

MODELAGEM HIDROGEOLÓGICA COMPUTACIONAL DO SISTEMA DE FLUXO DE ÁGUAS SUBTERRÂNEAS NO BAIRRO JARDIM CANADÁ – QUADRILÁTERO FERRÍFERO, NOVA LIMA, MG

Helio Alexandre Lazarim¹ & Celso de Oliveira Loureiro²

Resumo - Apresenta-se neste artigo os procedimentos adotados na concepção, desenvolvimento e calibração de um modelo hidrogeológico computacional representativo do sistema de fluxo de água subterrânea existente no bairro Jardim Canadá, Nova Lima – MG. O referido bairro localiza-se a noroeste da província mineral do Quadrilátero Ferrífero, estado de Minas Gerais, Brasil. A área de estudo é delimitada pela bacia hidrológica formada a partir das microbacias dos córregos Seco e dos Fechos, com aproximadamente 16 km² de área superficial e altitudes variando entre 1.500 e 1.100 metros, estando situada a 15 km a sul do município de Belo Horizonte. O estudo teve por base o desenvolvimento de um modelo conceitual e computacional sobre a hidrogeologia local, utilizando-se do pacote de simulação computacional VisualMODFLOW.

O modelo hidrogeológico computacional desenvolvido para o local representou satisfatoriamente bem a distribuição das cargas hidráulicas e as vazões de descarga das surgências de águas subterrâneas, tendo sido por isso considerado como representativo do sistema de fluxo em questão. Os resultados indicaram a possibilidade da existência de um único sistema de fluxo de água subterrânea na área de estudo, sendo mantido pela recarga natural proveniente da infiltração da água de chuva.

Palavras-chave - modelagem, hidrogeologia computacional, Quadrilátero Ferrífero

¹ M.Sc., Engenheiro Geólogo - e-mail: gab@golder.com.br - endereço: Golder Associates Brasil Ltda. - Rua Gonçalves Dias, 3.172 – 3° CEP 30.140-093 Belo Horizonte, MG

² Ph.D., Professor do Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental da UFMG. - e-mail: celso@desa.ufmg.br - endereço: DESA - Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental - Escola de

1. INTRODUÇÃO

Dependendo das condições geomorfológicas, geológicas, topográficas e hidrogeológicas encontradas em um determinado terreno, a tarefa de desenvolver um modelo hidrogeológico confiável sobre o comportamento hidrodinâmico do aquífero local pode oferecer desafios técnicos e computacionais significativos. De um modo geral, como se poderia esperar, quanto mais complexa for a região, sob o aspecto geológico, maiores são as dificuldades envolvidas no procedimento de modelagem.

Os terrenos encontrados nas formações do Quadrilátero Ferrífero, em Minas Gerais, devido à heterogeneidade dos seus materiais geológicos e à variação acentuada nas suas declividades topográficas, constituem, via de regra, exemplos típicos de casos complexos para o desenvolvimento de modelos hidrogeológicos. Alguns estudos de modelagem já foram realizados em sítios específicos na região do Quadrilátero Ferrífero - Bertachinni (1994), Rubio (1996), Rubio (1998), Silva et al. (1994), Lazarim e Loureiro (1998), Lazarim (1999), e, Lazarim e Loureiro (1999). No entanto, ainda existe um interesse grande a respeito dos detalhes envolvidos, e das soluções adotadas, no procedimento de modelagem hidrogeológica dos sistemas subsuperficiais localizados naquela região.

O trabalho apresentado a seguir descreve a metodologia empregada na concepção, desenvolvimento e calibração do modelo hidrogeológico computacional proposto para o Bairro Jardim Canadá e arredores; trata-se do resumo de uma parte de um trabalho mais abrangente sobre o mesmo tema, desenvolvido pelos autores, em Lazarim (1999).

A área de estudo é constituída principalmente por rochas do Supergrupo Minas e localiza-se a noroeste da província mineral do Quadrilátero Ferrífero (Figura 1), estado de Minas Gerais, Brasil. Mais especificamente, foi analisado um setor da bacia hidrogeológica localizada no extremo norte do Sinclinal da Moeda, através da elaboração de um modelo hidrogeológico computacional estacionário e de caráter interpretativo.

