille* ou *Manning-Strickler*. É importante ressaltar que nos pontos (ou nós) de conexão entre esses diferentes elementos submetidos a leis de fluxo distintas, a resolução dos cálculos é efetuada de forma integrada e simultânea, seguindo o método de elementos finitos utilizado na modelagem.



O trabalho que melhor descreve as equações e métodos utilizados pelo programa *FEFLOW* é apresentado por DIERSCH e PERROCHET (1999). Segundo esses autores, a forma da equação de Richards utilizada no *FEFLOW* é aquela que descreve o fluxo da água em meio poroso variavelmente saturado. As características descritas acima fazem do *FEFLOW* uma ferramenta com potencial de uso em muitas situações distintas, podendo ser aplicado desde a solução de problemas mais simples, como a simulação do fluxo vertical da água em uma coluna de solo homogêneo, até outros muito complexos, como os de fluxo tridimensional de água em regiões com grande variabilidade espacial de características do meio.

## 4.2 CONSTRUÇÃO DO MODELO

Na construção deste modelo foi levada em consideração uma área suficientemente abrangente para incorporar os cursos de água de maior interesse e outros atributos e pontos descritos no modelo conceitual, além da maior parte da Área Diretamente Afetada (ADA). Os passos de construção do modelo *FEFLOW* dos platôs N1 e N2 são apresentados a seguir.

### 4.2.1 Domínio do modelo e geração da malha

A localização, extensão e malha de elementos finitos do modelo dos platôs N1 e N2 estão apresentados na Figura 4.1. O modelo numérico abrange área de aproximadamente 60 km<sup>2</sup> e sua malha incorpora trechos de montante de todas as principais drenagens que circunscrevem os platôs. Se referem a afluentes de segunda e terceira ordem do igarapé Azul, que envolve

		<b>ELABORAÇÃO DE ESTUDO HIDROGEOLÓGICO NOS PLATÔS DE N1/N2 EM CARAJÁS</b>	
<b>MODELO HIDROGEOLÓGICO CONCEITUAL E NUMÉRICO</b>  <b>RELATÓRIO TÉCNICO EIA</b>		Nº VALE -	PÁGINA <b>53/92</b>
		Nº CONTRATADA -	REV. <b>1</b>

o platô de N1, além de trecho de cabeceira do igarapé Mombaca, afluente da margem direita do igarapé Gelado, localizado na porção norte do platô N2.

Conforme já mencionado no capítulo correspondente à construção do modelo geológico 3D, a malha aqui descrita foi importada para o *Leapfrog* onde foram definidas as zonas de mesma condutividade hidráulica, de acordo com a unidade hidrogeológica correspondente. No desenho dessa malha, a superfície topográfica utilizada como limite superior se refere àquela descrita no item 2.3 deste documento. A partir dessas informações foi gerado um modelo digital de terreno, interpolado com resolução de 10 x 10 metros, que permitiu a visualização da distribuição espacial da rede de drenagem, dos pontos de monitoramento e das nascentes. Ressalta-se que estas informações foram usadas como referência para a calibração do modelo numérico em condição estacionária. Portanto, considerando a condição natural da área e a pequena oscilação dos dados de monitoramento piezométrico, todos os dados necessários deverão consistir em uma representação média dos valores adquiridos.

Como observado na Figura 4.1, a malha do modelo é refinada em porções onde é importante se ter uma melhor definição da superfície potenciométrica e de controle de fluxo nos platôs, como drenagens, estruturas geológicas mais representativas e posições das futuras cavas. Por sua vez, a malha de drenagem original disponibilizada pela VALE (escala 1:50.000) teve que ser ajustada para coincidir com os talwegues desenhados no modelo digital de terreno, dirimindo erros nas delimitações de bacias e cálculo de suas respectivas áreas de contribuição. Feitos os ajustes necessários, a malha do modelo foi gerada usando a opção *automatic triangle* (SHEWCHUK, 2002), ferramenta disponível no *FEFLOW*. Esse recurso oferece a capacidade de definir uma variação local da densidade da malha, permitindo o refinamento em torno de pontos e de linhas de interesse, tais como poços, drenagens e falhas. Assim, a malha do modelo regional ficou representada por 1.400.400 elementos e 740.896 nós.



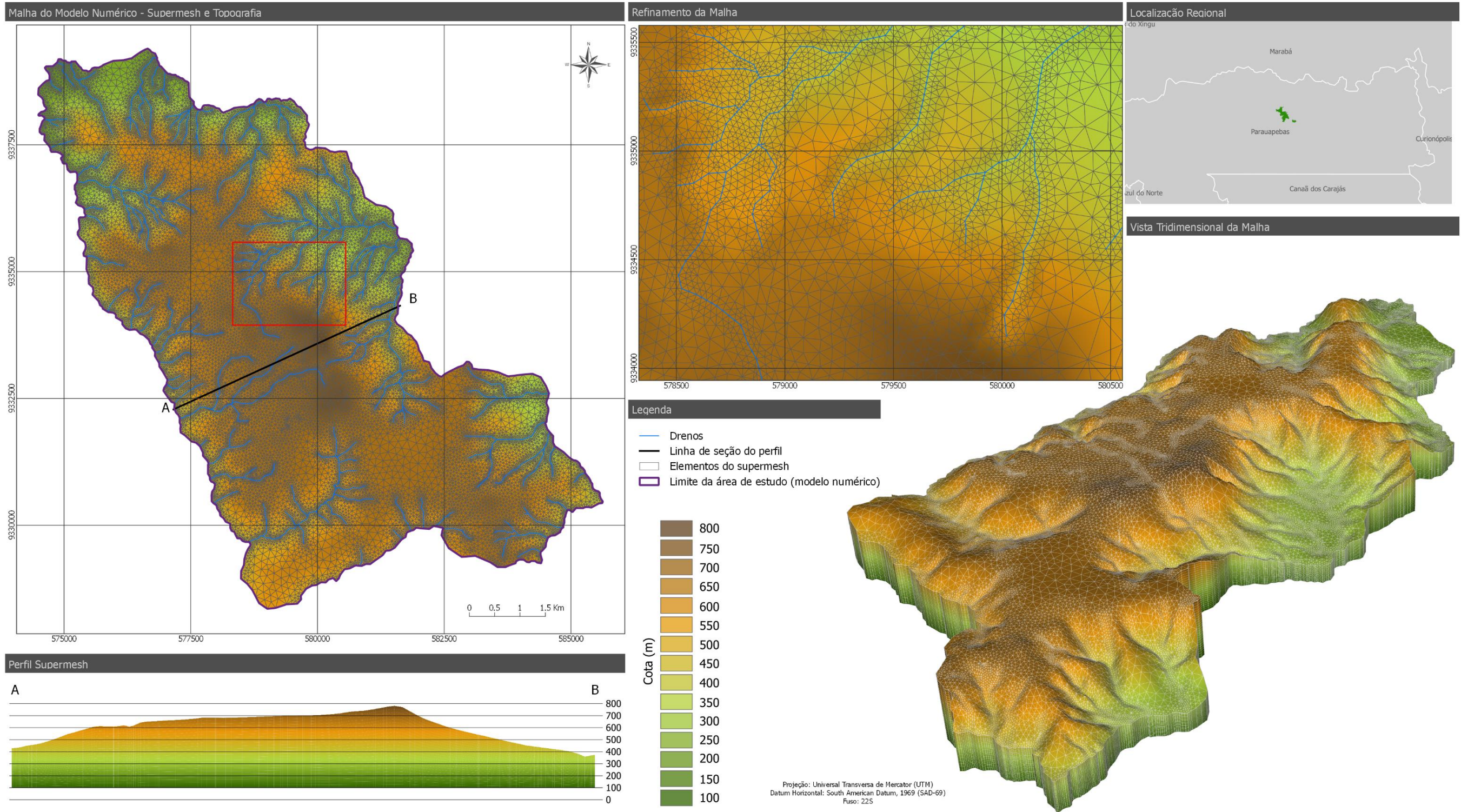




Figura 4.1 – Variação topográfica e malha de elementos finitos (*supermesh*) utilizada no modelo numérico *FEFLOW*.



		<b>ELABORAÇÃO DE ESTUDO HIDROGEOLÓGICO NOS PLATÔS DE N1/N2 EM CARAJÁS</b>	
<b>MODELO HIDROGEOLÓGICO CONCEITUAL E NUMÉRICO</b>  <b>RELATÓRIO TÉCNICO EIA</b>		Nº VALE -	PÁGINA <b>55/92</b>
		Nº CONTRATADA -	REV. <b>1</b>

#### 4.2.2 Geometria 3D do Modelo e Propriedades Hidráulicas



A Tabela 2.1 (item 2.2.1) apresentou um sumário das unidades hidrogeológicas representadas no modelo numérico de fluxo das águas subterrâneas. Conforme apresentado no modelo conceitual (item 3), a representação tridimensional das unidades hidrogeológicas do modelo foi interpretada a partir de mapas de superfície e de informações de furos de sondagem traduzidas para os modelos de geológicos de blocos dos platôs N1 e N2, a partir da construção de um modelo geológico tridimensional.

Na Figura 4.2 é mostrado o resultado da tradução do modelo geológico tridimensional para o ambiente *FEFLOW*. Devido à condição de mergulho das camadas geológicas, a variação das unidades hidrogeológicas em profundidade foi representada por 25 camadas numéricas. A distribuição destas camadas geológicas refere-se à distribuição das condutividades hidráulicas no sistema de fluxo tridimensional. Para tanto, foi utilizada ferramenta do *Leapfrog* que permite exportação do modelo geológico a partir da incorporação prévia da malha construída no *FEFLOW*. Esse processo garante que a geologia tridimensional construída seja representada no *FEFLOW* de forma satisfatória.

Além das unidades hidrogeológicas regionais, no modelo também foram incorporadas as subunidades do aquífero Carajás, suas coberturas e falhas consideradas de maior importância no condicionamento do fluxo da água subterrânea. As falhas foram assumidas como estruturas com preenchimento, e estas foram incorporadas no modelo numérico seguindo a condição de fluxo atribuída pela *Lei de Darcy* para elementos discretos. Neste caso, tem-se o controle da abertura e da condutividade hidráulica das estruturas, sendo os ajustes e valores finais destes parâmetros inerentes ao processo de calibração do modelo. A semelhança das unidades hidrogeológicas, a falha de empurrão a oeste dos platôs e a zona de contato das formações ferríferas e cangas com demais unidades foram representadas no modelo como elementos de condutividades diferenciadas, e não como elementos discretos. Isso dá maior liberdade na calibração do modelo ao permitir que essas estruturas assumam um intervalo maior de condutividades hidráulica.

#### 4.2.3 Condições de Contorno

As condições de contorno representam a interação entre o domínio do modelo e o ambiente circundante. O *FEFLOW* aceita quatro tipos de condição de controle principais, quais sejam: i) fluxo especificado: para representar a recarga direta através da camada superior do modelo; ii) carga hidráulica dependente de fluxo: para representar as fronteiras do modelo e a condição de fluxo regional impostas a elas; iii) carga hidráulica especificada: para representar as drenagens conectadas ao sistema de fluxo das águas subterrâneas; e, iv) poços de bombeamento: para representar poços com filtros instalados em uma camada específica do modelo. Entretanto, neste modelo estão inseridas duas delas, que são as de fluxo especificado e de carga hidráulica especificada, para representar a recarga e as drenagens. Estas condições estão apresentadas na Figura 4.3.

		<b>ELABORAÇÃO DE ESTUDO HIDROGEOLÓGICO NOS PLATÔS DE N1/N2 EM CARAJÁS</b>	
<b>MODELO HIDROGEOLÓGICO CONCEITUAL E NUMÉRICO</b>  <b>RELATÓRIO TÉCNICO EIA</b>		Nº VALE -	PÁGINA <b>56/92</b>
		Nº CONTRATADA -	REV. <b>1</b>

Outra condição de contorno que foi inserida no modelo foram as falhas consideradas de maior importância no condicionamento do fluxo da água subterrânea, de forma que o modelo numérico ficasse aderente com o modelo conceitual apresentado, visto que estas falhas foram consideradas na etapa da preparação da malha. As falhas foram inseridas como elementos discretos, condicionado o fluxo pela *Lei de Darcy*. Devido ao desconhecimento do comportamento dessas fraturas, inclusive em profundidade, optou-se por restringi-las até a camada 10 do modelo. A Figura 4.4 mostra a distribuição das fraturas na área N1.

#### 4.2.3.1 Recarga Direta

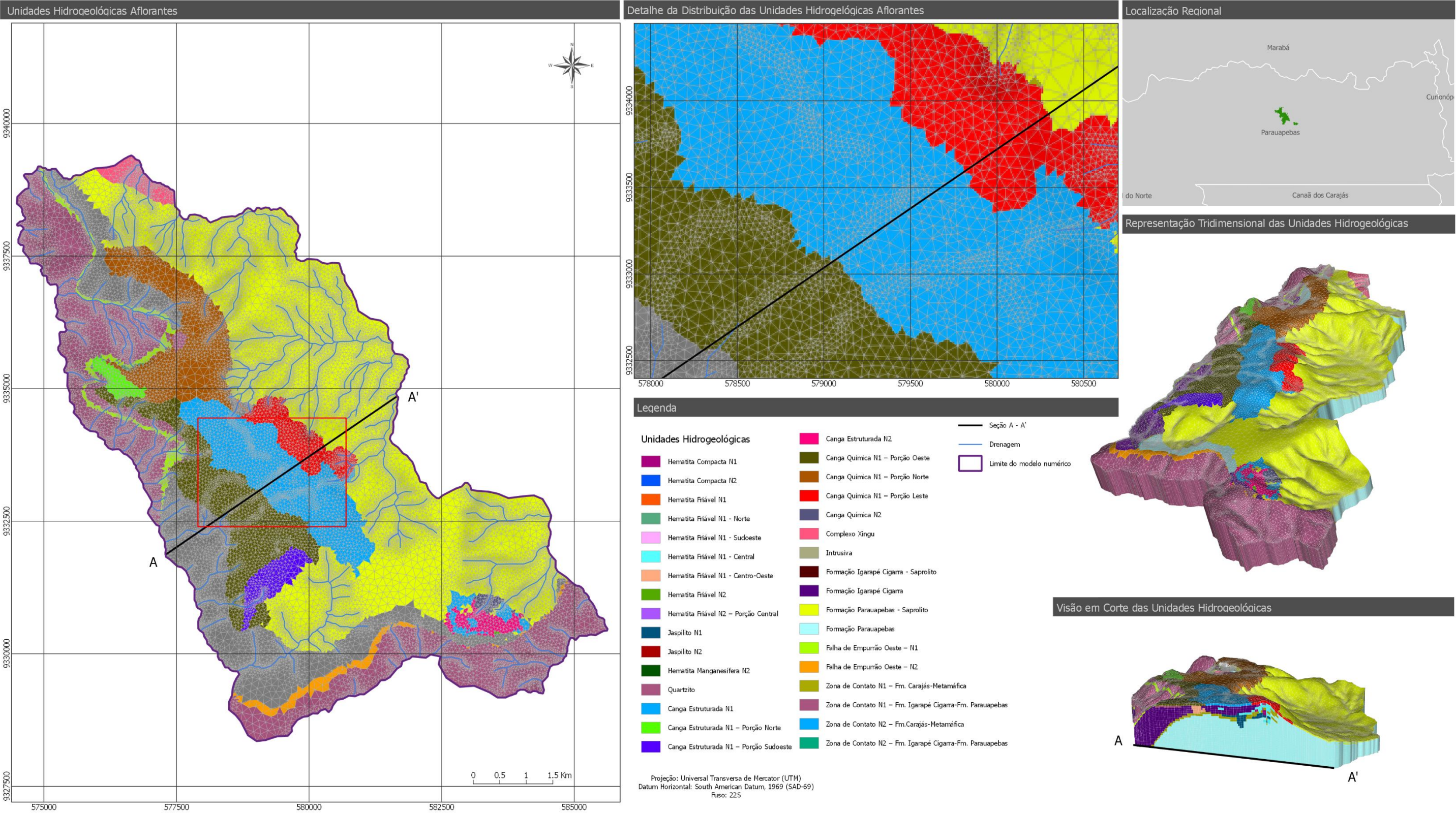
A recarga direta, pela infiltração de águas precipitadas, ocorre em todas as porções de bacia consideradas no modelo numérico, exceto onde a água é diretamente descarregada para os corpos hídricos superficiais. De maneira geral, a recarga é dependente da inclinação da superfície do terreno, da conectividade entre as estruturas geológicas, da umidade do solo e do tipo de material rochoso. Neste estudo, a topografia, aliada à distribuição das unidades rochosas e de cobertura, além do fraturamento inerente às coberturas duras de canga, foi considerada o fator preponderante para a efetivação da recarga na área do modelo.

Como apresentado na Tabela 2.1 (item 2.2.1), as taxas de recarga são representativas de valores médios reconhecidos na literatura para rochas semelhantes, ou a partir de estudos de modelagem já realizados na região. Além disso, observações de campo auxiliaram a balizar a definição de zonas de recarga diferenciadas. Os valores típicos são representados a partir de percentuais relativos da precipitação média (2.360 mm/ano), sendo os valores aplicados efetivamente reconhecidos como resultado da calibração do modelo numérico. A aplicação dessas taxas de recarga seguiu a distribuição das principais unidades geológicas de cobertura na área, representada na Figura 4.3.

#### 4.2.3.2 Cursos de água e descargas

A malha de elementos finitos do modelo foi projetada para estar em conformidade com a distribuição das principais drenagens identificadas nas bacias de entorno dos platôs. A condição de contorno de carga hidráulica específica foi aplicada à camada superficial do modelo para representar a interação das drenagens com as águas subterrâneas, conforme mostrado na Figura 4.3. Este tipo de condição de contorno permite que o modelo simule a resistência potencial para fluxo entre as drenagens e o aquífero sotoposto. Isso foi realizado pela especificação de uma condição de restrição de fluxo (*constrain*), que impõe que as drenagens tenham a função de retirar água do aquífero quando estas efetivamente interceptam o nível d'água localizado em posições mais profundas.







