

6 Modelagem Numérica do Fluxo na Área de Estudo

No processo de criação de um modelo hidrogeológico deve-se ter em mente os objetivos que se pretende atingir. Conforme Feitosa (2000), em alguns casos, estes objetivos podem ser o de previsão, ou seja, prever as respostas do aquífero a determinadas ações, ou de interpretação, segundo as quais se procura entender o funcionamento do aquífero e sistematizar as informações.

Além disso, análises numéricas de fluxo podem ajudar no entendimento e no subsídio de informações essenciais para a solução de problemas de instabilidade de taludes, simulações de rebaixamento do nível freático, avaliação de potenciais para captação de água subterrânea entre outros, que dificilmente seriam entendidos por aproximações simplificadas e soluções analíticas.

A proposição de um modelo hidrogeológico para a área em estudo tem por objetivo representar a distribuição de pressões e a posição da linha de pressão nula no maciço e na fundação da PDE-05, assim como nas demais áreas de interesse, reproduzindo um cenário aproximado das condições atuais de percolação da água subterrânea para a zona saturada. A partir deste cenário simplificado, pretende-se apresentar as possíveis causas e condicionantes que justifiquem a ocorrência de sub-pressões na fundação da PDE-05.

Para tanto, serão utilizados os *softwares Slide 5.0®* da Rocscience Inc.¹⁸ e o *VisualModflow®* da Waterloo Hydrogeologic Inc.¹⁹, em duas e três dimensões respectivamente, implementado-se o modelo hidrogeológico conceitual segundo as unidades hidroestratigráficas e condições de contorno anteriormente definidas, para simulações das condições de escoamento subterrâneo em regime estacionário.

¹⁸ A Rocscience Inc. é uma empresa canadense, associada à universidade de Toronto, a qual desenvolve *softwares* específicos para análises de problemas geotécnicos nos setores da engenharia civil e mineração.

¹⁹ Waterloo Hydrogeologic Inc. é uma empresa do Grupo Schlumberger que desenvolve e comercializa *softwares* para análises de fluxo subterrâneo e transporte de contaminantes.

Em ambos os modelos hidrogeológicos numéricos (2D e 3D), o desenvolvimento dos trabalhos se faz, primeiramente, pela definição do domínio de interesse e sua subsequente divisão em uma malha de cálculo. Em seguida, são implementadas as condições de contorno dos modelos, as unidades hidroestratigráficas e suas correspondentes propriedades hidráulicas em comum acordo com as informações provenientes do modelo conceitual (item 5.1).

Os parâmetros internos do modelo, tais como a condutividade hidráulica e a recarga, são ajustados até que o modelo computacional proposto se comporte de maneira similar à observada em campo, fornecendo valores de vazões e níveis piezométricos próximos à realidade da área, os quais correspondem às fases de calibração e validação do modelo.

6.1. Modelagem Computacional 2 D

O modelo hidrogeológico computacional bidimensional foi implementado seguindo as unidades hidroestratigráficas definidas no modelo físico conceitual, para simulações das condições de escoamento subterrâneo em regime estacionário.

O programa utilizado para estas simulações foi o *Slide*® (V.5.014), desenvolvido para analisar a estabilidade geotécnica de taludes compostos por rocha e solo. Entretanto, este possui também um módulo chamado *Groundwater* que permite simular as condições de fluxo em problemas de duas dimensões, para materiais em condições saturadas e não saturadas.

O módulo *Groundwater* resolve a equação de Richards (1931) em regime permanente que utiliza o método dos elementos finitos para a determinação das cargas hidráulicas no meio simulado.

Para a simulação da área em estudo, foi gerada uma seção vertical típica representativa, criada a partir das curvas topográficas da área, informações e mapas geológicos, descrições de perfis de sondagens executadas e visitas de reconhecimento ao campo.

A seção proposta tem direção SW-NE, iniciando-se no alto da serra (elevação 1080 m), caminhando paralelamente pela ombreira esquerda da PDE-01 até cortar transversalmente a PDE-05. O limite final desta seção foi definido para

uma região localizada na PDE-02, onde a seção intercepta o córrego Derrubada. O comprimento e a espessura desta seção são de 1577 m e 507 m, respectivamente.

Para implementação do modelo foi necessário definir os parâmetros de entrada, tais como condutividade hidráulica e recarga, além das condições de contorno do problema, conforme descrito a seguir.

6.1.1. Parâmetros de Entrada do Modelo 2 D

- Condutividade Hidráulica

Foram estabelecidos parâmetros hidráulicos para cada material identificado na seção modelada, estimados a partir de ensaios de campo e referências bibliográficas, conforme apresentado na Tabela 6. Os parâmetros não saturados, obtidos a partir da curva característica (Apêndice A) de alguns dos materiais - estéril e alteração de rocha - não foram utilizados em razão da simulação proposta não contemplar o regime transiente.

Tabela 6 – Valores das unidades hidroestratigráficas utilizados no modelo bidimensional

Unidade	Litotipos	Cond. Hidráulica (cm/s)		Origem
		K_x	K_y	
I	Solo residual / Colúvio	$2,2 \times 10^{-6}$		Ensaio de permeabilidade e com permeâmetro de Guelph (Apêndice A)
	Alteração de rocha	$1,2 \times 10^{-3}$		
II	Hematitas e itabiritos friáveis da formação Cauê	$5,0 \times 10^{-4}$		Grandchamp (2003), para a mina de Águas Claras
III	Hematita e itabirito compacto / embasamento cristalino	impermeável		Freeze e Cherry, (1979)
IV	Xistos indivisos	$5,0 \times 10^{-5}$	$5,0 \times 10^{-6}$	Freeze e Cherry, (1979)
V	Quartzitos da formação Moeda	$9,0 \times 10^{-5}$		Freeze e Cherry, (1979)
IV	Material estéril itabirito ²⁰	$1,8 \times 10^{-3}$		Ensaio com permeâmetro de Guelph / Tensiômetro (Apêndice A)
	Material estéril xisto	6×10^{-6}		Ensaio de permeabilidade (Apêndice A)

²⁰ Valor da condutividade hidráulica referente ao K_{sat} encontrado no ensaio de campo.