O estudo teve por base: 1) o cadastramento e a interpretação potenciométrica dos piezômetros, cisternas e poços tubulares profundos existentes na área; 2) a interpretação dos estudos de caráter geológico e hidrogeológico anteriormente desenvolvidos na região; 3) a elaboração de seções hidroestratigráficas ao longo de toda a área de estudo; e, 4) o desenvolvimento de um modelo conceitual e computacional sobre a hidrogeologia local.

A utilização de modelos para a simulação matemática do comportamento de aquíferos em áreas de minas de ferro a céu aberto, na região do Quadrilátero Ferrífero, vem se mostrando como uma tendência recente, a exemplo do que foi apresentado em Silva *et al.* (1994) e Bertachini (1994). Em particular, a região do Bairro Jardim Canadá, localizada próxima da jazida de ferro de Capão Xavier, tem sido amplamente estudada sob o aspecto hidrogeológico, tendo Rubio (1996) elaborado uma série de simulações matemáticas, de caráter preditivo, sobre o comportamento futuro do aquífero na região quando houver a exploração de minério na referida jazida (Projeto Capão Xavier).

O modelo hidrogeológico aqui desenvolvido consiste em um detalhamento maior em relação aos modelos desenvolvidos anteriormente por Rubio (1996), com um foco específico para o Bairro Jardim Canadá e arredores, localizado imediatamente a sul da referida jazida de Capão Xavier. A análise hidrogeológica computacional teve por base a simulação matemática do aquífero Jardim Canadá, em regime de escoamento estacionário.