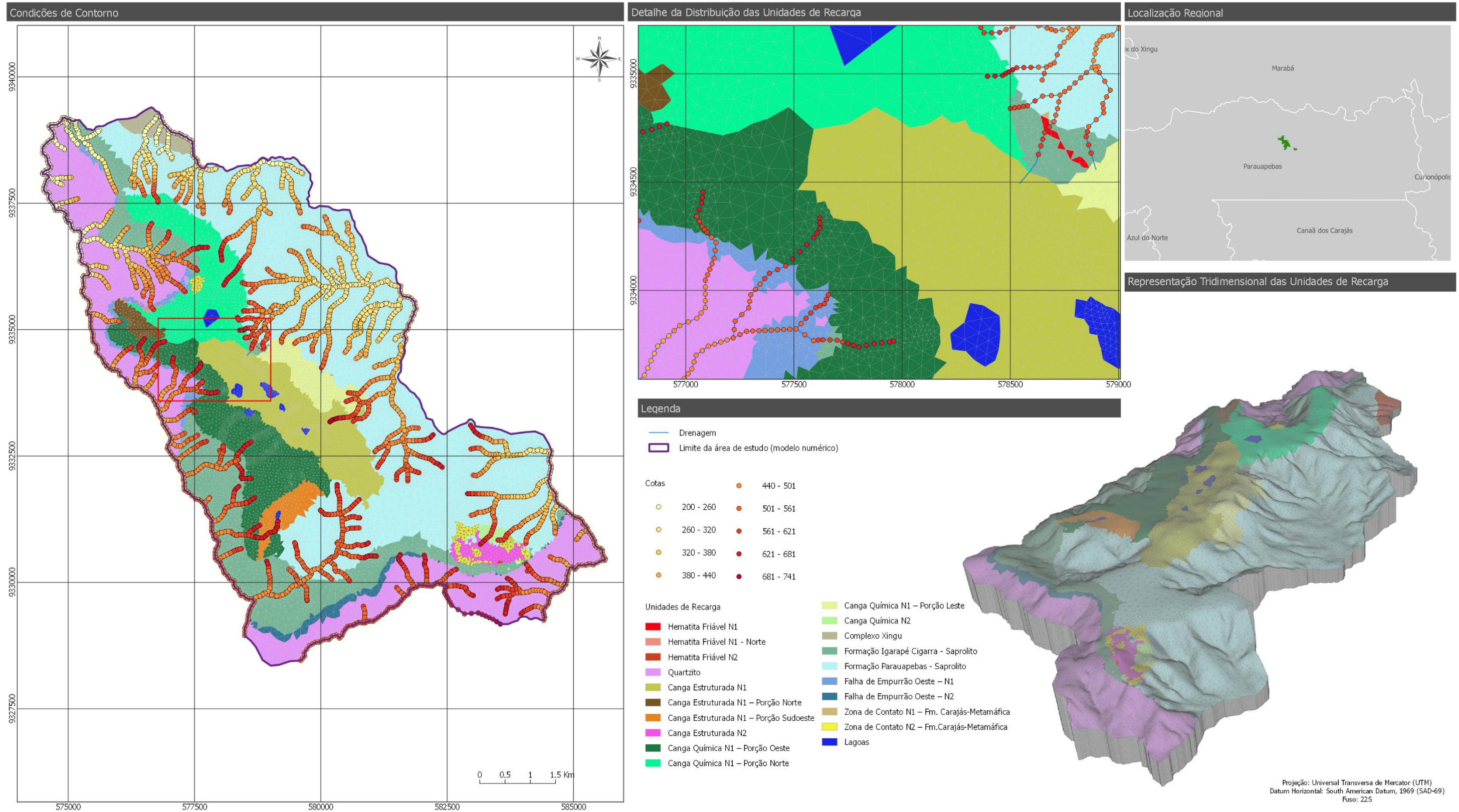


Figura 4.3 – Distribuição das condições de contorno aplicadas ao modelo numérico FEFLOW.



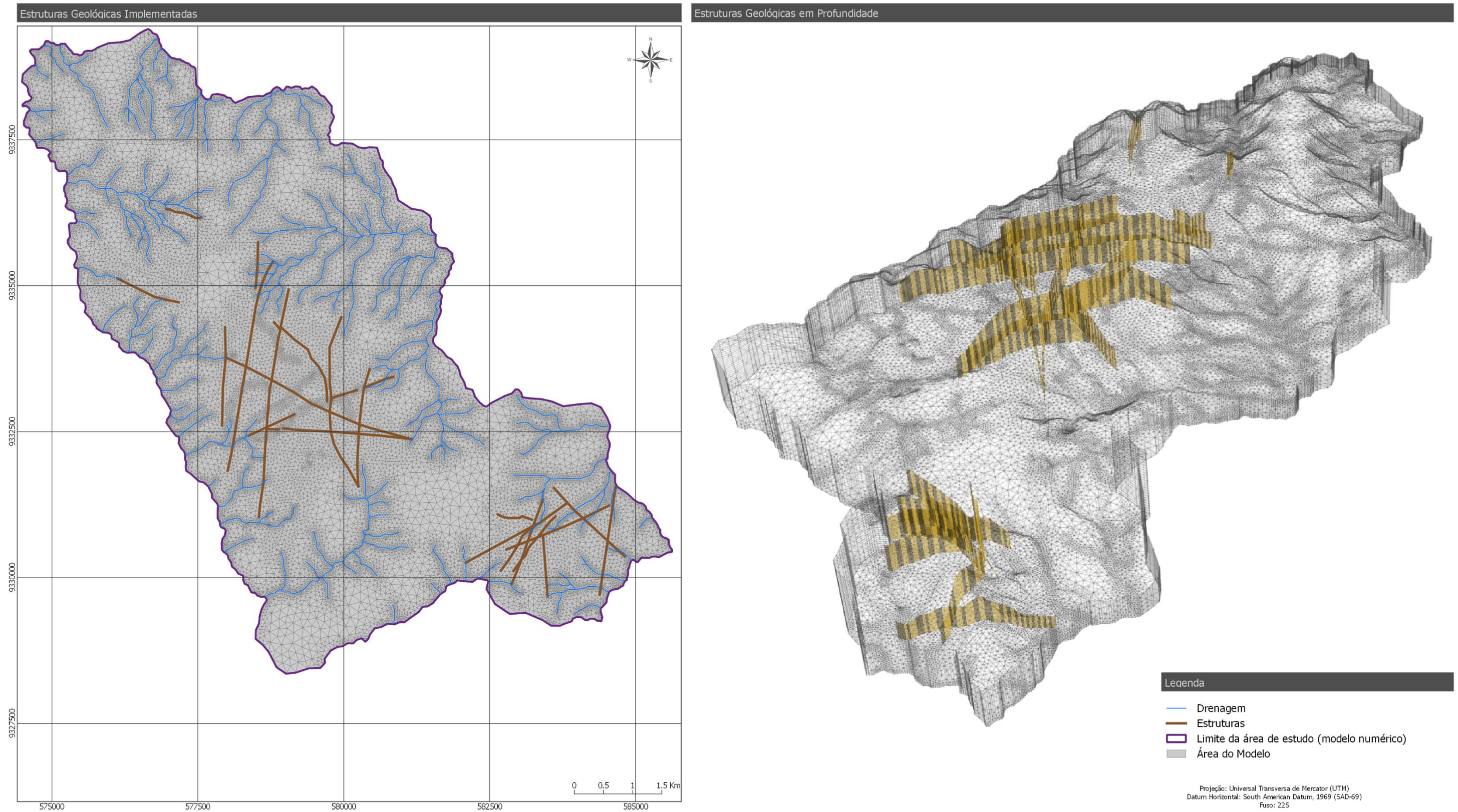




Figura 4.4 – Estruturas geológicas implementadas no modelo numérico.



		<b>ELABORAÇÃO DE ESTUDO HIDROGEOLÓGICO NOS PLATÔS DE N1/N2 EM CARAJÁS</b>	
<b>MODELO HIDROGEOLÓGICO CONCEITUAL E NUMÉRICO</b>  <b>RELATÓRIO TÉCNICO EIA</b>		Nº VALE -	PÁGINA <b>60/92</b>
		Nº CONTRATADA -	REV. <b>1</b>

### 4.3 CALIBRAÇÃO DO MODELO

Um aspecto importante da modelagem hidrogeológica consiste em comparar e verificar o modelo numérico com as condições reais de campo traduzidas pelos dados de monitoramento. Este procedimento se traduz na calibração e é o que permite obter um modelo estatisticamente representativo das condições de campo. Neste estudo, o modelo numérico foi calibrado para um conjunto de cargas hidráulicas e de vazões de escoamento de base que representam as condições de fluxo das águas subterrâneas no estado estacionário.

Inicialmente, a calibração do modelo foi conduzida usando uma abordagem iterativa de tentativa e erro. Nesta abordagem, as cargas hidráulicas resultantes foram comparadas àquelas observadas em campo, e os parâmetros de entrada do modelo foram reajustados para alcançar a melhor concordância com as condições observadas. Assim, o procedimento de calibração do modelo envolveu o ajuste de valores de condutividade hidráulica e recarga para fazer com que os valores medidos em campo estejam dentro de um intervalo de erro preestabelecido. Neste contexto, os resultados de calibração do modelo são avaliados usando medidas estatísticas baseadas no resíduo de calibração, quais sejam:



- Erro médio (ME): representa a média de todos os resíduos. Este parâmetro pode ser enganoso porque a soma de valores residuais negativos e positivos pode ser igual a zero. O erro médio deve fornecer uma indicação se os resíduos são tendenciosamente positivos ou negativos.
- Erro médio absoluto (MAE): representa a média dos valores absolutos de todos os resíduos. Este parâmetro será maior do que o erro médio e fornece a média de erro associada com cada ponto de calibração no modelo.
- Raiz do erro quadrado médio (RMS): representa a raiz quadrada da soma dos quadrados de todos os residuais. A quadratura dos resíduos aumenta a ponderação para que um resíduo pequeno seja considerado na estatística global de calibração.
- Raiz do erro quadrado médio normalizado (NRMS): representa o RMS dividido pela diferença entre a maior e menor carga hidráulica observada dentro do modelo.

Cumpramos ressaltar que um valor baixo de NRMS, inferior a 10%, é considerado a melhor medida de uma boa calibração de modelos numéricos quanto à variação das cargas hidráulicas locais. Outro aspecto importante da calibração é o balanço de massa do modelo, que revela os quantitativos de entrada e saída de água do sistema aquífero. Este balanço é particularmente importante para a avaliação preditiva dos possíveis impactos no fluxo de base local. Neste caso, espera-se que a diferença entre as entradas e saídas de água do modelo seja próxima de zero, revelando, assim, boas condições de calibração.

#### 4.3.1 Resultados de calibração

A calibração em regime estacionário foi conduzida para comparar os níveis d'água simulados pelo modelo com aqueles medidos nos piezômetros e medidores de nível d'água. No processo de calibração, foi utilizada a média do nível d'água medido em campo durante o período seco.





		<b>ELABORAÇÃO DE ESTUDO HIDROGEOLÓGICO NOS PLATÔS DE N1/N2 EM CARAJÁS</b>	
<b>MODELO HIDROGEOLÓGICO CONCEITUAL E NUMÉRICO</b>  <b>RELATÓRIO TÉCNICO EIA</b>		Nº VALE -	PÁGINA <b>61/92</b>
		Nº CONTRATADA -	REV. <b>1</b>

Os pontos de calibração de nível d'água utilizados foram 8 piezômetros locados em furos de sondagem e monitorados pela Vale, além de 11 piezômetros e medidores de nível d'água recém construídos. O piezômetro FS-188 não foi utilizado na calibração devido à ausência de medidas, bem como os instrumentos PZ-01 e PZ-06 de N1 e o instrumento N2-PZ-05 situado em N2, os quais se encontravam secos. A Tabela 4.1 a seguir mostra a relação dos piezômetros utilizados na calibração e seus respectivos níveis de água, dentre outras informações. Teve-se a preocupação de ajustar os valores de cota da boca e no nível d'água ao modelo digital de terreno usado na construção modelo numérico, de modo a garantir a conformidade entre as informações e dirimir erros devido à imprecisão do GPS utilizado em campo para o registro da cota dos instrumentos.

**Tabela 4.1 – Piezômetros utilizados na calibração**

Nome	UTM-E (m)	UTM-N (m)	Cota da Boca (mNM)	Profundidade do N.A (m)	Cota do N. A (mNM)	Profundidade do fundo (m)	Profundidade do filtro (m)
FS-57	580.026	9.333.212	716,34	83,72	632,62	129,40	106,56
FS-58	579.870	9.333.088	710,00	71,86	638,14	171,00	121,50
FS-62	580.057	9.333.492	759,40	73,90	685,50	127,00	109,00
FS-63	579.901	9.333.368	741,46	63,95	677,51	114,20	89,10
FS-65	579.590	9.333.121	708,18	42,40	665,78	112,40	77,20
FS-83	579.029	9.333.138	691,06	15,18	675,88	234,50	82,53
FS-182	578.317	9.334.398	677,14	71,59	605,54	130,10	101,05
FS-194	577.482	9.335.776	666,17	64,58	601,59	203,80	134,40
FS-206	579.095	9.333.744	698,50	37,88	660,62	120,60	79,30
PZ-02	576.760	9.334.986	671,19	62,96	608,23	90,00	69,48
PZ-03	578.530	9.334.188	676,46	85,26	591,20	220,45	213,50
PZ-04	578.533	9.333.258	677,40	27,36	650,04	125,00	96,00
PZ-05	579.323	9.333.924	714,58	56,43	658,15	240,05	140,22
PZ-07	580.133	9.332.929	720,73	83,15	637,58	202,25	187,50
PZ-08	580.137	9.332.664	750,54	109,47	641,07	250,00	159,50
PZ-09	580.155	9.332.413	762,90	123,24	639,66	250,00	225,00
PZ-10	579.113	9.331.100	669,98	3,82	666,16	108,85	93,50
N2-PZ-01	582.700	9.330.800	666,00	69,02	596,98	100,00	69,51
N2-PZ-02	583.100	9.330.600	675,00	63,70	611,00	90,00	71,55
N2-PZ-07	583.463	9.330.437	712,00	127,49	584,51	130,10	128,75

A precipitação de referência considerada na calibração em regime estacionário foi de 2.360 mm/ano, monitorada na estação da Mina N5W. A Tabela 4.2 mostra as condutividades hidráulicas resultantes da calibração do modelo numérico de fluxo juntamente com os valores de recarga obtidos na calibração. A maioria desses valores está situada no intervalo de valores típicos de condutividade hidráulica disponível da literatura. A condutividade hidráulica obtida na calibração do jaspelito do platô N1 é mais baixa que o intervalo considerado para as formações ferríferas, entretanto é importante destacar que esta unidade está situada a grandes profundidades, com pouca ou nenhuma porosidade granular. As unidades “Falha de Empurrão Oeste” e “Zona de Contato” não apresentam valores de referência. Durante a calibração, as condutividades hidráulicas atribuídas para essas unidades foram em geral superiores às das unidades encaixantes, representadas pelas formações Parauapebas, Igarapé Cigarra e Águas Claras. Além das condutividades e recarga das unidades hidrogeológicas, as estruturas geológicas inseridas como feições discretas também foram calibradas. A Tabela 4.3 contém condutividades e aberturas finais da calibração. As Figuras 4.6 e 4.7 a seguir mostram, respectivamente, a superfície potenciométrica e o efeito das fraturas no direcionamento do nível d'água na camada 7 do modelo.

		<b>ELABORAÇÃO DE ESTUDO HIDROGEOLÓGICO NOS PLATÔS DE N1/N2 EM CARAJÁS</b>	
<b>MODELO HIDROGEOLÓGICO CONCEITUAL E NUMÉRICO</b>  <b>RELATÓRIO TÉCNICO EIA</b>		Nº VALE -	PÁGINA <b>62/92</b>
		Nº CONTRATADA -	REV. <b>1</b>

O erro médio obtido foi de 10,37 metros e a média quadrática dos erros foi de 12,32 metros. A média quadrática dos erros normalizada (NRMS - que leva em consideração a variação total entre o nível máximo e o nível mínimo observado) obtida foi de 12,21%. O NRMS ficou acima de 10%, que é o valor máximo esperado para calibrações de modelos numéricos. Esse resultado será discutido no item 4.4 deste relatório. A Figura 4.8 mostra o gráfico de dispersão com a correspondência obtida entre as cargas hidráulicas observadas (medidas) e as cargas hidráulicas calculadas pelo modelo.