• Recarga

Para calibração do modelo, foi ajustada uma recarga média anual, inserida sobre a superfície topográfica da área, igual a 340 mm anuais para uma pequena região localizada no topo da serra, a montante da PDE-01 (região de baixa declividade e vegetação mais densa) e 290 mm anuais para as demais regiões, mas limitando-se ao “pé” da PDE-05. Nas regiões localizadas à jusante da PDE-05 não foi implementada recarga ao aquífero em razão deste local ser constituído por material de baixa permeabilidade, com cobertura vegetal pouco desenvolvida (gramíneas), além da existência de várias erosões decorrentes da ruptura da PDE-02 e do mau gerenciamento das águas pluviais. Observa-se também, em campo, que esta região é uma área de descarga, como presença de nascentes e também da surgência de água subterrânea na base da PDE-05.

6.1.2. Condições de Contorno e Definição da Malha 2 D

Para implementação do modelo, foram definidas diferentes condições de contorno, a saber:

- No limite superior, sobre toda a região à montante da PDE-05, e sobre esta inclusive, foi implementada condição de fluxo igual à recarga média local estimada (item 5.2);
- No “pé” da PDE-05, foi considerada uma carga de poro-pressão nula, na região onde a água subterrânea aflora formando um pequeno brejo que atualmente alimenta o córrego Derrubada;
- Nos limites lateral esquerdo (topo da serra), direito e inferior do modelo hidrogeológico foi considerada uma fronteira de fluxo nulo.

A malha de elementos finitos utilizada contém 9958 elementos e 5233 nós, sendo cada elemento do tipo triangular. A Figura 19 apresenta a malha de elementos finitos utilizada, focalizando a área da PDE-05.

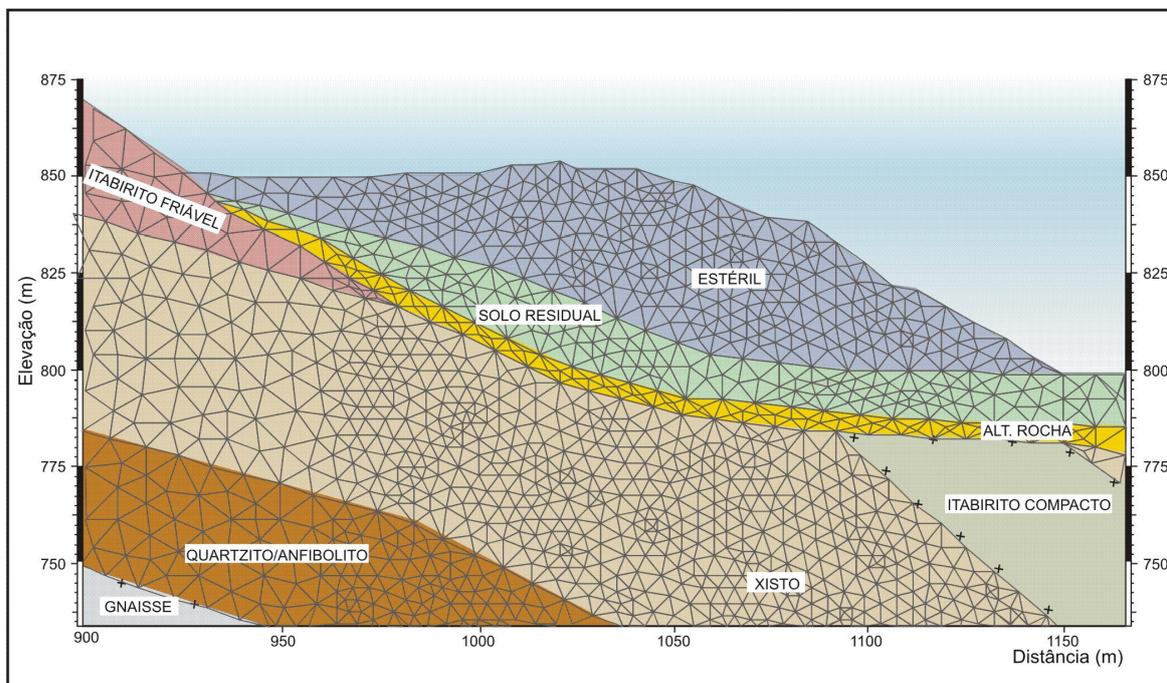


Figura 19 – Malha triangular de elementos finitos utilizada – detalhe focalizando a área da PDE-05.

6.1.3. Calibração do Modelo 2 D

A calibração do modelo consistiu em ajustar os valores de condutividade hidráulica e recarga, objetivando minimizar a diferença entre os valores de níveis freáticos calculados pelo modelo e os dados obtidos a partir de medições realizadas nos PZs e INAs. Nesta calibração também foi utilizado o valor de vazão medido à jusante da PDE-05, para aferir com os valores calculados no modelo.

Para o piezômetro PZ-ANPE5-02, instalado no segundo banco da pilha, foi verificada uma diferença de cerca de 3 m entre a leitura deste instrumento e a calculada pelo modelo, mas que pouco interfere na simulação regional. A Figura 20 apresenta em detalhes, o nível freático calculado pelo modelo, as medidas realizadas nos PZs / INAs e a vazão no “pé” da PDE-05.