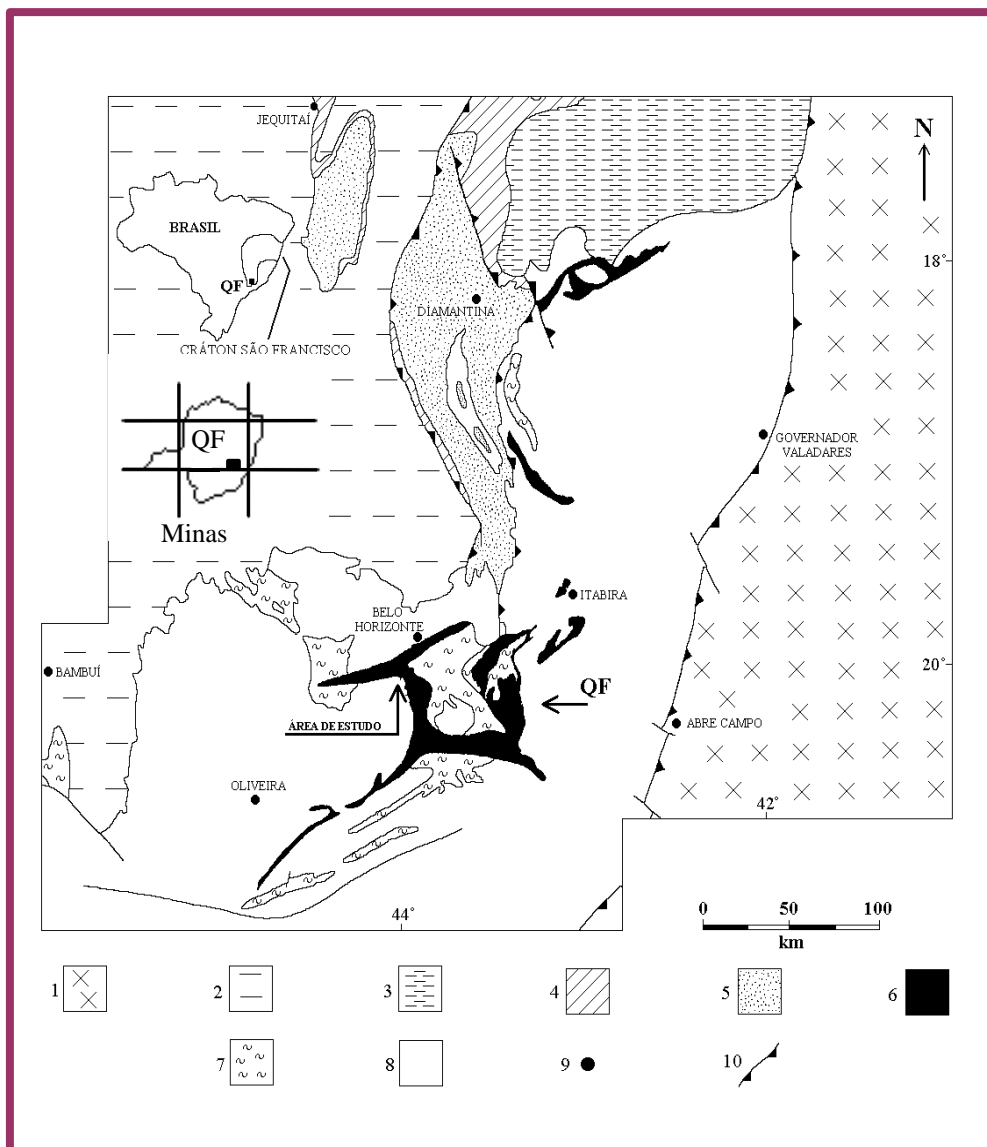


Figura 1- Contexto geológico simplificado e geográfico das porções sul do Crátom São Francisco e noroeste da Província Mantiqueira, segundo Chemale Jr. *et al.* (1991). Notar a localização do Quadrilátero Ferrífero (QF) no extremo sudeste do referido crátom, bem como dentro do estado de Minas Gerais. 1) Província Mantiqueira com granitos brasileiros; 2) Grupo Bambuí; 3) Grupo Salinas; 4) Grupo Macaúbas; 5) Supergrupo Espinhaço; 6) Supergrupo Minas; 7) *Greenstone belts* arqueanos; 8) Complexos metamórficos; 9) Cidades; 10) Falha de empurrão.

2. CARACTERIZAÇÃO HIDROLÓGICA.

A área de estudo é constituída por duas pequenas bacias hidrográficas caracterizadas pelos eixos principais de drenagem do Córrego dos Fechos e do Córrego Seco (Figura 2), com aproximadamente 16 km² de área superficial e altitude variando entre 1.500 e 1.100 metros, estando situada a 15 km a sul do município de Belo Horizonte, nos domínios do bairro Jardim Canadá, entre os intervalos de coordenadas (604.100 m - 608.900 m) UTM-E e (7.778.600 m - 7.783.800 m) UTM-N.