		ELABORAÇÃO DE ESTUDO HIDROGEOLÓGICO NOS PLATÔS DE N1/N2 EM CARAJÁS	
MODELO HIDROGEOLÓGICO CONCEITUAL E NUMÉRICO  RELATÓRIO TÉCNICO EIA	Nº VALE	-	PÁGINA  63/92
	Nº CONTRATADA	-	REV.  1

Tabela 4.2 –Valores hidrodinâmicos resultantes da calibração

Sistema Hidrogeológico	Unidades Hidrogeológicas	Sigla Litotipo	Litotipo	Intervalos dos Valores Típicos de Condutividade Hidráulica, K <sub>xy</sub> (cm/s)	K <sub>xx</sub> obtido na calibração (cm/s)	K <sub>yy</sub> obtido na calibração (cm/s)	K <sub>zz</sub> obtido na calibração (cm/s)	Recarga obtida na calibração (% da precipitação)
em Formações Ferríferas	Aquífero Carajás	FCHC N1	Hematita Compacta N1	1,0 x 10 <sup>-4</sup> a 1,0 x 10 <sup>-2</sup>	6,00 x 10 <sup>-4</sup>	6,00 x 10 <sup>-4</sup>	6,00 x 10 <sup>-4</sup>	Unidade Não Aflorante
		FCHC N2	Hematita Compacta N2		1,00 x 10 <sup>-4</sup>	1,00 x 10 <sup>-4</sup>	1,00 x 10 <sup>-4</sup>	Unidade Não Aflorante
		FCHF N1	Hematita Friável N1		8,00 x 10 <sup>-3</sup>	8,00 x 10 <sup>-3</sup>	8,00 x 10 <sup>-3</sup>	34%
		FCHF N1 – Norte	Hematita Friável N1 – Porção Norte		3,61 x 10 <sup>-4</sup>	3,61 x 10 <sup>-4</sup>	3,61 x 10 <sup>-5</sup>	Unidade Não Aflorante
		FCHF N1 - Sudoeste	Hematita Friável N1 – Porção Sudoeste		1,49 x 10 <sup>-4</sup>	1,49 x 10 <sup>-4</sup>	1,49 x 10 <sup>-4</sup>	Unidade Não Aflorante
		FCHF N1 - Central	Hematita Friável N1 – Porção Central		1,00 x 10 <sup>-3</sup>	1,00 x 10 <sup>-3</sup>	1,00 x 10 <sup>-3</sup>	Unidade Não Aflorante
		FCHF N1 – Centro-oeste	Hematita Friável N1 – Porção Centro-oeste		1,79 x 10 <sup>-4</sup>	1,79 x 10 <sup>-4</sup>	1,79 x 10 <sup>-4</sup>	Unidade Não Aflorante
		FCHF N2	Hematita Friável N2		5,00 x 10 <sup>-3</sup>	5,00 x 10 <sup>-3</sup>	5,00 x 10 <sup>-3</sup>	Unidade Não Aflorante
		FCHF N2 - Centro	Hematita Friável N2 – Porção Central		1,00 x 10 <sup>-4</sup>	1,00 x 10 <sup>-4</sup>	5,00 x 10 <sup>-4</sup>	30%
		FCJP N1	Jaspelito N1		1,00 x 10 <sup>-5</sup>	1,00 x 10 <sup>-5</sup>	1,00 x 10 <sup>-5</sup>	Unidade Não Aflorante
		FCJP N2	Jaspelito N2		1,00 x 10 <sup>-4</sup>	1,00 x 10 <sup>-4</sup>	1,00 x 10 <sup>-4</sup>	Unidade Não Aflorante
		FCFM N2	Hematita Manganêsífera N2		3,49 x 10 <sup>-4</sup>	3,49 x 10 <sup>-4</sup>	3,49 x 10 <sup>-4</sup>	Unidade Não Aflorante
em Rochas Metareníticas	Aquífero Águas Claras-Quartzito	ACQT	Quartzito	1,0 x 10 <sup>-5</sup> a 1,0 x 10 <sup>-3</sup>	1,0 x 10 <sup>-5</sup>	1, x 10 <sup>-5</sup>	1,0 x 10 <sup>-5</sup>	17%
	Aquífero em Cangas e Lateritas	SPCE N1 - Centro	Canga Estruturada N1 – Porção Central	5,0 x 10 <sup>-6</sup> a 5,0 x 10 <sup>-2</sup>	9,00 x 10 <sup>-4</sup>	9,00 x 10 <sup>-4</sup>	7,00 x 10 <sup>-4</sup>	30%
		SPCE N1 - Norte	Canga Estruturada N1 – Porção Norte		1,00 x 10 <sup>-4</sup>	1,00 x 10 <sup>-4</sup>	9,00 x 10 <sup>-3</sup>	40%
		SPCE N1 - Sudoeste	Canga Estruturada N1 – Porção Sudoeste		4,7 x 10 <sup>-4</sup>	4,7 x 10 <sup>-4</sup>	4,70 x 10 <sup>-4</sup>	35%
		SPCE N2	Canga Estruturada N2		8,61 x 10 <sup>-3</sup>	8,61 x 10 <sup>-3</sup>	8,61 x 10 <sup>-3</sup>	25%
		SPCQ N1	Canga Química N1 – Porção Oeste		3,00 x 10 <sup>-4</sup>	3,00 x 10 <sup>-4</sup>	8,00 x 10 <sup>-5</sup>	10%
		SPCQ N1 - Norte	Canga Química N1 – Porção Norte		3,00 x 10 <sup>-4</sup>	3,00 x 10 <sup>-4</sup>	9,00 x 10 <sup>-4</sup>	15%
		SPCQ N1 - Leste	Canga Química N1 – Porção Leste		2,00 x 10 <sup>-5</sup>	2,00 x 10 <sup>-5</sup>	1,00 x 10 <sup>-5</sup>	35%
		SPCQ N2	Canga Química N2		2,83 x 10 <sup>-4</sup>	2,83 x 10 <sup>-4</sup>	2,83 x 10 <sup>-4</sup>	25%



		ELABORAÇÃO DE ESTUDO HIDROGEOLÓGICO NOS PLATÔS DE N1/N2 EM CARAJÁS	
MODELO HIDROGEOLÓGICO CONCEITUAL E NUMÉRICO  RELATÓRIO TÉCNICO EIA		Nº VALE  -	PÁGINA  <b>64/92</b>
		Nº CONTRATADA  -	REV.  <b>1</b>

Sistema Hidrogeológico	Unidades Hidrogeológicas	Sigla Litotipo	Litotipo	Intervalos dos Valores Típicos de Condutividade Hidráulica, K <sub>xy</sub> (cm/s)	K <sub>xx</sub> obtido na calibração (cm/s)	K <sub>yy</sub> obtido na calibração (cm/s)	K <sub>zz</sub> obtido na calibração (cm/s)	Recarga obtida na calibração (% da precipitação)
em Rochas Cristalinas	Aquífero em Rochas Cristalinas	CXGG	Complexo Xingu	5,0 x 10 <sup>-7</sup> a 5,0 x 10 <sup>-3</sup>	1,66 x 10 <sup>-5</sup>	1,66 x 10 <sup>-5</sup>	1,66 x 10 <sup>-5</sup>	10%
em Rochas Metabásicas	Aquiclude em Diques Máficos	SUIT	Intrusiva	5,0 x 10 <sup>-8</sup> a 5,0 x 10 <sup>-6</sup>	5,00 x 10 <sup>-8</sup>	5,00 x 10 <sup>-8</sup>	5,00 x 10 <sup>-8</sup>	Unidade Não Aflorante
	Aquiclude Igarapé Cigarra	IGMAA	Formação Igarapé Cigarra - Saprolito		5,00 x 10 <sup>-5</sup>	5,00 x 10 <sup>-5</sup>	5,00 x 10 <sup>-5</sup>	4%
		IGMA	Formação Igarapé Cigarra		1,00 x 10 <sup>-7</sup>	1,00 x 10 <sup>-7</sup>	1,00 x 10 <sup>-7</sup>	Unidade Não Aflorante
	Aquiclude Parauapebas	PPMAA	Formação Parauapebas - Saprolito		5,00 x 10 <sup>-5</sup>	5,00 x 10 <sup>-5</sup>	5,00 x 10 <sup>-5</sup>	3%
		PPMA	Formação Parauapebas		1,0 x 10 <sup>-7</sup>	1,0 x 10 <sup>-7</sup>	1,0 x 10 <sup>-7</sup>	Unidade Não Aflorante
-	-	ETEF N1	Falha de Empurrão Oeste – N1	-	5,00 x 10 <sup>-4</sup>	5,00 x 10 <sup>-4</sup>	7,00 x 10 <sup>-4</sup>	20%
-	-	ETEF N2	Falha de Empurrão Oeste – N2	-	5,00 x 10 <sup>-5</sup>	5,00 x 10 <sup>-5</sup>	7,00 x 10 <sup>-5</sup>	25%
-	-	SUMA N1 – Superior	Zona de Contato N1 – Fm. Carajás-Metamáfica	-	9,00 x 10 <sup>-4</sup>	9,00 x 10 <sup>-4</sup>	5,50 x 10 <sup>-5</sup>	30%
-	-	SUMA N1 – Inferior	Zona de Contato N1 – Fm. Igarapé Cigarra-Fm. Parauapebas	-	2,50 x 10 <sup>-4</sup>	2,50 x 10 <sup>-4</sup>	2,50 x 10 <sup>-4</sup>	Unidade Não Aflorante
-	-	SUMA N2 – Superior	Zona de Contato N2 – Fm.Carajás - Metamáfica	-	8,61 x 10 <sup>-4</sup>	8,61 x 10 <sup>-4</sup>	5,3 x 10 <sup>-5</sup>	35%
-	-	SUMA N2 - Inferior	Zona de Contato N2 – Fm. Igarapé Cigarra-Fm. Parauapebas	-	8,61 x 10 <sup>-4</sup>	8,61 x 10 <sup>-4</sup>	5,3 x 10 <sup>-5</sup>	Unidade Não Aflorante

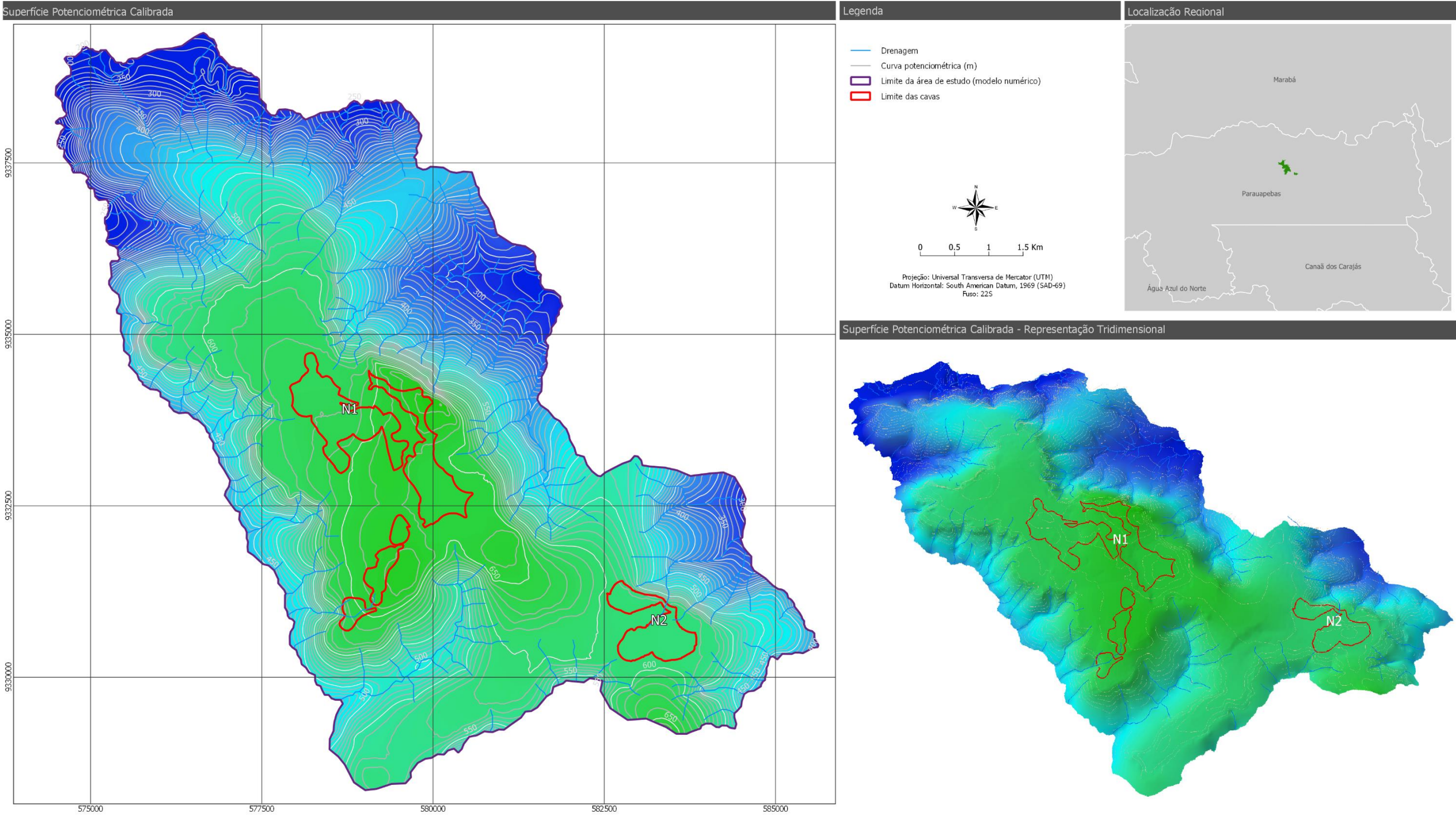


Figura 4.6 – Superfície potenciométrica calibrada – Situação atual.



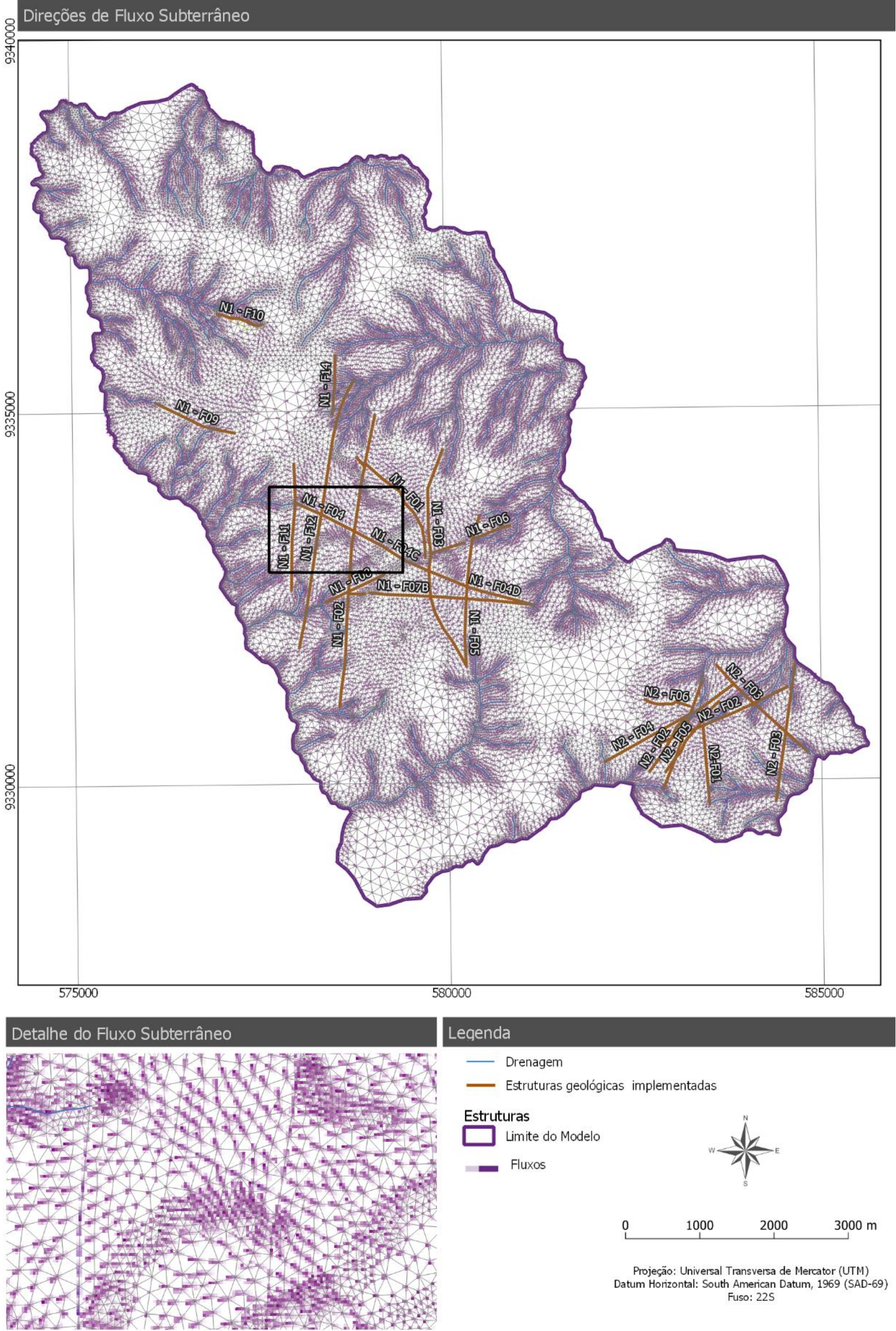






Figura 4.7 – Fluxo na camada 7 do modelo mostrando o efeito das fraturas.