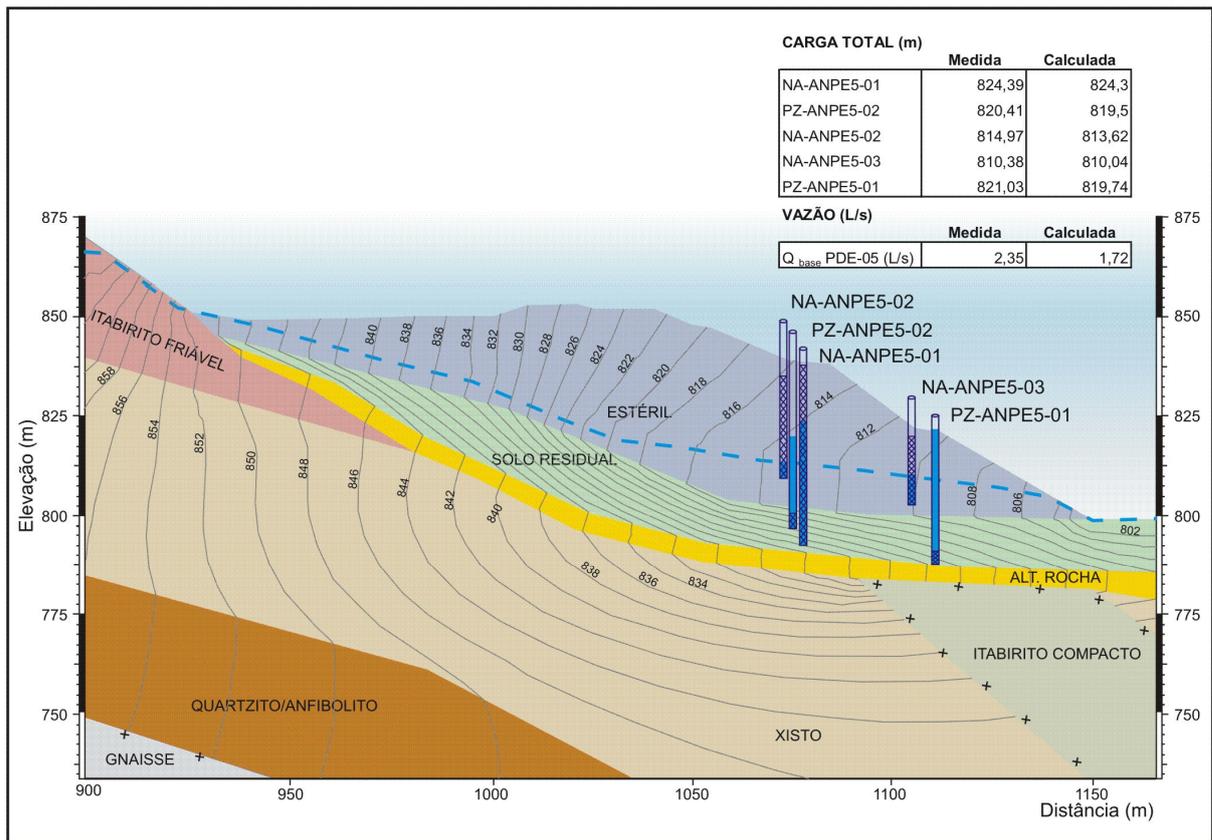


Figura 20 – Resultado da calibração do modelo hidrogeológico numérico bidimensional.

6.1.4. Resultados Obtidos – Modelo 2 D

O fluxo de água subterrânea inicia-se a partir infiltração de água proveniente da recarga. Parte deste fluxo escoar pela camada de itabirito friável até atingir o maciço da pilha de estéril, composto por um material de granulometria arenosa. Devido à existência de uma camada de solo residual de menor permeabilidade sotoposto ao estéril, a maior parte do fluxo subterrâneo acaba por ser conduzido ao pé da pilha por meio do material estéril, em virtude da dificuldade de infiltração de água perante esta camada de solo, que funciona como barreira hidráulica. Em seguida, o fluxo segue livremente sobre a superfície do terreno até encontrar a extinta calha do córrego Derrubada.

No entanto, uma porção do fluxo infiltra para profundidades maiores até atingir o meio fraturado formado pelo substrato rochoso, representado pelos quartzitos, escoando predominantemente em sentido paralelo à topografia do local. Próximo à região da PDE-05, o fluxo encontra uma barreira impermeável formada pela camada de itabirito compacto, de permeabilidade muito baixa, que

impede sua continuidade. Neste ponto, a direção principal do escoamento se altera, passando a escoar verticalmente para a superfície. Vale lembrar que nesta região, a água subterrânea possui uma carga hidráulica superior à elevação topográfica do terreno.

Entretanto, devido à existência de uma camada de baixa permeabilidade sobreposta ao quartzito, o fluxo acaba perdendo grande parte dessa carga hidráulica. A direção principal de escoamento é mais uma vez alterada, passando o fluxo a ser conduzido pela camada de alteração de rocha existente neste local.

Para a região localizada à jusante da PDE-05, o modelo não apresentou resultados satisfatórios, indicando a presença do nível de água (N.A.) praticamente em toda a superfície do terreno (PDE-02), apesar de ser observado nesta região em indicadores de nível de água e sondagens à percussão executadas, um N.A. de aproximadamente seis metros de profundidade. Esta incoerência pode ser explicada pelo fato deste local ter sofrido uma ruptura e o estéril remanescente ainda estar se movimentando, não sendo introduzida adequadamente no modelo uma propriedade hidráulica para esta condição. Mesmo assim, acredita-se que os resultados encontrados nas demais regiões representam bem a realidade da área.