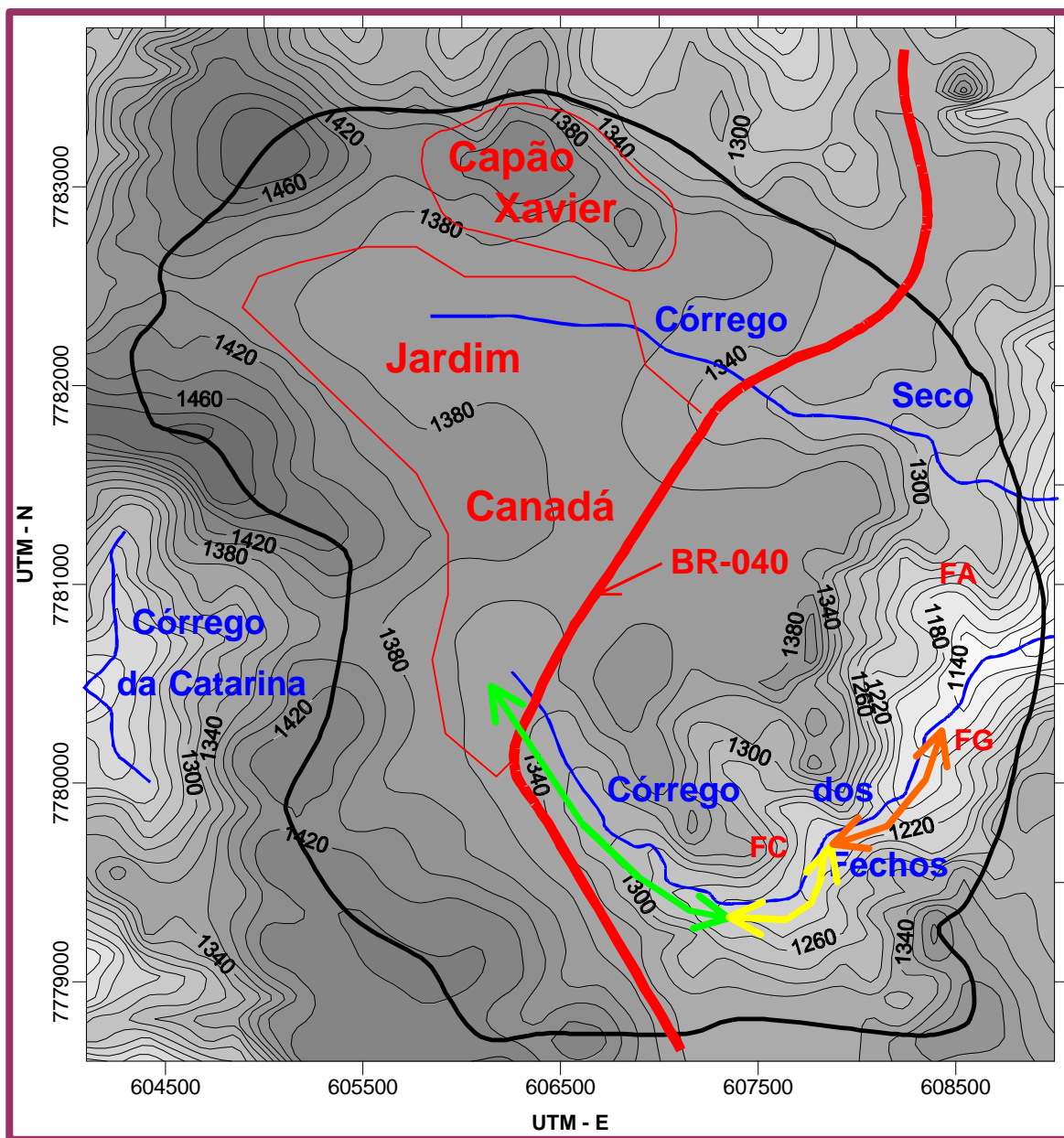


Figura 2 – Mapa topográfico da área de estudo, em coordenadas de projeção UTM, mostrando os setores estudados do Córrego dos Fechos, desde as nascentes até o vertedouro. Linha verde – montante da surgência cárstica; linha amarela – região de entorno da Surgência Cárstica dos Fechos; linha laranja – jusante da surgência cárstica. FC - Surgência Cárstica dos Fechos; FG – Surgência Fechos Galeria; FA – Surgência Fechos Auxiliar.

O regime de escoamento do Córrego dos Fechos é perene, sendo que o Córrego Seco se apresenta essencialmente intermitente. Ao longo do Córrego dos Fechos estão presentes três surgências de águas subterrâneas as quais garantem o seu regime perene do escoamento. Duas destas surgências estão instaladas nos domínios de formações

ferríferas bandadas intemperizadas e a terceira, de caráter cárstico, está instalada nos domínios de formação calcária/dolomítica.

Em termos climatológicos observa-se na região duas estações bem definidas, sendo uma úmida (período de águas altas), de outubro a março, e outra seca (período de águas baixas), de abril a setembro. Trata-se de um clima tropical chuvoso com invernos secos. Entre os anos de 1984 e 1997 a precipitação pluvial média na região foi da ordem de 1.875 mm/ano, medida esta realizada na estação climatológica da Mina da Mutuca, localizada aproximadamente a 3 km a nordeste da área de estudo. No período de águas altas a precipitação pluvial média registrada para o triênio 95-97 foi de 2131 mm/ano (Lazarim, 1999). Este valor foi utilizado como referência para o desenvolvimento do modelo hidrogeológico computacional aqui apresentado.

3. CARACTERIZAÇÃO DAS UNIDADES HIDROESTRATIGRÁFICAS

Na área de estudo são encontradas quatro unidades hidroestratigráficas coincidentes com as unidades litológicas existentes, a saber: 1) a unidade hidroestratigráfica instalada nos filitos da Formação Batatal; 2) a unidade instalada nas formações ferríferas bandadas (itabiritos) da Formação Cauê; 3) a unidade instalada nos mármore dolomíticos da Formação Gandarela; e, 4) a unidade instalada nos depósitos de coberturas cenozóicas. As três primeiras unidades estão condicionadas ao manto de intemperismo existente nas rochas proterozóicas da região, sendo o mesmo responsável pela abertura de planos de fraturas e dissolução de partes minerais.

A unidade hidroestratigráfica coincidente com os filitos da Formação Batatal tem caráter aquífero e funciona como uma barreira física ao escoamento da água subterrânea nas porções norte e leste da área de estudo. Este material apresenta uma densidade de fraturamentos insuficiente para impor características aquíferas ao meio. Recoberto esta unidade estão presentes camadas com até 50 metros de solo residual avermelhado e essencialmente argiloso.