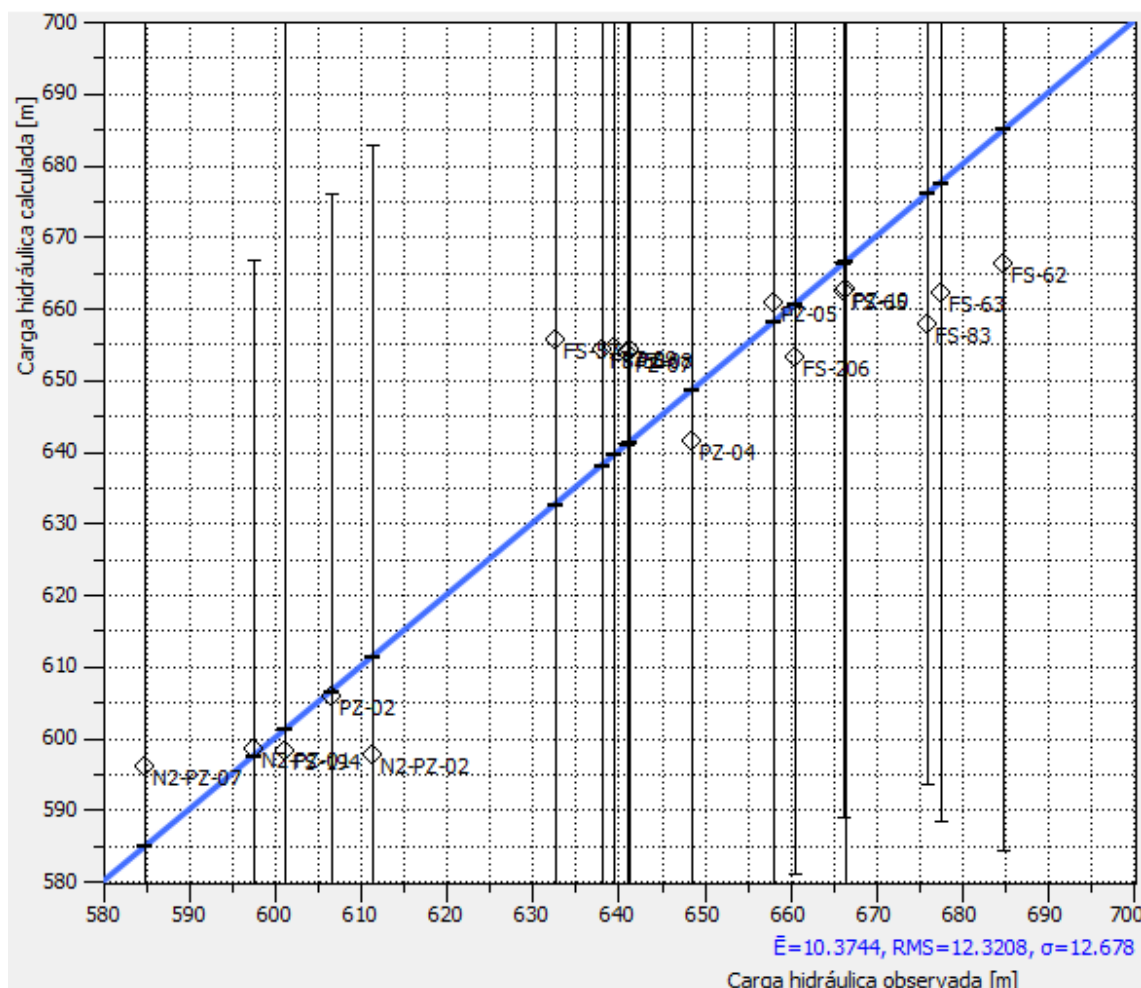


		<b>ELABORAÇÃO DE ESTUDO HIDROGEOLÓGICO NOS PLATÔS DE N1/N2 EM CARAJÁS</b>	
<b>MODELO HIDROGEOLÓGICO CONCEITUAL E NUMÉRICO</b>  <b>RELATÓRIO TÉCNICO EIA</b>		Nº VALE -	PÁGINA <b>67/92</b>
		Nº CONTRATADA -	REV. <b>1</b>

**Tabela 4.3** –Valores dos parâmetros hidrodinâmicos das falhas

Falha	K (cm/s)	Abertura (m)
N1 - F01	$5,00 \times 10^{-4}$	0,2
N1 - F02	$5,00 \times 10^{-5}$	0,2
N1 - F03	$5,00 \times 10^{-5}$	0,2
N1 - F04	$5,00 \times 10^{-4}$	0,2
N1 - F04C	$5,00 \times 10^{-4}$	1,0
N1 - F04D	$9,00 \times 10^{-3}$	0,2
N1 - F05	$5,00 \times 10^{-3}$	0,5
N1 - F06	$5,00 \times 10^{-4}$	1,0
N1 - F07	$5,00 \times 10^{-4}$	1,0
N1 - F07B	$1,00 \times 10^{-2}$	1,0
N1 - F08	$1,00 \times 10^{-2}$	1,0
N1 - F09	$5,00 \times 10^{-7}$	1,0
N1 - F10	$1,00 \times 10^{-2}$	1,5
N1 - F11	$1,00 \times 10^{-2}$	1,5
N1 - 11B	$5,00 \times 10^{-3}$	1,5
N1 - F12	$5,00 \times 10^{-4}$	1,0
N1 - F13	$7,80 \times 10^{-4}$	1,0
N1 - F14	$5,00 \times 10^{-4}$	1,0
N2 - F01	$5,00 \times 10^{-6}$	1,0
N2 - F02	$1,00 \times 10^{-2}$	1,0
N2 - F03	$5,00 \times 10^{-4}$	1,0
N2 - F04	$5,00 \times 10^{-4}$	1,0
N2 - F05	$5,00 \times 10^{-7}$	0,5
N2 - F06	$5,00 \times 10^{-7}$	3,0

		<b>ELABORAÇÃO DE ESTUDO HIDROGEOLÓGICO NOS PLATÔS DE N1/N2 EM CARAJÁS</b>	
<b>MODELO HIDROGEOLÓGICO CONCEITUAL E NUMÉRICO</b>  <b>RELATÓRIO TÉCNICO EIA</b>		Nº VALE -	PÁGINA <b>68/92</b>
		Nº CONTRATADA -	REV. <b>1</b>





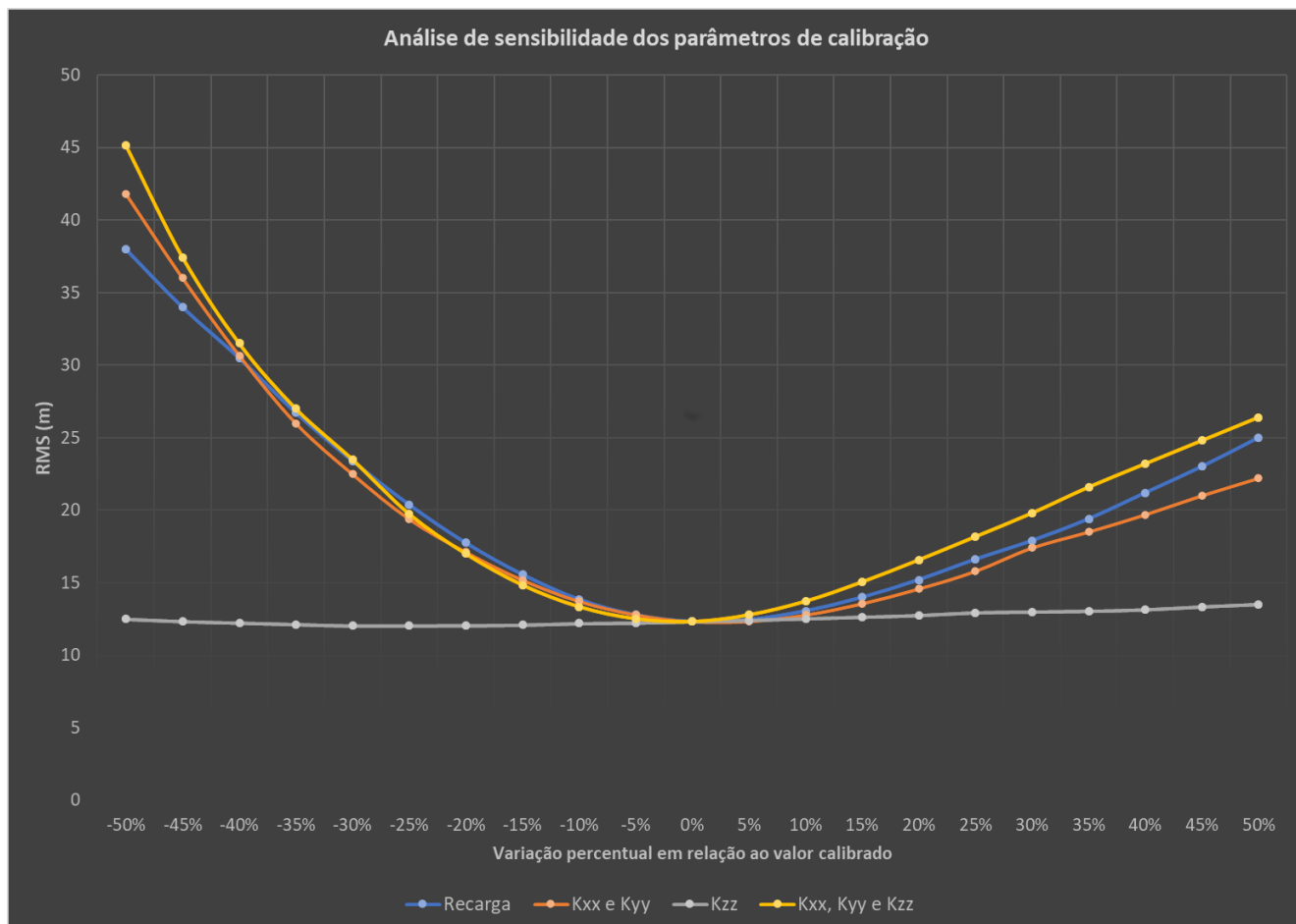
**Figura 4.8 – Calibração das cargas hidráulicas do modelo em regime estacionário.**

#### 4.3.2 Análise de sensibilidade

Foi realizada uma análise de sensibilidade com os principais parâmetros de entrada da calibração em regime permanente com o objetivo de avaliar o peso e a influência destes no comportamento e resultado do modelo. Para tanto, esta análise de sensibilidade foi focada na recarga e condutividade hidráulica nos eixos x, y e z ( $K_{xx}$ ,  $K_{yy}$ ,  $K_{zz}$ ).

A análise de sensibilidade foi conduzida por meio da alteração sistemática destes parâmetros de entrada, mantendo os demais parâmetros iguais aos valores usados na calibração, comparando o valor do erro quadrático médio (RMS) após cada alteração. O parâmetro que, com a sua alteração, leva à maior variação de RMS é considerado o parâmetro para o qual o modelo é mais sensível. Foram testados quatro cenários: variação da recarga, da condutividade nos  $K_{xx}$  e  $K_{yy}$ , da condutividade no eixo  $K_{zz}$  e da condutividade nos três eixos simultaneamente. Os resultados obtidos com esta análise são ilustrados na Figura 4.9.

		<b>ELABORAÇÃO DE ESTUDO HIDROGEOLÓGICO NOS PLATÔS DE N1/N2 EM CARAJÁS</b>	
<b>MODELO HIDROGEOLÓGICO CONCEITUAL E NUMÉRICO</b>  <b>RELATÓRIO TÉCNICO EIA</b>		Nº VALE -	PÁGINA <b>69/92</b>
		Nº CONTRATADA -	REV. <b>1</b>



**Figura 4.9** – Gráfico ilustrando os resultados da análise de sensibilidade.



O modelo de fluxo construído se mostrou bastante sensível tanto às condutividades horizontais como às taxas de recarga. Quanto à condutividade vertical, sua alteração individual exerceu pouca influência no valor do RMS, passando a ser considerável somente quando associada à variação das condutividades horizontais.

#### 4.3.3 Resultados de calibração de vazões e balanço de massa

Foram selecionadas 6 das 58 nascentes cadastradas em campo cujas vazões foram calibradas. Estas nascentes constam na Tabela 4.4. Três dessas nascentes se destacam pelas suas maiores vazões e todas as seis estão alinhadas segundo os lineamentos mapeados por RESENDE & BARBOSA (1972).

As vazões das nascentes foram calibradas principalmente pela retroanálise da condutividade hidráulica e abertura dos elementos discretos utilizados no modelo e que simulam as falhas existentes. No processo de calibração, as vazões calculadas se mostraram bastante sensíveis aos ajustes desses parâmetros.



		<b>ELABORAÇÃO DE ESTUDO HIDROGEOLÓGICO NOS PLATÔS DE N1/N2 EM CARAJÁS</b>	
<b>MODELO HIDROGEOLÓGICO CONCEITUAL E NUMÉRICO</b> <b>RELATÓRIO TÉCNICO EIA</b>		Nº VALE -	PÁGINA <b>70/92</b>
		Nº CONTRATADA -	REV. <b>1</b>

**Tabela 4.4** –Valores das vazões nas nascentes calculadas e observadas

Nascentes	Vazão Medida (l/s)	Vazão Calculada (l/s)
N1-20	6,0	3,9
N1-43	4,0	3,9
N1-13	1,5	0,8
N1-49	0,1	0,9
N1-16	0,5	0,4
N1-34	2,0	1,0

A Tabela 4.5 contém o balanço de massa calculado pelo modelo. A única fonte de entrada do modelo foi a condição de contorno de recarga e a saída de água do modelo foi a condição de nascentes e drenagens (*Hidraulic-head BC*). Os resultados mostram que, quanto ao quesito balanço de massa, o modelo correspondeu aos valores resultantes desejados.

**Tabela 4.5** –Balanço de massa



Entradas (l/s)		Saídas (l/s)	
Recarga	502,750	Nascentes e drenagem	502,749
Balanço (l/s)		<b>+4,77 x 10<sup>-5</sup></b>	

#### 4.4 ANÁLISE DE INCERTEZAS

A calibração do modelo de N1 e N2 foi feita no regime estacionário e o NRMS resultante da calibração foi igual a 12,21%, valor superior aos 10%, valor padrão de referência.

Conforme definido no modelo conceitual, a recarga para o sistema se dá principalmente por meio das cangas, unidades hidrogeológicas que formam a maior parte da superfície dos platôs. Esse litotipo apresenta caráter heterogêneo que pode ser observado tanto em campo como por meio dos resultados obtidos nos ensaios de infiltração em canga (seção 2.2.4) e nos ensaios em piezômetros e furos de sondagem (seção 2.2.5), onde os valores de condutividade variaram em até 2 ordens de grandeza para sítios situados em igual litotipo. Essa heterogeneidade justificou a subdivisão das duas unidades inicialmente definidas, a saber canga química e canga estruturada. Tal subdivisão foi balizada pelas observações de campo, análise textural por meio de imagens de satélite e valores resultantes dos ensaios de permeabilidade. Um exemplo é a porção de canga estruturada SPCE N1 – Sudoeste, cujo valor usado na calibração foi o obtido por meio do ensaio em canga feito no furo raso associado ao piezômetro PZ-10. Os valores obtidos nos ensaios foram usados na calibração, sempre que possível, entretanto as heterogeneidades e anisotropias nem sempre permitiram tal uso, fazendo-se necessários ajustes.

Os valores de condutividade vertical das cangas usados na calibração são, geralmente, superiores aos resultados obtidos nos ensaios de infiltração em canga. Isso se deve ao fato de os ensaios medirem apenas a porosidade intergranular da canga, desconsiderando fraturas

		<b>ELABORAÇÃO DE ESTUDO HIDROGEOLÓGICO NOS PLATÔS DE N1/N2 EM CARAJÁS</b>	
<b>MODELO HIDROGEOLÓGICO CONCEITUAL E NUMÉRICO</b>  <b>RELATÓRIO TÉCNICO EIA</b>		Nº VALE -	PÁGINA <b>71/92</b>
		Nº CONTRATADA -	REV. <b>1</b>

e demais estruturas que favorecem o fluxo vertical. Na porção de canga estruturada SPCE N1 – Norte, associada ao PZ-02, a condutividade vertical adotada na calibração é uma ordem de grandeza maior que a condutividade horizontal, de modo a simular o papel que as descontinuidades secundárias subverticais exercem na recarga e na condução do fluxo subterrâneo.



Nas regiões de contato entre as unidades, sobretudo no contato das unidades de formação ferrífera e de canga com outras unidades, há a formação de zonas de fluxo rápido. Além disso, a perfuração de furos de sondagem e os testes de permeabilidade realizados nos piezômetros evidenciaram a existência de zonas de fraturas e vazios, responsáveis pela rápida perda d'água observada. É provável que essas fraturas e vazios se desenvolvam por toda a área dos platôs, sobretudo nos locais onde há o contato das unidades da Formação Carajás com as unidades metabásicas (Formação Parauapebas e Formação Igarapé Cigarra). No modelo numérico, essas regiões de maior condutividade foram representadas pela unidade denominada “Zona de Contato”, inicialmente contínua e distribuída por todo o modelo. Durante a calibração, esta unidade exerceu forte influência na posição do nível d'água e foi necessário fazer sua subdivisão em corpos menores cujas condutividades variaram desde valores iguais aos dos litotipos circundantes até valores bastantes superiores ou inferiores, indicando seu caráter descontínuo, heterogêneo e muitas vezes anisotrópico. É importante destacar a falta de informações que permitam melhor posicionar essas zonas onde o fluxo tende a ser turbulento e não laminar, como rege a lei de Darcy.

Os dados de nível d'água usados na calibração são provenientes de dois conjuntos de piezômetros e medidores de nível d'água. O primeiro conjunto é formado por 9 piezômetros instalados em furos de sondagem inclinados, monitorados entre outubro de 2008 e dezembro de 2013. A partir dessa data não há dados de monitoramento nem informações relativas ao seu estado ou manutenção. Além disso, piezômetros construídos em furos inclinados podem gerar erro de medidas, dando falsos valores para nível d'água.

O segundo conjunto de dados foi obtido a partir de 8 piezômetros e 3 medidores de nível d'água construídos entre 2017 e 2018. Para esses instrumentos, o dado de nível d'água usado na calibração foi único, disponível e medido pela Hidrovia. Para verificar a representatividade desse valor para caracterização do nível d'água, é preciso que seja feito o monitoramento contínuo desses instrumentos.

Como dito no modelo conceitual, as cargas hidráulicas dos piezômetros e medidores de nível d'água medidas em campo mostram que o fluxo no platô N1 se dá da porção central do platô N1 em direção às bordas. Apesar de se situar próximo à região de maior carga hidráulica, as cargas hidráulicas medidas nos instrumentos PZ-03 e FS-182 são cerca de 65 metros menores. Durante o processo de calibração do modelo, as cargas hidráulicas calculadas nestes instrumentos mostraram-se bastante superiores às medidas e quaisquer tentativas de diminuí-las resultou em rebaixamento dos instrumentos PZ-05, FS-62, FS-63, FS-65, FS-83 e FS-206. A Figura 4.10, a seguir, contém os piezômetros e nascentes usados na calibração.