O resultado da análise de percolação é apresentado na Figura 21, na qual se podem observar as condições de contorno, a posição da linha freática no maciço e as linhas equipotenciais de carga total.

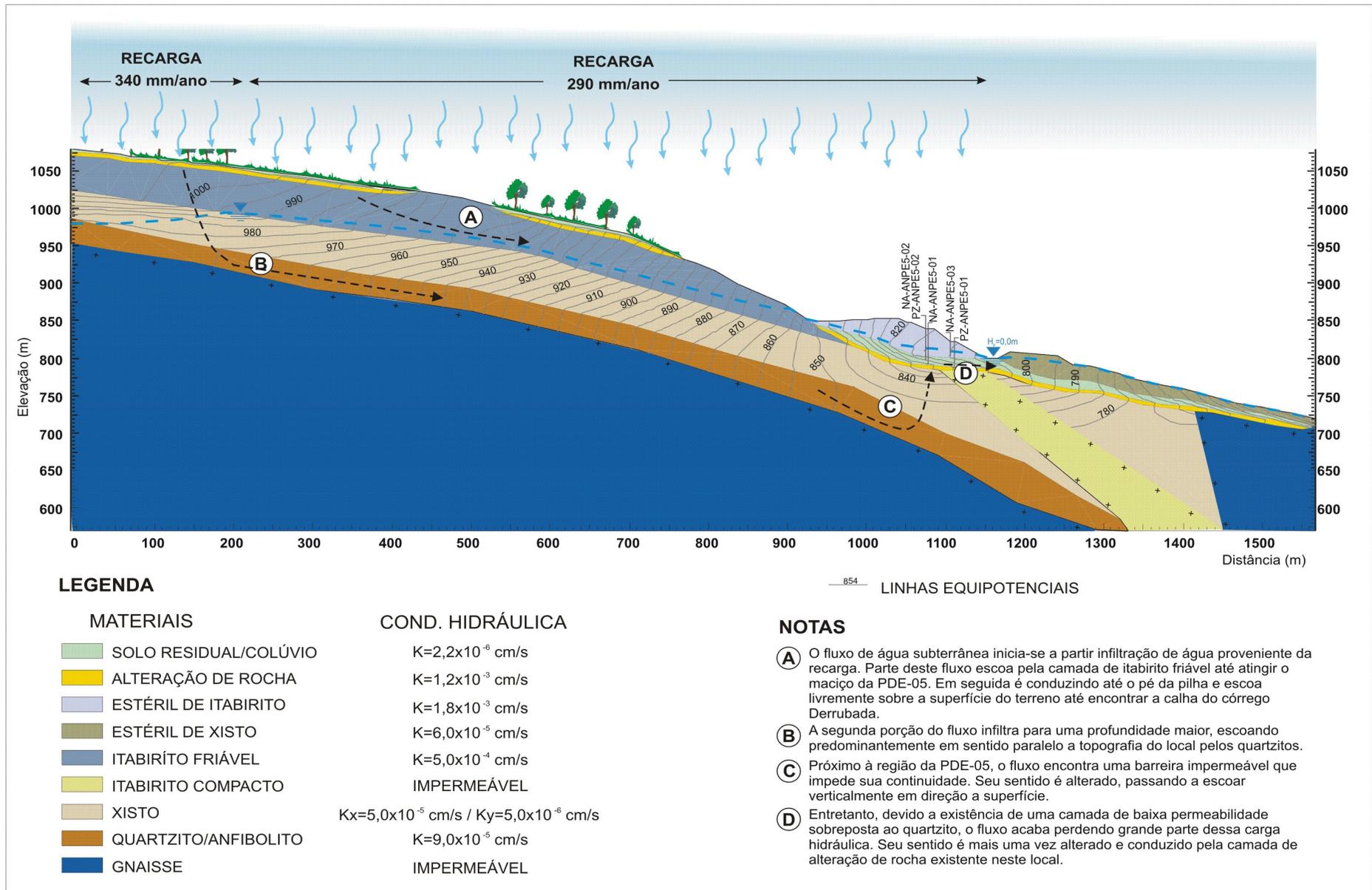


Figura 21 – Resultado do modelo hidrogeológico numérico bidimensional.

6.2. Modelagem Computacional 3 D

O *software* utilizado para representar a dinâmica hidrogeológica no domínio proposto foi o *VisualModFlow*® (Waterloo Hydrogeologic Inc., 2005). Esse aplicativo computacional permite simular o fluxo subterrâneo de água e o transporte de contaminantes através de um modelo numérico de diferenças finitas, resolvendo a equação diferencial do escoamento de água no meio sub-superficial (Anderson e Woessner, 1992), qual seja:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(K_x \frac{\partial h}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(K_y \frac{\partial h}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(K_z \frac{\partial h}{\partial z} \right) = S_s \frac{\partial h}{\partial t} - R^* \quad (6.1)$$

Onde:

- K_x , K_y e K_z representam os componentes do tensor de condutividade hidráulica nas direções x , y e z , respectivamente, [LT^{-1}];
- h refere-se à carga hidráulica, [L];
- S_s refere-se ao armazenamento específico do meio poroso, [L^{-1}] sendo utilizado apenas para simulações transientes;
- R^* refere-se ao termo geral de fonte ou sumidouro de água [T^{-1}], reproduzindo a injeção ($R^* > 0$) ou remoção ($R^* < 0$) de um volume de água, por unidade de volume do meio, por unidade de tempo; e,
- t refere-se ao tempo, [T].

6.2.1. Configurações do Modelo 3 D

A área modelada contempla $4,96 \times 10^5 \text{ m}^2$ (49,6 ha), encaixada em um pequeno anfiteatro, localizado entre as cotas topográficas mais elevadas (1100 m) e se estendendo até a porção de cotas mais baixas (790 m). A espessura do modelo é variável em função da topografia do terreno natural e da geologia do local.

O modelo foi dividido com uma malha de diferenças finitas de 25 m x 25 m dispostas em 20 camadas de espessuras iguais a 25 m, totalizando 12.500 células. O domínio abrange uma área de dimensões em planta de 1.615 m por 400 m, com limite inferior na cota 600 m em que não há contribuições (fluxo nulo), sendo variável em função da camada de embasamento cristalino.

Os limites das fronteiras laterais do modelo foram estabelecidos levando-se em conta a área de interesse do estudo, a disponibilidade de informação geológica e os respectivos divisores de água, caracterizados pelas linhas de camada das serras que circundam a área. Estes limites foram considerados como de fluxo subterrâneo nulo, isto é, não foram consideradas contribuições subterrâneas para estas regiões do modelo.

Assim, na região sudeste foi admitido que o fluxo seria perpendicular a esta fronteira, não havendo contribuições laterais, em virtude dos elevados gradientes hidráulicos longitudinais esperados.

Na porção nordeste, limitou-se o modelo a partir das drenagens existentes, considerando-as como “drenos”²¹. A Figura 22 resume as condições de contorno adotadas no modelo hidrogeológico regional.

Os valores de condutividade hidráulica adotados foram baseados nos valores sugeridos no modelo conceitual, resultantes dos ensaios de campo realizados na área ou obtidos a partir de referências da literatura para litotipos semelhantes. As unidades hidroestratigráficas foram implementadas a partir de seções horizontais provenientes da mina do Andrade, sendo que a unidade I identificada no modelo conceitual, composta por solos residuais, coluvionares e canga, não foi incorporada nesta simulação devido à pequena espessura ou à inexistência nas seções horizontais fornecidas pela mina.

A unidade referente ao itabirito compacto da formação Cauê e embasamento cristalino, formado por gnaisses, foi considerada impermeável, não sendo também incorporada ao modelo numérico.

Os valores utilizados na modelagem hidrogeológica para as unidades hidroestratigráficas são apresentados na Tabela 7.

²¹ Os “drenos” são recursos do *VisualModflow*® para extração do excesso de água na superfície modelada, permitindo configurar melhor as drenagens e talvegues existentes. O excesso de água que extrapola a base do dreno é retirado da simulação de forma replicar o desaguamento de uma drenagem superficial.

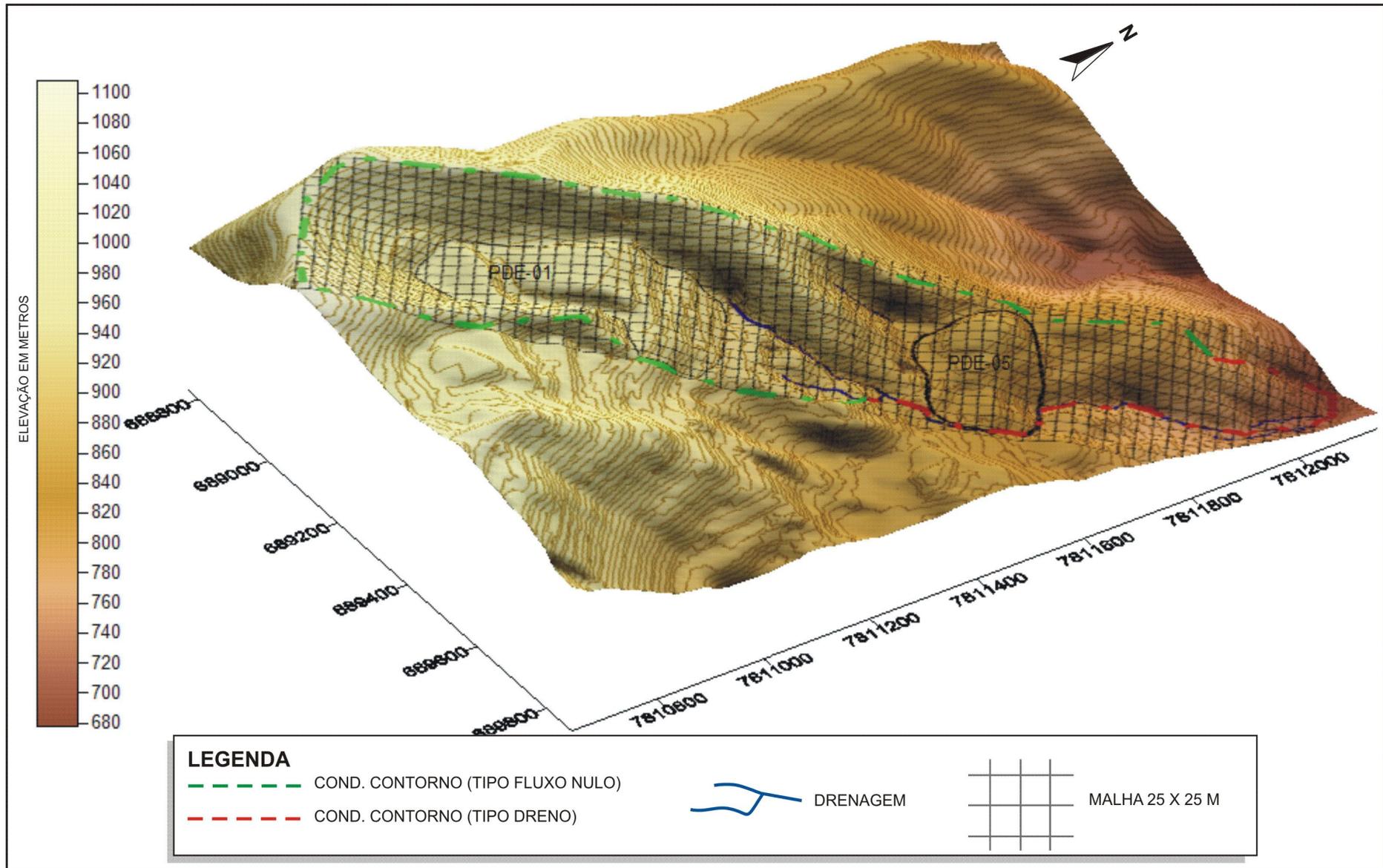


Figura 22 - Domínio do modelo hidrogeológico, identificação das condições de contorno adotadas e malha de cálculo (método das diferenças finitas).