As estruturas inseridas no modelo tiveram papel importante na calibração da vazão das 6 nascentes selecionadas (Tabela 4.4 e Figura 4.10). As vazões calculadas para as nascentes

		<b>ELABORAÇÃO DE ESTUDO HIDROGEOLÓGICO NOS PLATÔS DE N1/N2 EM CARAJÁS</b>	
<b>MODELO HIDROGEOLÓGICO CONCEITUAL E NUMÉRICO</b>  <b>RELATÓRIO TÉCNICO EIA</b>		Nº VALE -	PÁGINA <b>72/92</b>
		Nº CONTRATADA -	REV. <b>1</b>

N1-20 e N1-13 foram inferiores àquelas registradas em campo. Isso indica um maior papel de possíveis estruturas não mapeadas na condução do fluxo. É importante destacar que a principal falha que conduz água para a região onde estas duas nascentes se encontram (falha N1-F12, Figura 4.7) atravessa a região entre os instrumentos PZ-03 e FS-182, o que sugere que os valores usados na calibração para a condutividade ( $5 \times 10^{-4}$  cm/s) e abertura (1 m) desta falha podem estar subestimados e de fato haja uma compartimentação entre esses e os demais piezômetros que permite a manutenção da alta carga hidráulica observada no piezômetro FS-62 e demais instrumentos no entorno. Sugere-se que sejam feitos levantamentos de campo futuros para verificar a existência de estruturas e/ou litotipos que justifiquem essa compartimentação sugerida pela calibração.

A vazão medida em campo para a nascente N1-43, situada a norte do platô N1 foi de 4,0 l/s. A nascente N1-43 está localizada no quartzito da Formação Águas Claras, a norte do platô N1. Sua vazão medida em campo é de 4,0 l/s e para alcançar esse valor durante a calibração foi necessário a inserção de uma estrutura condutora, responsável por conduzir o fluxo das cangas e zonas de contato para a porção onde esta nascente se encontra.

O modelo numérico abrange uma grande área, formada essencialmente por rochas máficas. Contrastando a isso, as bases usadas na definição das unidades no topo dos platôs apresentam alto grau de detalhamento, cuja representação foi prejudicada pelo tamanho dos elementos e quantidade de camadas. Além disso, os poucos dados de monitoramento existentes estão concentrados em uma área pequena, o que gera incertezas em suas bordas. Devido a isso, sugere-se que sejam tomadas vazões das drenagens situadas no entorno do platô para auxiliar em futuras calibrações do modelo.

Mesmo com todas as observações feitas acima acerca das incertezas inerentes ao processo de modelamento numérico, entende-se que a calibração obtida no modelo seja satisfatória para os objetivos deste estudo, em função da escala de abrangência e do conhecimento das condições de contorno utilizadas, amplamente embasadas por dados primários e por observações de campo.



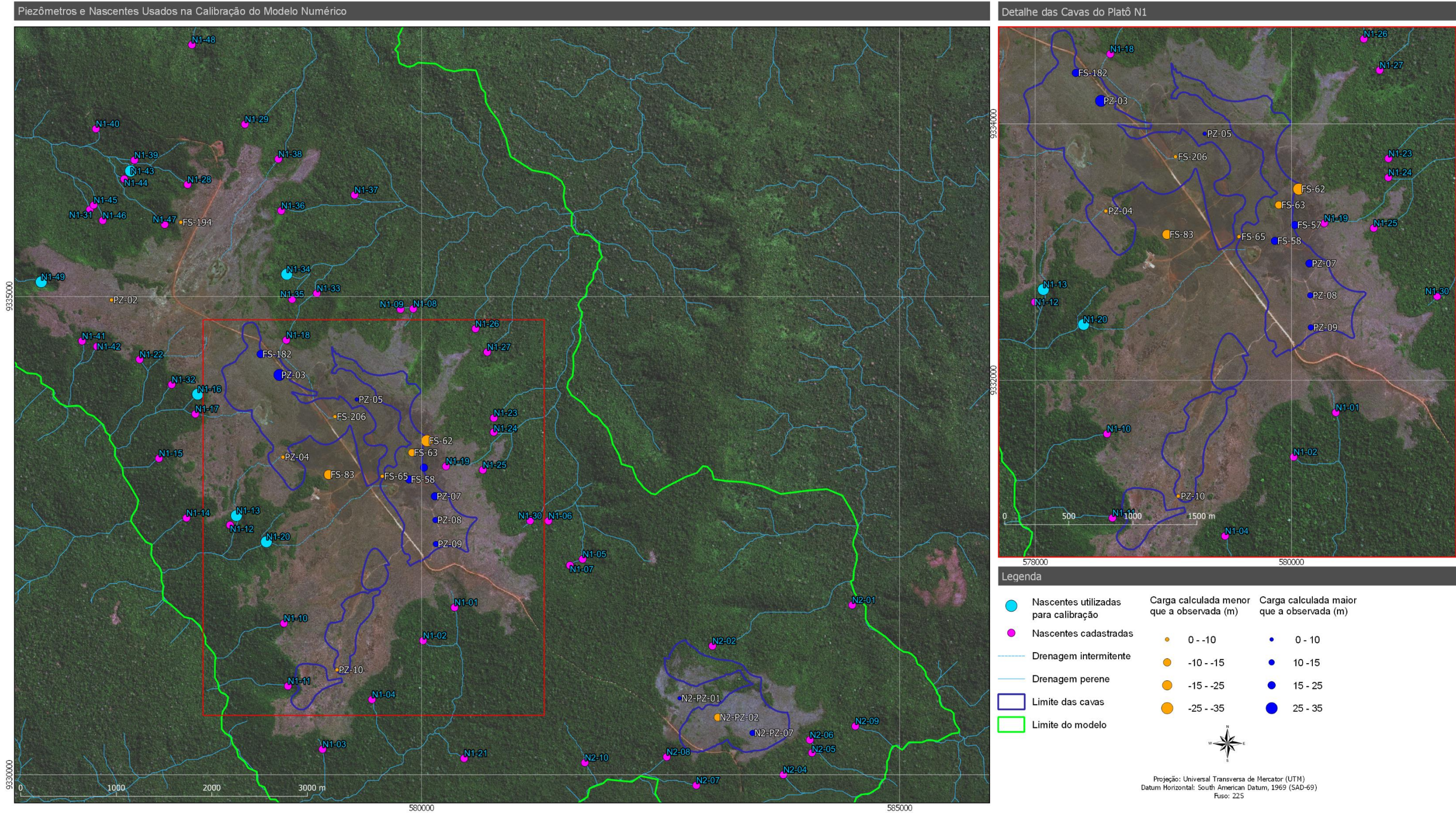




Figura 4.10 – Piezômetros e nascentes usados na calibração.



		<b>ELABORAÇÃO DE ESTUDO HIDROGEOLÓGICO NOS PLATÔS DE N1/N2 EM CARAJÁS</b>	
<b>MODELO HIDROGEOLÓGICO CONCEITUAL E NUMÉRICO</b>  <b>RELATÓRIO TÉCNICO EIA</b>		Nº VALE -	PÁGINA <b>74/92</b>
		Nº CONTRATADA -	REV. <b>1</b>

## 5.0 SIMULAÇÃO E AVALIAÇÃO DE CENÁRIOS FUTUROS

Na simulação de cenários hidrogeológicos futuros, dois aspectos de interesse foram considerados, quais sejam:

- Estimativa de vazões de desaguamento da mina, segundo cenários de evolução de lavra.
- Previsão de impactos nas disponibilidades hídricas em função do procedimento de desaguamento de cava, conforme cenários de evolução de lavra apresentados.

As simulações do desaguamento das cavas foram feitas em regime transiente, de modo a simular de forma mais detalhada a evolução das vazões de desaguamento e impactos ao longo do tempo. Por se tratar de uma mina com vida útil relativamente curta, a simulação transiente permite incorporar os efeitos do armazenamento durante o rebaixamento do nível d'água, tornando os resultados mais próximos do que se espera ocorrer durante a operação. Nessas simulações, foram mantidos todos os parâmetros hidrodinâmicos obtidos com a calibração em regime permanente, sendo atribuído o armazenamento igual a 0.01% para as formações ferríferas e 0.0001% para as demais unidades. Estes valores se basearam na literatura e em dados de litotipos situados em contexto geológico semelhante.

Os planos de lavra das minas de N1 e N2, disponibilizados pela Vale em dezembro de 2018, abrangem a formação ferrífera associada à Unidade Carajás, aflorante no topo dos platôs de N1 e N2. Tais planos se referem aos cenários de operação de 2024 a 2031, aqui nomeados como anos 01 a 08, respectivamente, e se constituem de várias cavas evoluindo simultaneamente, sem que seja configurada uma única cava final. A localização das cavas nos diferentes cenários acima citados pode ser visualizada na Figura 5.1, ao passo que a Figura 5.2 e a Figura 5.3 mostram conformação topográfica das cavas nos diferentes anos para os platôs N1 e N2, respectivamente. A escala topográfica de ambas as figuras é a mesma e é possível observar que a cota de fundo das cavas de N2 serão cerca de 60 metros mais baixas que as de N1.

Tais cenários foram incorporados no modelo numérico para simular as previsões de desaguamento e impactos nos cursos d'água superficiais ao longo da vida útil do empreendimento. Ressalta-se que, de acordo com os planos concebidos, o monitoramento de nível da água praticado localmente e os resultados da calibração do modelo, no primeiro ano das cavas de N1 a operação se dará acima do nível d'água, portanto sem necessidade de rebaixamento. Para as cavas de N2, a operação da mina se situará abaixo do nível d'água somente a partir do Ano 05 de lavra. Sendo assim, o cenário passível de avaliação consiste em todos os anos das cavas de N1, à exceção do primeiro, e nos quatro últimos anos para as cavas de N2. Independente desta situação, todos os cenários de cava foram incorporados no modelo para verificação.



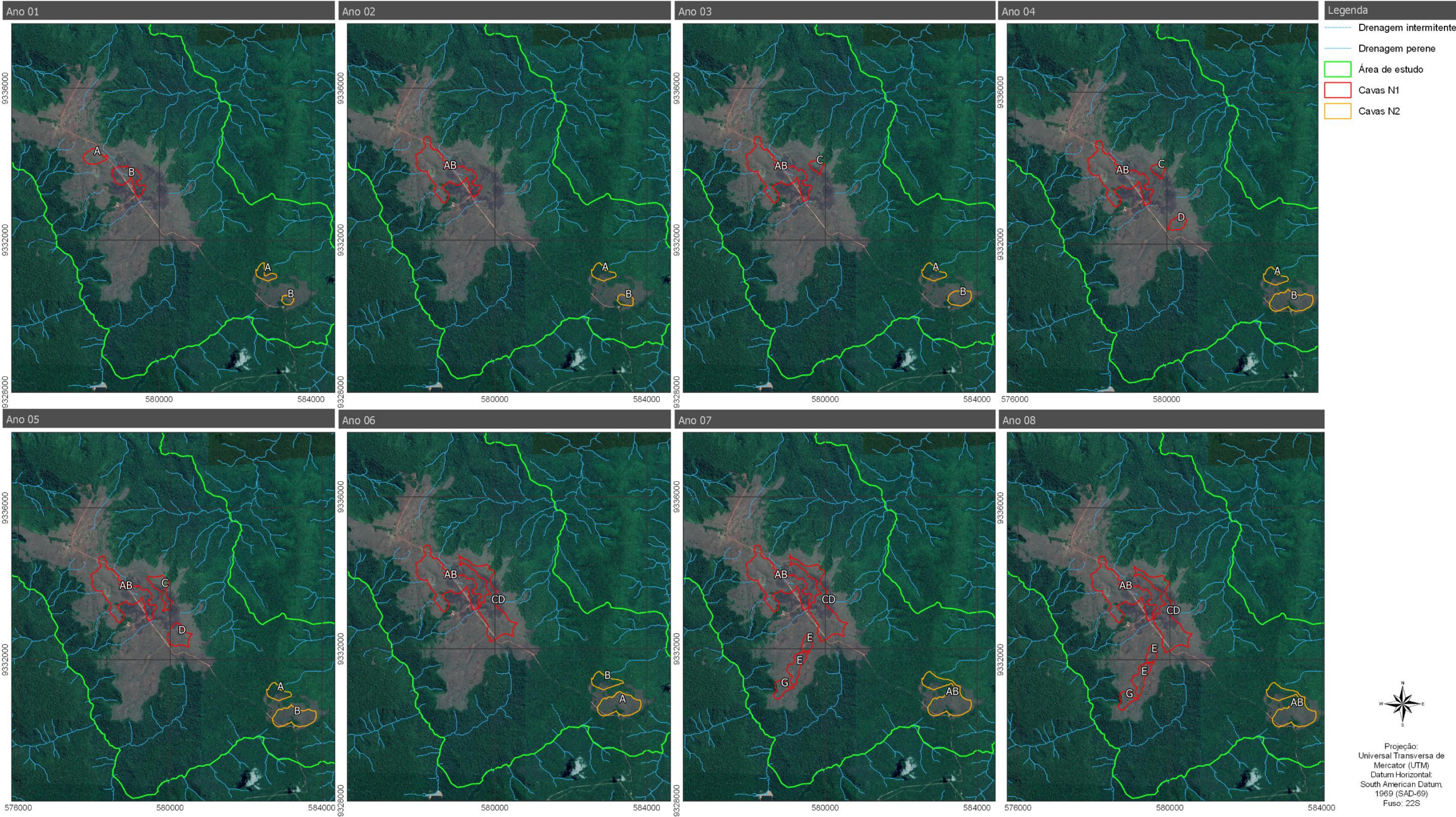


Figura 5.1 - Evolução das cavas ao longo do tempo.



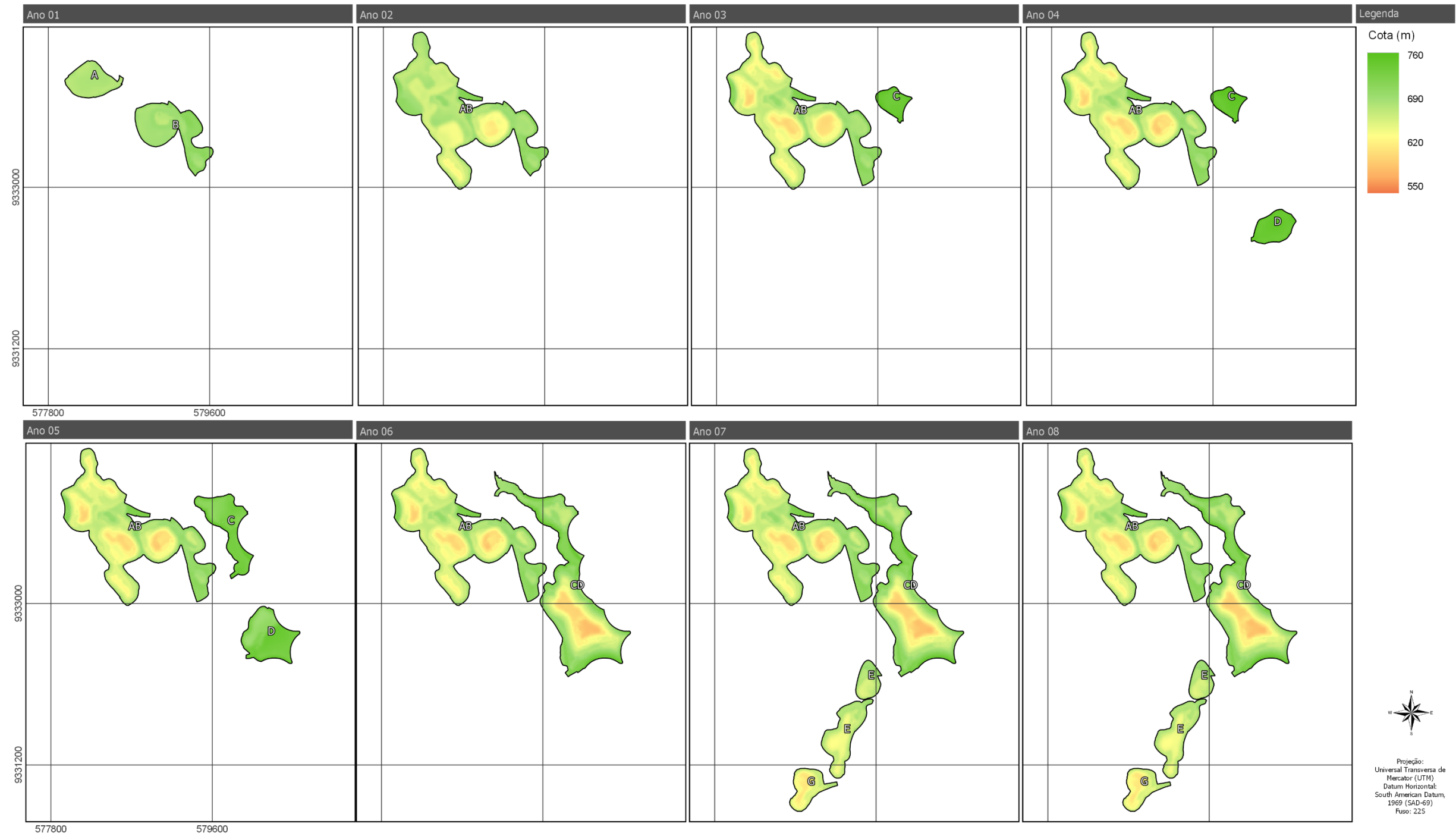


Figura 5.2 - Evolução das cotas de lavra das minas de N1 (Ano 01 a 08) ao longo do tempo.