Tabela 7 – Valores das unidades hidroestratigráficas utilizados no modelo regional

Unidade ²²	Litotipos	Cond. Hidráulica (cm/s)			Origem
		K _x	K _y	K _z	
II	Hematitas e itabiritos friáveis da formação Cauê	5×10^{-4}	1×10^{-3}	5×10^{-4}	Grandchamp (2003), para a mina de Águas Claras
IV	Xistos indivisos	1×10^{-5}	1×10^{-6}	1×10^{-6}	Freeze e Cherry, (1979)
V	Quartzitos da formação Moeda	1×10^{-4}			Freeze e Cherry, (1979)
VI	Material estéril itabirito	1×10^{-3}			Ensaios com permeâmetro de Guelph (Apêndice A)

Para a recarga do aquífero, adotaram-se três valores médios representativos, a saber:

- 300 mm/ano, implementado nas áreas compostas por material estéril de itabirito devido a este material possuir uma propriedade drenante e de fácil infiltração;
- 50 mm/ano, implementado nas áreas de maior declividade (regiões topográficas elevadas) e compostos em alguns locais por afloramentos rochosos;
- 200 mm/ano nas demais áreas.

Para a determinação destes valores de recarga do aquífero, foi realizado um balanço hídrico simplificado da bacia, na qual se insere a região estudada (item 5.2), estando esses valores dentro da faixa de valores máximos e mínimos aceitáveis para as condições geomorfológicas e litológicas da área.

Em todos os talwegues e drenagens existentes na região do modelo, foi necessário implementar sumidouros de água, a fim de melhor configurar melhor a superfície freática. Esses sumidouros foram impostos a partir do recurso do *VisualModflow*® denominado como “dreno”. Cada “dreno” foi posicionado sobre a superfície do terreno existente, com valores de condutância hidráulica estimada em 5.000 m²/dia. Este valor adotado já que não havia medições específicas em cada trecho das drenagens para calculá-lo.

²² A numeração deste item refere-se as unidades hidroestratigráficas sugeridas no modelo conceitual.

6.2.2. Calibração do Modelo 3 D

Para a calibração do modelo, utilizaram-se os dados existentes dos instrumentos de monitoramento hidrogeotécnico (PZs e INAs) instalados dentro da área modelada.

Além destes instrumentos, medidas de vazão nas nascentes existentes e no “pé” da PDE-05 foram utilizadas para verificar se os valores assumidos para a recarga do sistema aquífero eram condizentes aos verificados em campo.

Para cada instrumento monitorado, calculou-se um valor médio representativo das leituras anuais dos níveis freáticos e piezométricos, utilizando a série de valores do ano de 2006, para comparação aos valores calculados pelo modelo numérico.

Outra forma também realizada para verificar se o modelo numérico representa adequadamente o cenário real é a comparação dos volumes totais de entrada e saída de água simulada no modelo numérico. Valores próximos a 0,1% são aceitáveis segundo Konikow (1978). A Tabela 8 apresenta os valores de entrada e saída de água do modelo numérico, onde o valor encontrado para discrepância foi de 0,13%.

Tabela 8 – Balanço de água do modelo numérico – volumes totais de entrada e saída.

ENTRADA:	SAIDA:
Carga Constante = 0,00 [m ³]	Carga Constante = 0,00 [m ³]
Poços = 0,00 [m ³]	Poços = 0,00 [m ³]
Drenos = 0,00 [m ³]	Drenos = 216,08 [m ³]
Recarga = 215,79 [m ³]	Recarga = 0,00 [m ³]
Evapotranspiração = 0,00 [m ³]	Evapotranspiração = 0,00 [m ³]
<hr/>	<hr/>
Total ENTRADA = 215,79 [m ³]	Total SAIDA = 216,08 [m ³]
	ENTRADA - SAIDA = -0,29 [m ³]
	% Discrepância (erro) = -0,13

A Figura 23 apresenta os resultados da calibração do modelo em um gráfico de valores observados em campo *versus* valores calculados pelo modelo. A ocorrência de pontos que se alinham com a reta de 45° indica uma calibração favorável, na qual o melhor ajuste encontrado correspondeu a um erro absoluto

médio de 4,8 m, com desvio padrão de 2,0 m, com uma média normalizada dos quadrados das diferenças (NRMS) de 5,1%.

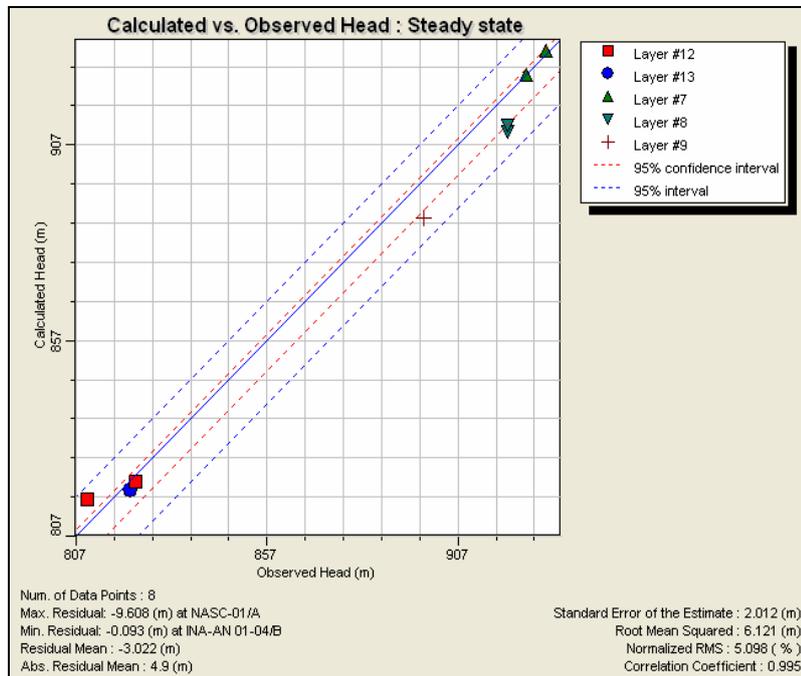


Figura 23 – Comparações entre as cargas hidráulicas medidas e calculadas pelo modelo numérico tridimensional.

Apesar do modelo aparentemente calibrado (carga hidráulica e recarga), incertezas ainda podem existir na simulação, devido às soluções não-únicas, conforme relatado por Anderson e Woessner (1992). Tais incertezas ocorrem porque diferentes combinações de parâmetros do campo fornecem valores equivalentes de calibração e, para estes casos, o mais recomendado para quantificação das incertezas é a realização de análises sensitivas dos parâmetros estimados.

No entanto, considerou-se desnecessária a realização das análises sensitivas, já que o objetivo da modelagem numérica esperado neste trabalho não é a previsão do comportamento da água subterrânea em estágios futuros, mas sim a comparação da representação do escoamento subterrâneo em modelos 2 D e 3 D na área da PDE-05. Isto forneceria resultados que ajudariam na compreensão da ocorrência das sub-pressões na fundação.

Além do mais, os resultados encontrados durante o processo de calibração foram considerados adequados em relação ao comportamento previsto pelo modelo conceitual e pelas medidas de campo (descarga e carga hidráulica).

6.2.3. Resultados Obtidos no Modelo 3 D

A distribuição espacial da superfície freática, calculada pelo modelo 3 D, representa o atual direcionamento do escoamento da água subterrânea, apresentando valores próximos dos níveis freáticos medidos em campo.

De acordo com esta distribuição, o fluxo das águas subterrâneas se dá a partir da infiltração da água proveniente das áreas de recarga do alto das serras, com direção predominante de sudoeste para nordeste. Próximo à elevação 920 m, parte deste fluxo aflora na superfície, originando a nascente principal da área modelada e, mais à jusante, o córrego Derrubada. Na região da PDE-05, mais especificamente em sua fundação, as linhas equipotenciais calculadas mostram que o fluxo possui um componente vertical, com cargas hidráulicas iguais às cotas topográficas do local, promovendo o aporte de água até a superfície, além da surgência da água subterrânea próxima à região do pé da PDE-05. A Figura 24 apresenta a superfície freática, com a direção de fluxo simulada pelo modelo hidrogeológico para seções horizontais nas elevações 925 m, 875 m, 850m, 800m, 775m e seção vertical com direção SW-NE.