Fonte: Dados disponibilizados pela Vale em dez/2018.

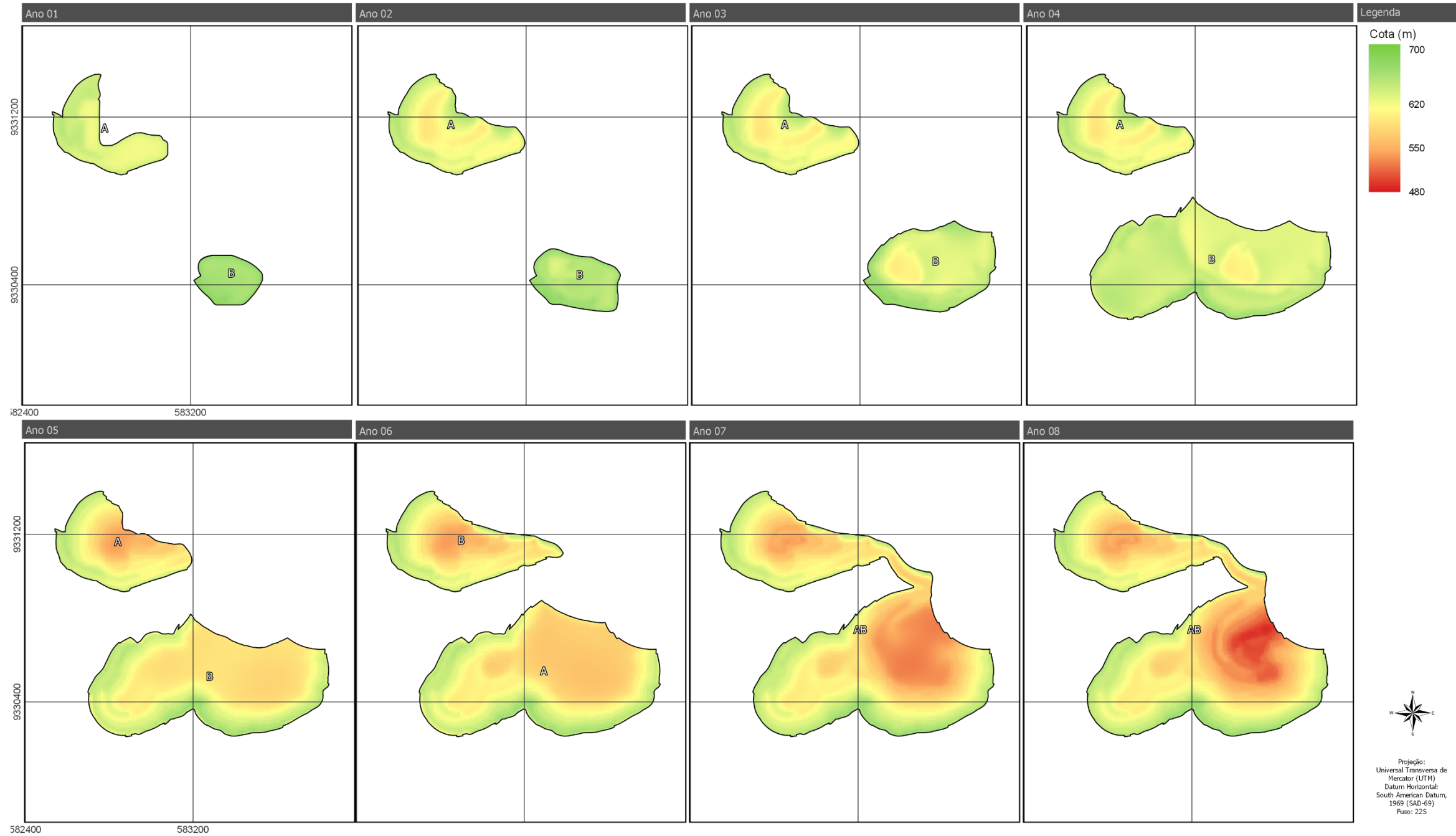




Figura 5.3 - Evolução das cotas de lavra das minas de N2 (Ano 01 a 08) ao longo do tempo.

Fonte: Dados disponibilizados pela Vale em dez/2018.



		<b>ELABORAÇÃO DE ESTUDO HIDROGEOLÓGICO NOS PLATÔS DE N1/N2 EM CARAJÁS</b>	
<b>MODELO HIDROGEOLÓGICO CONCEITUAL E NUMÉRICO</b>  <b>RELATÓRIO TÉCNICO EIA</b>		Nº VALE -	PÁGINA <b>78/92</b>
		Nº CONTRATADA -	REV. <b>1</b>

## 5.1 PREVISÃO DE VAZÕES DE DESAGUAMENTO



Para calcular as vazões necessárias ao rebaixamento das cavas de N1 e N2 foram realizadas simulações no modelo hidrogeológico numérico em regime transiente, atribuindo-se às regiões das cavas condição de contorno do tipo *Seepage Face*, a qual restringe o fluxo e permite somente a retirada de água, promovendo rebaixamento das cotas de nível da água subterrânea. A partir disso, as vazões de desaguamento passam a ser calculadas internamente pelo modelo, conforme o estabelecimento de seleções coincidentes com os cenários de evolução de lavra. As previsões de desaguamento solicitadas para as simulações de cenários são correspondentes ao planejamento entre os anos 01 e 08 da lavra. É importante destacar que os cálculos das vazões de bombeamento efetuados pelo modelo consideram somente a água proveniente do armazenamento e da recarga, sem levar em consideração aportes diretos de água superficial. Por isso, os valores calculados se referem às vazões mínimas de bombeamento esperadas para que haja o desaguamento das cavas, e tais vazões de bombeamento podem ser maiores, a depender do volume aportado diretamente por água superficial proveniente da precipitação.

Conforme esperado, constatou-se que no primeiro ano de lavra das cavas de N1 não deverá ocorrer desaguamento. Já para N2, o desaguamento deverá ocorrer, somente, nos quatro últimos anos da lavra. As Tabelas 5.1 e 5.2 mostram a produção mínima de água subterrânea para rebaixamento do nível d'água abaixo da cota das cavas de N1 e N2, respectivamente.

No cenário da cava final de N1, a profundidade máxima do nível d'água na área das cavas será de 203 metros, o que representa um rebaixamento de 107 metros em relação ao nível calibrado, a 95 metros de profundidade. O menor rebaixamento será de 17 metros e deverá ocorrer próximo às bordas das cavas, onde a profundidade do nível d'água passará de 33 metros para 50 metros. A vazão mínima de rebaixamento no ano final das cavas de N1 é 1013 m³/h. A Figura 5.4 mostra a relação do nível d'água calibrado e o nível d'água final, juntamente com a topografia da cava final para os platôs N1 e N2.

**Tabela 5.1 – Vazões mínimas de desaguamento da mina N1.**

Ano	Vazão de rebaixamento (m³/h) - Mina N1							Total Mina N1
	Cava A	Cava B	Cava C	Cava D	Cava E	Cava F	Cava G	
01	-	-	-	-	-	-	-	0
02	99	-	-	-	-	-	-	99
03	387	-	-	-	-	-	-	387
04	303	-	-	-	-	-	-	303
05	273	-	-	-	-	-	-	273
06	250	786		-	-	-	-	1036
07	168	494		0	41	48	-	751
08	217	748		0	24	24	-	1013

		<b>ELABORAÇÃO DE ESTUDO HIDROGEOLÓGICO NOS PLATÔS DE N1/N2 EM CARAJÁS</b>	
<b>MODELO HIDROGEOLÓGICO CONCEITUAL E NUMÉRICO</b> <b>RELATÓRIO TÉCNICO EIA</b>		Nº VALE -	PÁGINA <b>79/92</b>
		Nº CONTRATADA -	REV. <b>1</b>

**Tabela 5.2 – Vazões mínimas de desagüamento da mina N2.**

Ano	Vazão de rebaixamento (m³/h) - Mina N2		
	Cava A	Cava B	Total Mina N2
01	0	0	0
02	0	0	0
03	0	0	0
04	0	0	0
05	64	42	106
06	34	126	160
07	207		207
08	426		426

Para as cavas de N2, a vazão mínima de desagüamento é de 426 m³/h. Com essa vazão, a profundidade máxima do nível d'água passará dos 120 metros no modelo calibrado para 193 metros, o que representa um rebaixamento de aproximadamente 73 metros. O nível d'água apresenta o maior rebaixamento na parte central da cava sul, de cerca de 96 metros, onde passa da profundidade de 56 metros para 153 metros.



A região mais profunda da cava N1 está situada a 196 metros de profundidade e, nesta região, o nível d'água calibrado está a 95 metros de profundidade. A diferença entre a superfície do nível da água calibrada no modelo e a superfície da cava final revelou também um volume de rocha saturada nas cavas de N1 da ordem de  $2,39 \times 10^7$  m³ em uma área de aproximadamente 0,88 km². Já em N2 o nível d'água está a 22 metros de profundidade na porção mais profunda, sendo que a profundidade máxima prevista para a cava de N2 é de 127 metros. O volume entre essas duas superfícies é de aproximadamente  $8,70 \times 10^6$  m³ em uma área de cerca de 0,32 km², conforme ilustrado pela Figura 5.2.

## 5.2 IMPACTOS EM NASCENTES E CURSOS DE ÁGUA

O prognóstico de impacto foi realizado a partir da simulação dos cenários futuros e as informações de cadastro de nascentes da área de interesse dos estudos. Vale lembrar que a calibração do modelo numérico se deu com base nas cotas de nível d'água subterrânea em nascentes e piezômetros e vazões de nascentes observadas em campo. A análise de impacto nas nascentes foi feita para os cenários finais das cavas.

A partir dos valores calculados e calibrados, se fez a comparação do cenário atual e do cenário final, em termos de superfície de lençol freático (*water table*), com o intuito de delimitar a área máxima de interferência do cone de rebaixamento conforme apresentado na Figura 5.5. Ressalta-se que estabeleceu-se como o limite do cone de rebaixamento as áreas onde o resultado da simulação indicou redução de 5 m ou mais de profundidade nas cotas do nível d'água subterrânea do cenário final em relação ao cenário atual, já que este valor corresponde à média da variação sazonal do nível d'água e, portanto, já é passível de ocorrer naturalmente. Nesta figura, é possível observar que a área do cone de rebaixamento circunda a área da cava, formando um *buffer* a cerca de 100 metros a 1000 metros do limite da cava final, apesar do pouco tempo de operação das cavas de N1 e N2. Isso se deve principalmente à grande diferença de cota entre o topo do platô e seu entorno, a qual alcança valores superiores a 500



		<b>ELABORAÇÃO DE ESTUDO HIDROGEOLÓGICO NOS PLATÔS DE N1/N2 EM CARAJÁS</b>	
<b>MODELO HIDROGEOLÓGICO CONCEITUAL E NUMÉRICO</b>  <b>RELATÓRIO TÉCNICO EIA</b>		Nº VALE -	PÁGINA <b>80/92</b>
		Nº CONTRATADA -	REV. <b>1</b>

metros, juntamente com o fato de o topo do platô reunir as unidades com as maiores condutividades hidráulicas e maiores taxas de recarga. O maior rebaixamento observado ocorre na área de N1 onde será instalada a cava nomeada como “cava D”, conforme Figura 5.1. Nesta porção, o rebaixamento será da ordem de 107 metros e partindo dessa região e indo em direção a oeste e sul é possível observar rebaixamento ao longo das estruturas implementadas no modelo.

Do total de 59 nascentes avaliadas, 33 se encontram na área de abrangência do cone de rebaixamento e poderão ser diretamente impactadas devido às atividades de bombeamento no cenário final da lavra planejada. Destas nascentes, 25 estão situadas no entorno do platô N1 e 8 no entorno do platô N2. Das nascentes situadas no platô N2, somente as nascentes N2-01 e N2-14 não serão diretamente impactadas. É importante salientar que as posições das nascentes se basearam nas coordenadas obtidas durante o cadastro destas. Desta forma, o monitoramento dessas nascentes é necessário de modo a verificar eventuais oscilações sazonais.

As operações de bombeamento poderão causar impacto próximo a 27% no fluxo de base das sub-bacias presentes no entorno da cava e o impacto no fluxo de base será da ordem de 484 m³/h. As sub-bacias presentes no interior do modelo foram separadas em 7 setores nos quais foram avaliados o impacto e o nível de interferência das atividades de bombeamento em seus respectivos fluxos de bases. A quantificação do impacto foi feita calculando a diferença entre a vazão de aporte de água para as drenagens na situação atual e a vazão de aporte no cenário das cavas finais em regime transiente. A Tabela 5.3 sumariza os impactos observados em cada setor e respectiva redução de vazão simulada para cada ano previsto para as cavas de N1 e N2. Este valor leva em consideração não somente a vazão das nascentes, mas também as vazões de aporte ao longo das calhas de drenagem. Como esperado, o menor impacto ocorre na porção do modelo mais distante das cavas, no extremo norte, onde o impacto será inferior a 1%.

O maior impacto previsto deve ocorrer no Setor Leste, onde o impacto na vazão do fluxo de base será da ordem de 336 m³/h e a redução do fluxo de base será de 57 %. Apesar das camadas de formação ferrífera do platô N1 apresentarem mergulho para oeste, estas unidades estão concentradas principalmente junto à borda leste do platô, cortadas por estruturas responsáveis por conduzir água principalmente para as drenagens a leste e oeste do platô N1. É nesta porção que será instalada a cava mais profunda e onde haverá a maior taxa de bombeamento a partir do Ano 06, conforme mostrado na Tabela 5.1. A remoção das unidades de formação ferrífera desta porção e rebaixamento do nível d’água associado poderão acarretar na diminuição do gradiente hidráulico e no volume de água que aporta para a bacia a leste do platô. Este impacto também será percebido nas bacias a oeste, porém em menor grau.

Nos setores Sul e Sudeste, onde estão localizadas as cavas do platô N2, o impacto estimado é de 12% e 19%, respectivamente. É importante lembrar que o nível d’água na área do platô N2 está cerca de 50 metros abaixo do platô de N1 e o rebaixamento só começará a partir do Ano 05.

		ELABORAÇÃO DE ESTUDO HIDROGEOLÓGICO NOS PLATÔS DE N1/N2 EM CARAJÁS	
MODELO HIDROGEOLÓGICO CONCEITUAL E NUMÉRICO RELATÓRIO TÉCNICO EIA		Nº VALE	PÁGINA
		Nº CONTRATADA	REV.
		-	81/92
		-	1

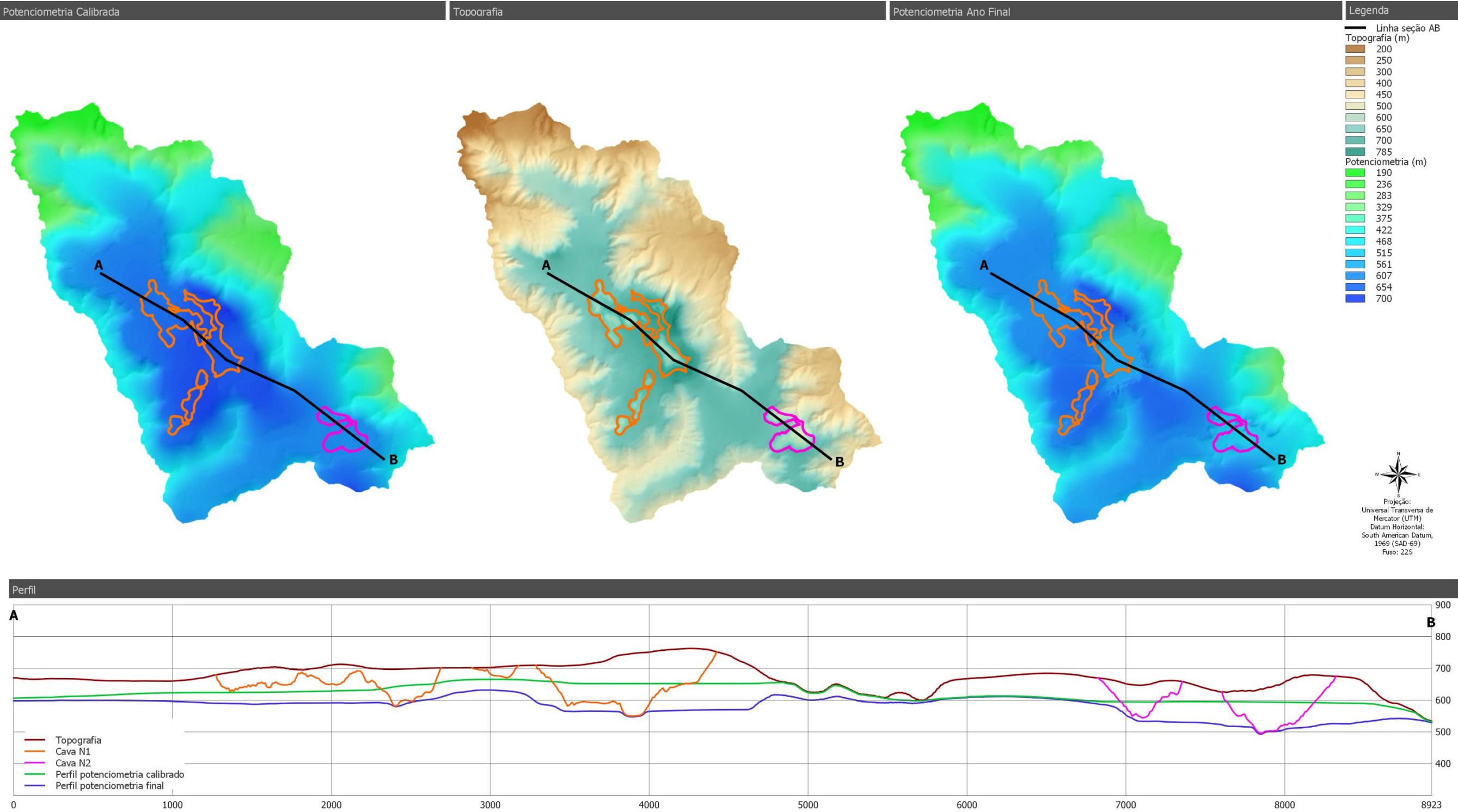


Figura 5.4 – Relação espacial entre o nível da água atual e a concepção de cava final.