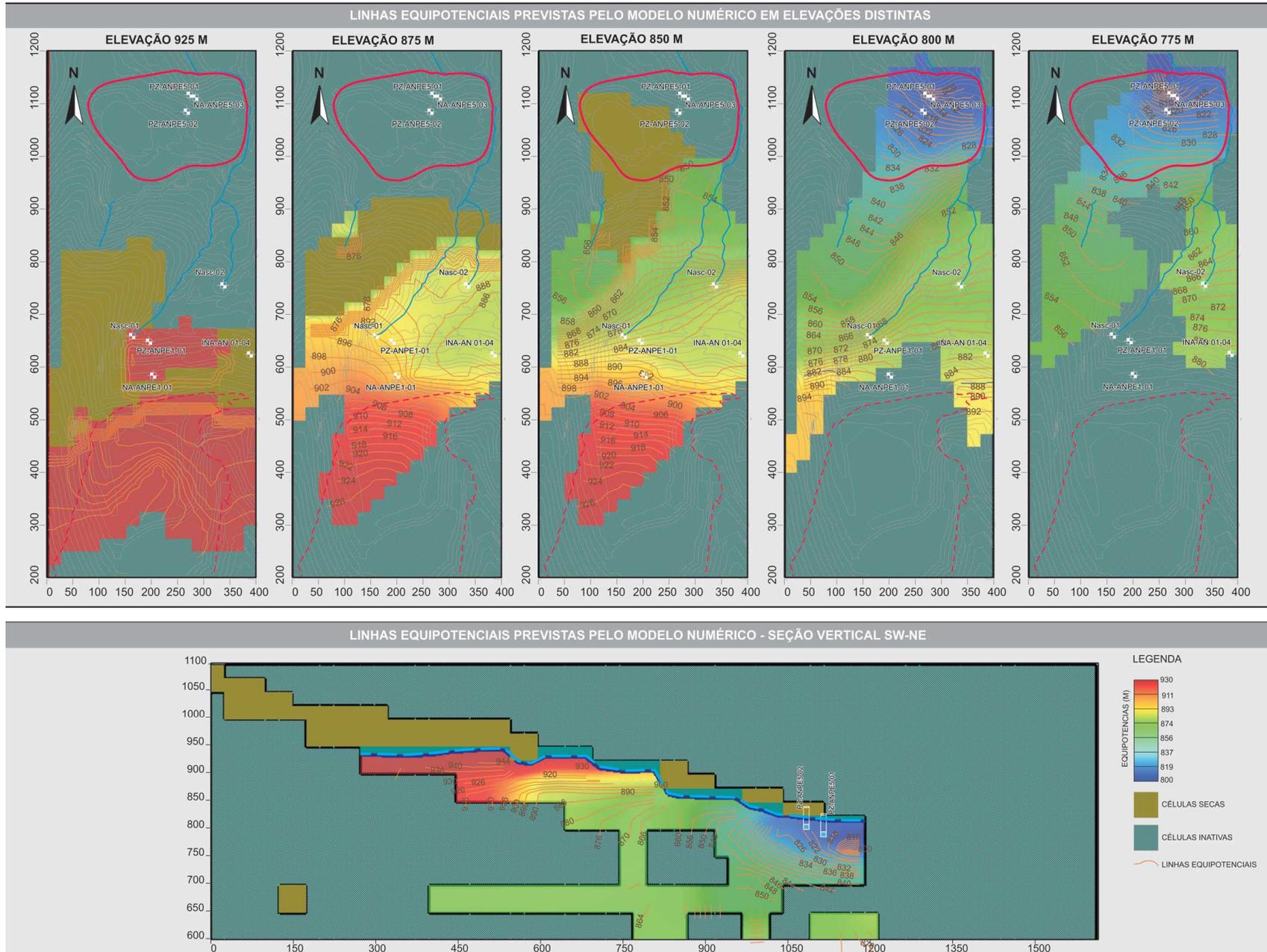


Figura 24 - Distribuição potenciométrica da superfície freática simulada pelo modelo hidrogeológico numérico 3 D calibrado.

6.3.Comparação entre os Resultados Obtidos nos Modelos Numéricos

Neste item serão discutidos os aspectos relacionados aos resultados obtidos nas simulações numéricas bidimensionais e tridimensionais realizadas na área em estudo, com especial atenção ao objetivo inicial da criação dos modelos numéricos, a partir dos quais se desejava representar a ocorrência de sub-pressões na fundação da PDE-05 bem como entender as possíveis causas de tal ocorrência.

Para tanto, é importante diferenciar cada tipo de modelo e de simulação, antes mesmo de serem comparados seus resultados, pois ambas as ferramentas utilizadas possuem limitações que podem interferir nos resultados encontrados.

Vale lembrar que em cada modelo numérico, propriedades hidrodinâmicas e condições de contorno foram ajustadas a fim de se obter a melhor calibração. Os modelos podem, portanto, possuir valores diferentes para o mesmo elemento, desde que condizentes com as diretrizes propostas no modelo conceitual.

A modelagem bidimensional é muito utilizada para entendimento de problemas de fluxo subterrâneo devido à facilidade e à velocidade de implementação dos parâmetros de entrada, condições de contorno e geração da malha de cálculo, que podem ainda ser facilmente refinada em áreas específicas do problema, sem acarretar um demanda excessiva em termos de processamento. A precisão na delimitação dos contornos do modelo, tendo em vista a flexibilidade de incorporação da malha, no caso de se utilizar o método dos elementos finitos, é também um fator que propicia a utilização da ferramenta.

Por outro lado, os modelos tridimensionais vêm conquistando cada vez mais espaço, principalmente pela facilidade de visualização e compreensão dos resultados encontrados, além de permitirem realizar simulações em que as interações tridimensionais devem ser consideradas e têm grande influência no problema posto.

Avaliando os resultados encontrados nos dois modelos, pode-se dizer que ambas as simulações permitiram representar de maneira satisfatória, o escoamento da água subterrânea proveniente da recarga.

Para o modelo em 2 D, a sub-pressão na fundação da PDE-05 é facilmente visualizada, indicando que a causa desta ocorrência está relacionada principalmente aos condicionantes geológicos existentes neste local.

Do mesmo modo, observa-se no modelo 3 D, a grande influência da geologia local no comportamento do escoamento subterrâneo, apesar de que, neste modelo, algumas lentes e camadas de material de pequena espessura não foram consideradas, como é o caso das camadas de solo residual e a alteração de rocha existentes na fundação da PDE-05.

Apesar disso, pequenas diferenças pontuais entre cargas hidráulicas calculadas nos diferentes modelos foram observadas para locais de mesma elevação topográfica, mas que pouco interferem nas simulações regionais, sendo relacionadas às diferenças de parâmetros, ao refinamento das malhas, às simplificações da geologia e a outros. Por exemplo, para os instrumentos PZ-ANPE5-01 e PZ-ANPE5-02, as diferenças encontradas para as medidas de carga hidráulica foram 0,90m e 1,50m, respectivamente. Para o instrumento NA-ANPE5-03, encontraram-se diferenças entre os modelos de 6,20m. No que se refere às medições de vazão no “pé” da pilha, as diferenças são da ordem de 0,8L/s.

Por fim, ressalta-se que os modelos em três dimensões exigem o conhecimento de vários parâmetros hidráulicos e das condições de contorno que, na maioria das vezes, não estão determinados para a área de interesse. A necessidade para a busca por limites de fronteira, em áreas com baixo conhecimento hidrogeológico, incorporam, conseqüentemente, mais uma fonte de incerteza à modelagem. Mais do que isso, as grandes dimensões da malha de cálculo, necessárias para tornar o modelo estável e reduzir o tempo de processamento, muitas vezes dificultam a visualização de fenômenos de menor escala, mas que não são, por isso, menos importantes.