Fonte: Dados disponibilizados pela VALE e resultados do modelo numérico

		<b>ELABORAÇÃO DE ESTUDO HIDROGEOLÓGICO NOS PLATÔS DE N1/N2 EM CARAJÁS</b>	
<b>MODELO HIDROGEOLÓGICO CONCEITUAL E NUMÉRICO</b>  <b>RELATÓRIO TÉCNICO EIA</b>		Nº VALE -	PÁGINA <b>82/92</b>
		Nº CONTRATADA -	REV. <b>1</b>

**Tabela 5.3 – Impactos nas vazões em função do desaguamento.**

	Setor	Cenário Atual	Ano 01	Ano 02	Ano 03	Ano 04	Ano 05	Ano 06	Ano 07	Ano 08
Fluxo de Base (m³/h)	Setor Noroeste	357	357	357	356	354	353	352	350	350
Impacto (m³/h)		-	0	0	1	3	4	6	7	8
Redução (%)		-	0%	0%	0%	1%	1%	2%	2%	2%
Fluxo de Base (m³/h)	Setor Oeste	284	284	278	264	258	254	252	238	230
Impacto (m³/h)		-	0	6	20	26	30	32	46	54
Redução (%)		-	0%	2%	7%	9%	10%	11%	16%	19%
Fluxo de Base (m³/h)	Setor Sudoeste	131	131	131	131	131	131	119	114	109
Impacto (m³/h)		-	0	0	0	0	0	12	17	22
Redução (%)		-	0%	0%	0%	0%	0%	9%	13%	17%
Fluxo de Base (m³/h)	Setor Sul	118	118	118	118	118	116	112	109	104
Impacto (m³/h)		-	0	0	0	0	2	6	10	15
Redução (%)		-	0%	0%	0%	0%	2%	5%	8%	12%
Fluxo de Base (m³/h)	Setor Sudeste	255	255	255	255	255	245	234	223	206
Impacto (m³/h)		-	0	0	0	0	10	21	32	49
Redução (%)		-	0%	0%	0%	0%	4%	8%	13%	19%
Fluxo de Base (m³/h)	Setor Leste	584	584	573	499	481	473	275	262	248
Impacto (m³/h)		-	0	11	85	103	111	310	322	336
Redução (%)		-	0%	2%	15%	18%	19%	53%	55%	57%
Fluxo de Base (m³/h)	Setor Norte	77	77	77	77	77	77	77	77	77
Impacto (m³/h)		-	0	0	0	0	0	0	0	1
Redução (%)		-	0%	0%	0%	0%	0%	0%	1%	1%
<b>Fluxo de Base (m³/h)</b>	<b>Área Total</b>	<b>1806</b>	<b>1806</b>	<b>1791</b>	<b>1701</b>	<b>1675</b>	<b>1649</b>	<b>1421</b>	<b>1373</b>	<b>1324</b>
<b>Impacto (m³/h)</b>		<b>-</b>	<b>0</b>	<b>15</b>	<b>105</b>	<b>131</b>	<b>157</b>	<b>385</b>	<b>433</b>	<b>484</b>
<b>Redução (%)</b>		<b>-</b>	<b>0%</b>	<b>1%</b>	<b>6%</b>	<b>7%</b>	<b>9%</b>	<b>21%</b>	<b>24%</b>	<b>27%</b>



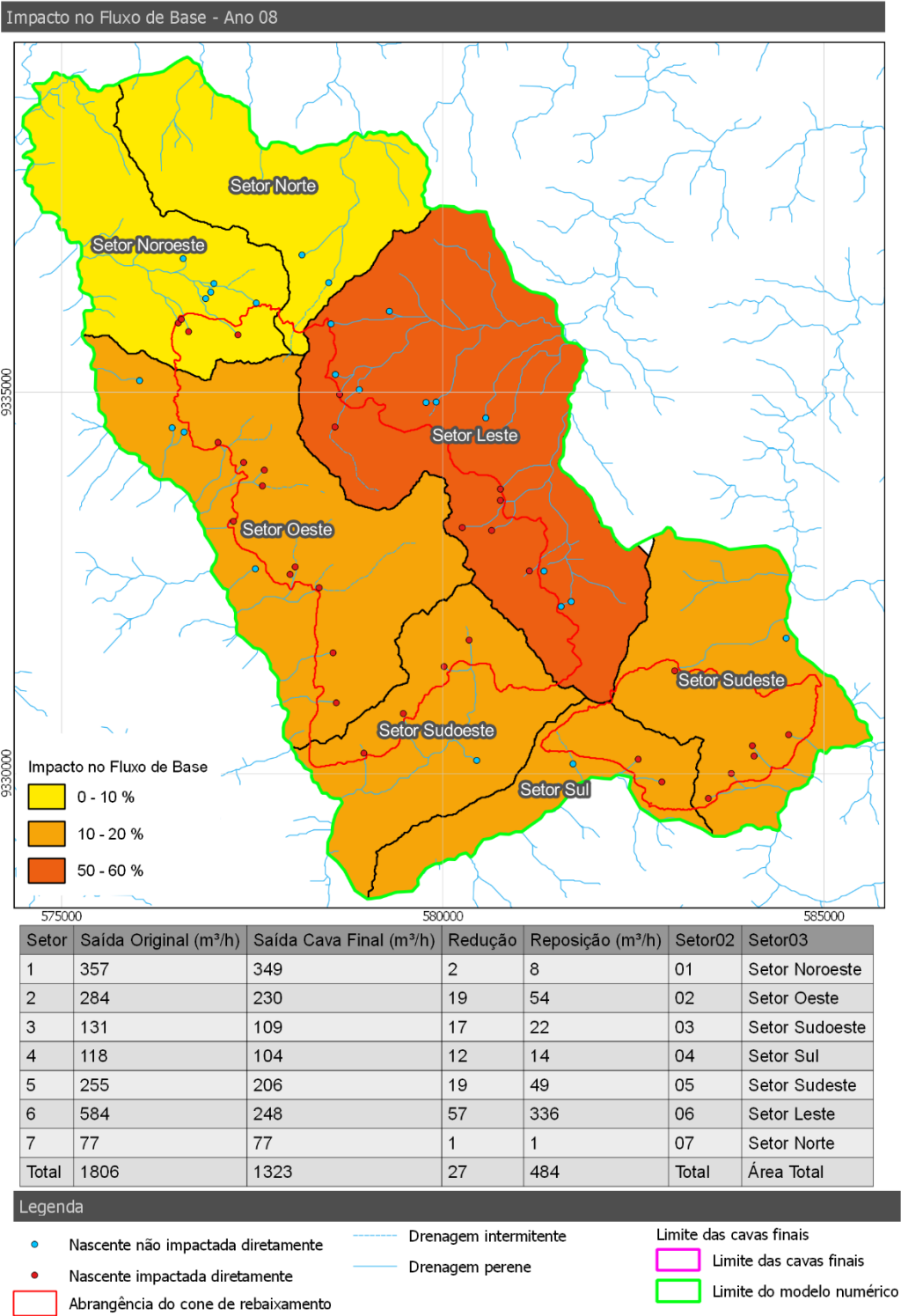
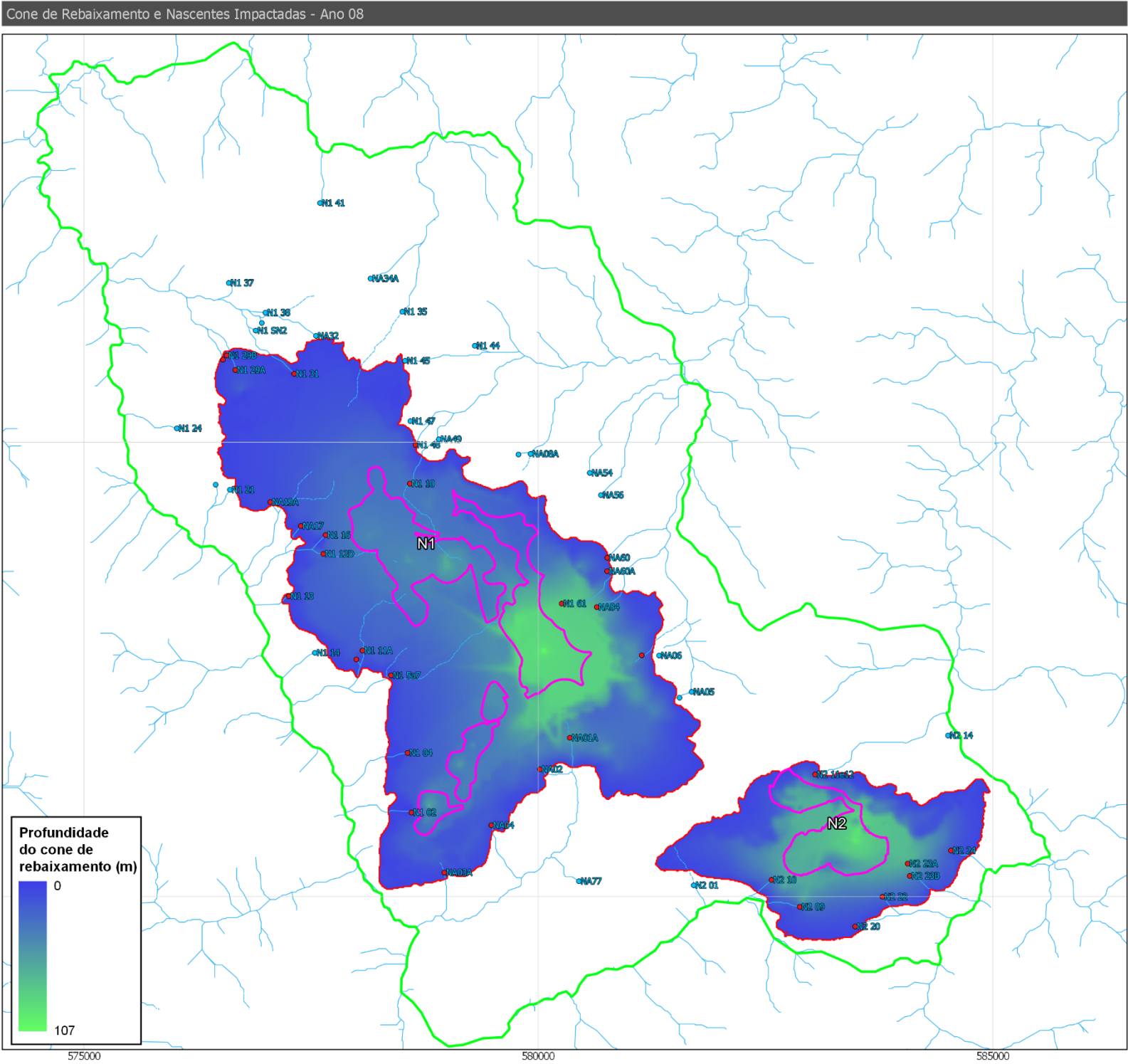




Figura 5.5 – Diferença entre o nível da água atual (calibrado) e final (máximo rebaixamento) para definição da área de abrangência do cone de rebaixamento e verificação da interferência com aspectos intervenientes locais.

Fonte: Dados disponibilizados pela VALE e resultados do modelo numérico.

		<b>ELABORAÇÃO DE ESTUDO HIDROGEOLÓGICO NOS PLATÔS DE N1/N2 EM CARAJÁS</b>	
<b>MODELO HIDROGEOLÓGICO CONCEITUAL E NUMÉRICO</b>  <b>RELATÓRIO TÉCNICO EIA</b>		Nº VALE -	PÁGINA <b>84/92</b>
		Nº CONTRATADA -	REV. <b>1</b>

## 6.0 CONCLUSÕES

No presente relatório foi apresentada a compilação dos dados existentes, o modelo conceitual concebido, os passos de construção do modelo numérico, a calibração e simulação de cenários futuros, como parte integrante da OS 01/2017 (no âmbito do contrato Nº 5900002815 celebrado entre a HIDROVIA e a VALE – por meio da DIAM). Tais atividades são voltadas à elaboração de modelo numérico de fluxo da água subterrânea, com vistas à simulação de máximo rebaixamento e definição de impactos nas imediações dos platôs N1 e N2.

A elaboração deste relatório foi baseada na construção de um modelo físico conceitual e de um modelo tridimensional geológico e de fluxo da água subterrânea (*FEFLOW*), cuja finalidade foi representar a hidrogeologia da área estudada, a natureza complexa do fluxo das águas subterrâneas e suas relações com as águas superficiais. Este modelo foi calibrado utilizando dados de campo e foi utilizado na simulação de cenários preditivos quanto à condição de máximo rebaixamento e as implicações advindas deste processo para verificar os possíveis impactos na disponibilidade hídrica local.



Os resultados da modelagem dos dados disponibilizados de topografia da cava planejada mostraram a necessidade de desaguamento nos anos 02 a 08 para a lavra na cava de N1 e para os anos 05 a 08 para a lavra na cava de N2. Neste sentido, dentre os resultados alcançados apontam-se os seguintes:

### Quanto ao desaguamento

- A vazão de desaguamento da cava final de N1 reflete uma condição de produção mínima de água da ordem de 1013 m³/h. Nesta condição, o rebaixamento máximo do nível d'água estimado será de 107 metros, quando a profundidade do nível d'água será de 203 metros. A diferença entre a superfície do nível da água calibrada no modelo, a 95 metros de profundidade na zona mais profunda da cava, e a superfície da cava final cuja maior profundidade está a 196 metros, revelou um volume de rocha saturado da ordem de  $2,39 \times 10^7$  m³ em uma área de aproximadamente 0,88 km².
- Para a cava de N2 a produção mínima é da ordem de 426 m³/h. Nesta condição, o máximo rebaixamento do nível d'água estimado será de 73 metros, quando a profundidade do nível d'água será de 193 metros. A diferença entre a superfície do nível da água calibrada no modelo, a 22 metros de profundidade na zona mais profunda da cava, e a superfície da cava final cujo maior profundidade é de 127 metros, revelou um volume de rocha saturado da ordem de  $8,70 \times 10^6$  m³ em uma área de aproximadamente 0,32 km².

### Quanto aos impactos associados

- Das 59 nascentes cadastradas no entorno dos platôs N1 e N2, 33 poderão vir a ser impactadas no cenário final da lavra planejado. Destas, 25 estão situadas no entorno do platô N1 e 8 no entorno do platô N2.
- As operações de bombeamento poderão causar impacto próximo a 27% no fluxo de base das sub-bacias presentes no entorno da cava e a vazão de reposição será da

		<b>ELABORAÇÃO DE ESTUDO HIDROGEOLÓGICO NOS PLATÔS DE N1/N2 EM CARAJÁS</b>	
<b>MODELO HIDROGEOLÓGICO CONCEITUAL E NUMÉRICO</b>  <b>RELATÓRIO TÉCNICO EIA</b>		Nº VALE -	PÁGINA <b>85/92</b>
		Nº CONTRATADA -	REV. <b>1</b>

ordem de 484 m<sup>3</sup>/h. O maior impacto ocorrerá a leste da cava de N1, onde o impacto estimado é de 336 m<sup>3</sup>/h.



Por fim, cumpre destacar que a modelagem hidrogeológica numérica fornece apenas uma expectativa das vazões a serem impactadas. Os valores efetivos serão definidos pelo monitoramento hídrico ao longo do tempo.

É importante ressaltar que o presente trabalho deverá ser objeto de atualização ao longo do tempo à luz de novos dados geológicos, hidrológicos e hidrogeológicos. As novas informações poderão ser incorporadas ao modelo progressivamente, de modo que este seja cada vez mais representativo da sua realidade e possa ser utilizado para fins preditivos com maior confiabilidade ao longo do tempo.

De qualquer maneira, o tempo necessário para que a lavra se desenvolva até o seu estágio final possibilita o acompanhamento progressivo da evolução hidrogeológica do sistema, através de um programa de monitoramento adequado, permitindo adotar as devidas precauções quanto à forma adequada de realizar o rebaixamento da superfície freática e promover o desaguamento da mina.

Os volumes de água a serem produzidos em decorrência do rebaixamento, até a cota final serão alcançados gradativamente e, conseqüentemente, qualquer demanda súbita de água no sistema poderá ser criteriosamente planejada, a fim de proporcionar medidas de controle preventivo para qualquer situação que se projete. Como medidas de mitigação dos impactos, menciona-se a reposição de vazão em cursos d'água potencialmente afetados, como já é realizado em outras minas em operação. Essa condição é assegurada, já que o próprio rebaixamento do nível de água subterrânea representa uma situação local de superexploração, onde os volumes retirados são maiores do que aqueles normalmente restituídos para os cursos de água superficial, resultando em um superávit de oferta hídrica durante o desaguamento.





		<b>ELABORAÇÃO DE ESTUDO HIDROGEOLÓGICO NOS PLATÔS DE N1/N2 EM CARAJÁS</b>	
<b>MODELO HIDROGEOLÓGICO CONCEITUAL E NUMÉRICO RELATÓRIO TÉCNICO EIA</b>		Nº VALE -	PÁGINA <b>86/92</b>
		Nº CONTRATADA -	REV. <b>1</b>

## 7.0 EQUIPE TÉCNICA

A equipe técnica responsável pelo estudo é apresentada no quadro 7.1 a seguir.



**Quadro 7.1 – Equipe técnica**

Integrantes	Formação
Paulo Pessoa	Geólogo Sênior
Gisele Kimura	Geólogo Sênior
Rinaldo Fernandes	Geólogo Sênior
Dora Atman	Geóloga Pleno
Laila Garcia	Geóloga Pleno
Ednilson Rosa	Geólogo Júnior
Rogério Silva Lucas	Técnico em Geoprocessamento
Bruno Doi	Engenheiro Ambiental
Ludevino Rocha	Técnico de Geologia
Carlos Esteves	Auxiliar de Campo

		<b>ELABORAÇÃO DE ESTUDO HIDROGEOLÓGICO NOS PLATÔS DE N1/N2 EM CARAJÁS</b>	
<b>MODELO HIDROGEOLÓGICO CONCEITUAL E NUMÉRICO</b>  <b>RELATÓRIO TÉCNICO EIA</b>		Nº VALE -	PÁGINA <b>87/92</b>
		Nº CONTRATADA -	REV. <b>1</b>

## 8.0 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABGE. Associação Brasileira de Geologia de Engenharia. 1996. Ensaios de Permeabilidade em Solos: orientações para a sua execução no campo. 3.ed. Boletim 04. São Paulo
- ANDERSON, M.P. & WOESSNER, W.W. 1992. Applied Groundwater Modeling: Simulation of Flow and Advective Transport. Academic Press, San Diego, 381p.
- ARAÚJO, O. J. & MAIA, R. G. N. (1991). Programa de Levantamentos Geológicos Básicos do Brasil, Serra dos Carajás, Folha SB22-Z-A, Est. do Pará. Texto explicativo. Brasília, DNPM/CPRM, 164 p.
- DIERSCH e PERROCHET (1999). Finite Element Modeling of *FEFLOW*, Mass and Heat Transport in Porous and Fractured Media.
- DIERSCH, H. J. 2002. *FEFLOW* Reference Manual. [www.wasy.de](http://www.wasy.de)
- DOCEGEO (1988). Revisão litoestratigráfica da Província Mineral de Carajás. In: SBG, Congresso Brasileiro de Geologia, 35. Belém, Anexo aos Anais.p.11-56.
- DOMINGOS, F. 2009. The structural setting of the Canaã dos Carajás region and Sossego-Sequeirinho deposits, Carajás – Brazil, Durham theses, Durham University. Available at Durham E-Thesis Online: [ht5tp://etheses.dur.ac.uk/144/](http://etheses.dur.ac.uk/144/)
- FETTER, C.W., 1994, Applied Hydrogeology, 3rd ed.: Macmillan College Publishing, Inc., New York, 616 p.
- FREEZE, R. A. & CHERRY, J. A. 1979. Groundwater. Prentice Hall, Inc. Engewood Cliffs.
- FIORI, J. P. O. 2010. Avaliação de Métodos de Campo para a Determinação de Condutividade Hidráulica em Meios Saturados e não Saturados.
- GOLDER Associates Brasil. Cenário Preliminar de Disponibilidades Hídricas na FLONA de Carajás, Volumes I a VI, 2006/2007.
- HIDROVIA. 2008. Relatório de atualização dos dados de monitoramento hídrico e de avaliação de possíveis impactos hidrogeológicos ambientais – Ano base 2007.
- JUSTO, A. P. & LOPES, E. S. 2013. Carta geológica preliminar Folha SB.22-Z-A-II Serra dos Carajás. Escala 1:100.000. CPRM.
- PINHEIRO, R. V. L. 1997. Reactivation history of the Carajás and Cinzento Strike-Slip Systems, Amazon, Brazil. University of Durham, UK, Ph.D Dissertation, 408 p.
- REBOUÇAS, A. C. 1994. Sistema Aquífero Botucatu no Brasil. In: CONG. BRAS. de ÁGUAS SUBTERRÂNEAS, 8, Recife, 1984. Anais... Recife, ABAS/DNPM/CPRM, 1984. P. 500-509.
- RESENDE, N. P. & BARBOSA, A. L. de M. 1972. Relatório de Pesquisa de Minério de Ferro, Distrito Ferrífero da Serra dos Carajás, Estado do Pará. Belém: AMZA, 1972. 248p.
- SELBY, M. J. 1993. Hillslope Materials and Processes. Oxford: Oxford University Press.

		<b>ELABORAÇÃO DE ESTUDO HIDROGEOLÓGICO NOS PLATÔS DE N1/N2 EM CARAJÁS</b>	
<b>MODELO HIDROGEOLÓGICO CONCEITUAL E NUMÉRICO</b>  <b>RELATÓRIO TÉCNICO EIA</b>		Nº VALE -	PÁGINA <b>88/92</b>
		Nº CONTRATADA -	REV. <b>1</b>

SHEWCHUK, J. R. 2002. Delaunay refinement algorithms for triangular mesh generation. Comp. Geom. Theor.



SOUZA, S. M. T. de (Ed.) Disponibilidades hídricas subterrâneas no Estado de Minas Gerais. Belo Horizonte: HIDROSISTEMAS/COPASA, 1995. 525p.

SPOT: imagem de satélite. Itacaiúnas, em fevereiro de 2008

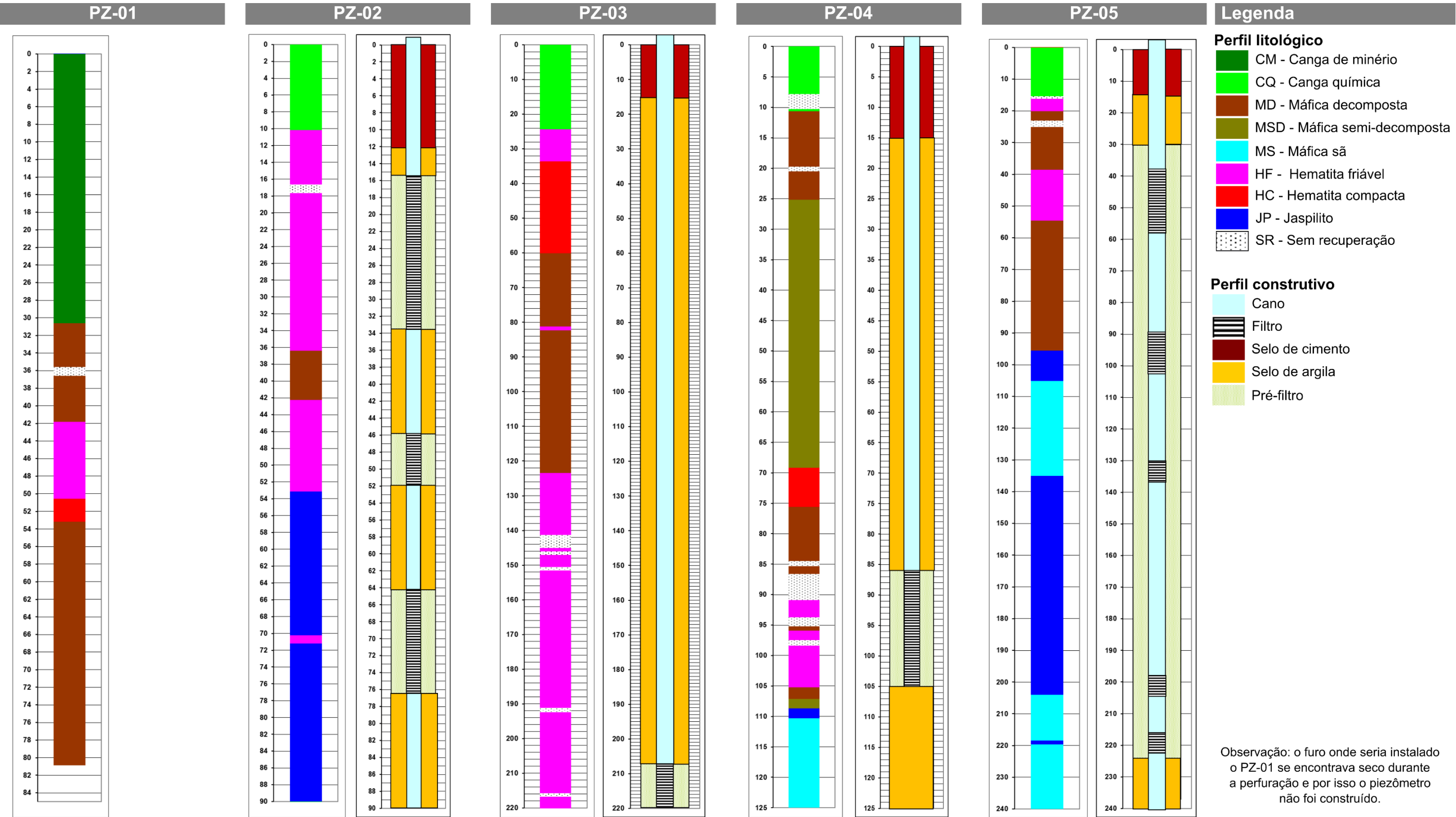
VIDAL-PARDAL, M. (1962) Estudio acerca de la permeabilidade del terreno. Boletín, nº 15 de Informaciones y Estudios. Servicio Geológico de Obras Públicas. Madrid, 1962, 66p.

WASY, Institute for Water Resources Planning and Systems Research Ltd. 2005. *FEFLOW* 6.2: Finite Element Subsurface Flow & Transport Simulation System. Reference Manual, User's Manual and White Papers. Berlin, Germany. [www.wasy.de](http://www.wasy.de)



		<b>ELABORAÇÃO DE ESTUDO HIDROGEOLÓGICO NOS PLATÔS DE N1/N2 EM CARAJÁS</b>	
<b>MODELO HIDROGEOLÓGICO CONCEITUAL E NUMÉRICO</b>  <b>RELATÓRIO TÉCNICO EIA</b>		Nº VALE -	PÁGINA <b>89/92</b>
		Nº CONTRATADA -	REV. <b>1</b>

## ANEXO I –PERFIS LITOLÓGICOS E CONSTRUTIVOS DOS PIEZÔMETROS



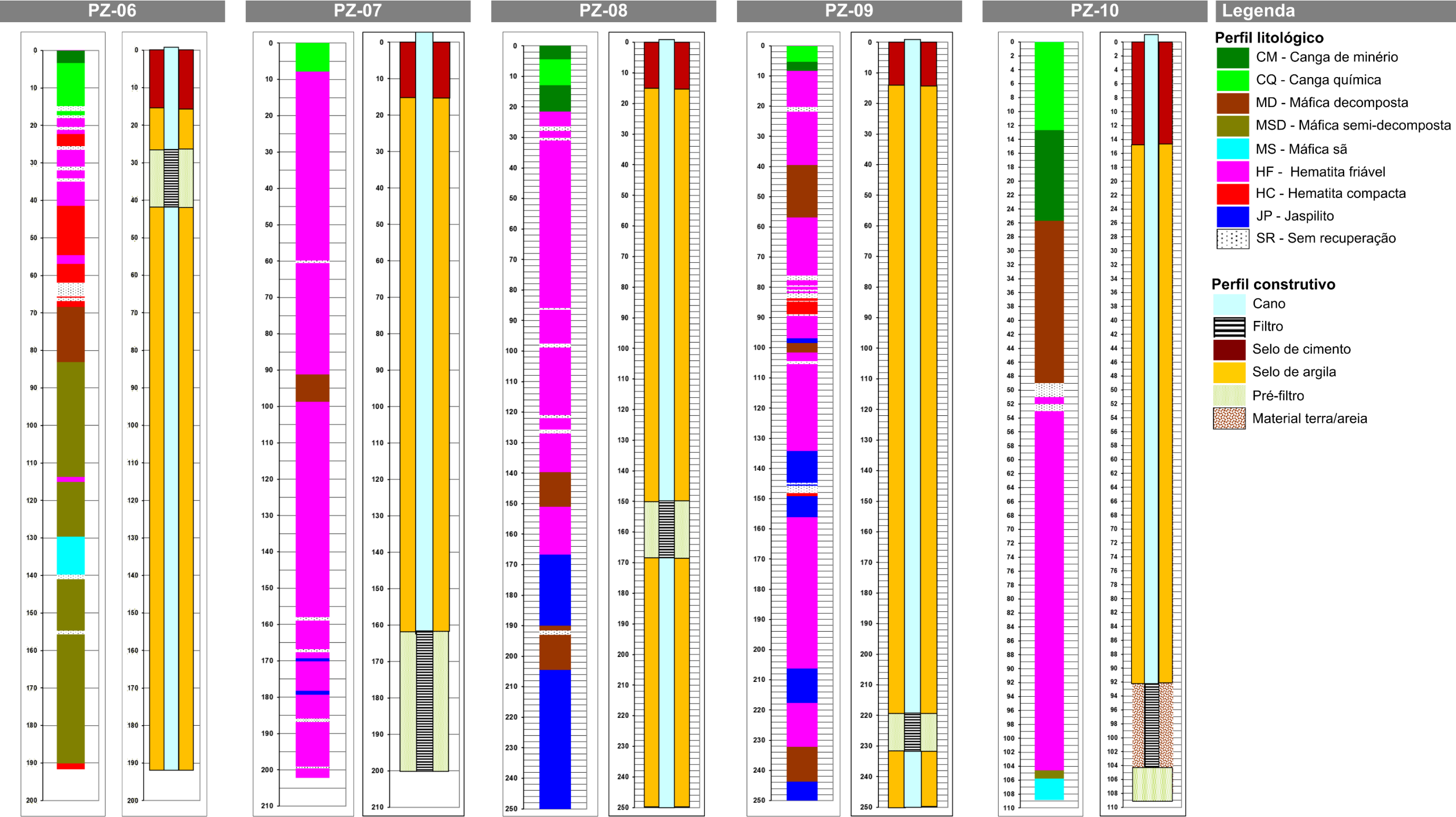


Figura I – Perfis litológicos e construtivos dos piezômetros e medidores de nível d’água do platô N1 (continuação).



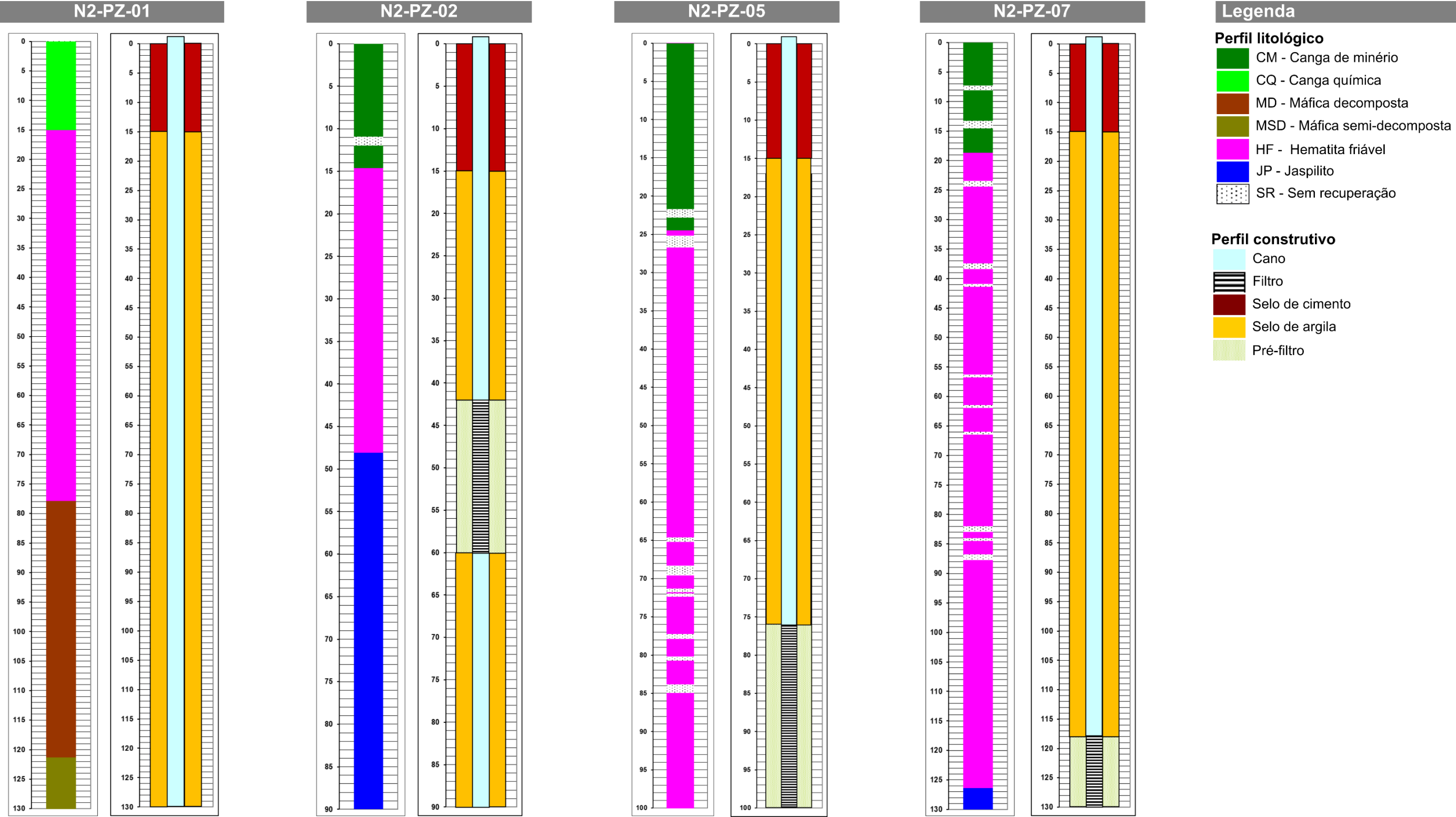


Figura II – Perfis litológicos e construtivos dos piezômetros e medidores de nível d’água do platô N2.