A unidade hidroestratigráfica coincidente com a Formação Cauê é representada por um único corpo que constitui os dois flancos do Sinclinal da Moeda, sendo a junção entre os flancos realizada no extremo oeste da área de estudo. Em geral possui um caráter aquífero e, devido à sua excessiva heterogeneidade, pode ser subdividida em fácies hidrogeológicas. A fácies formada por itabiritos fraturados possui porosidade fissural secundária e ocorre em profundidades entre 100 e 600 metros. A fácies formada por corpos de hematita possui porosidade fissural e intersticial, ambas secundárias, sendo a

profundidade de ocorrência desta porção hidroestratigráfica entre 20 e 300 metros. A fácies denominada ocre instala-se nas porções de formações ferríferas bandadas contendo um grande volume de material argiloso de coloração ocre intensa, fato que lhe dá um caráter aquífero localizado no extremo noroeste da área de estudo. Por último, ainda que de modo restrito, são encontradas fácies hidrogeológicas instaladas em porções de formações ferríferas contendo material argiloso em quantidades menores das encontradas na fácies ocre. Em geral, seu posicionamento está junto ao contato da Formação Cauê com a Formação Gandarela

A unidade hidroestratigráfica coincidente com os mármores dolomíticos da Formação Gandarela é representada por duas fácies hidrogeológicas distintas que ocorrem ao longo da calha do Sinclinal da Moeda. A primeira possui porosidade fissural secundária e a outra possui caráter cárstico bem observado pela presença de uma dolina próxima ao Bairro Jardim Canadá assim como pela Surgência Cárstica dos Fechos localizada no extremo sudeste da área de estudo (Figura 3).

A principal característica da unidade hidroestratigráfica coincidente com os depósitos de coberturas cenozóicas vem a ser a presença de porosidade primária. Trata-se de uma unidade excessivamente heterogênea contendo fácies hidrogeológicas coincidentes com depósitos de canga, depósitos de argila terciária e depósitos de solo coluvionário avermelhado. Esta unidade posiciona-se no topo estratigráfico da região e possui espessuras que variam entre 20 e 100 metros estendendo-se em superfície ao longo de todo o setor de estudo. No tocante aos depósitos de argila terciária, os mesmos formam “ilhas” de baixa permeabilidade (caráter aquífero) através de dois corpos desconectados, localizados a norte e a sul da área de estudo (Figura 3).

Na base do manto de intemperismo, as rochas proterozóicas funcionam como uma barreira física ao escoamento de água subterrânea, uma vez que não há, sobre as mesmas, uma abertura dos planos de fraturas e que também não houve a dissolução das partes silicosas carbonáticas das rochas metamórficas sãs. Tal barreira está exposta em superfície, no extremo leste da área de estudo, onde um pequeno corpo de formações ferríferas bandadas, sem evidências de alteração, foi mapeado por Alkmim (1996).

4. MODELO HIDROGEOLÓGICO CONCEITUAL.

Devido a não existência de regiões topograficamente mais elevadas nos arredores da área de estudo, a recarga natural do sistema de fluxo de água subterrânea em questão é feita exclusivamente pela infiltração de água das chuvas que se precipitam no

local (Lazarim e Loureiro, 1998 e 1999). A recarga no sistema proveniente da atividade antrópica existente no Bairro Jardim Canadá é desprezível quando comparada à recarga proveniente da precipitação pluvial, uma vez que a urbanização apresenta-se de forma incipiente.

Como proposto por Lazarim (1999) e Lazarim & Loureiro (1998, 1999), admite-se, para a região do Bairro Jardim Canadá e arredores, a existência de um único sistema de fluxo de água subterrânea, sendo o mesmo não confinado, num sentido amplo, e instalado nas diferentes unidades hidroestratigráficas descritas anteriormente, o que lhe dá um caráter heterogêneo. Portanto, de acordo com o modelo hidrogeológico conceitual do local, admite-se que, na área de estudo, exista um corpo aquífero único formado por unidades hidroestratigráficas conectadas hidráulicamente, tendo como limites laterais o aquífero coincidente com os filitos da Formação Batatal (limites norte e leste) e os divisores hidrográficos existentes a sul e oeste da área de estudo (Figura 3).

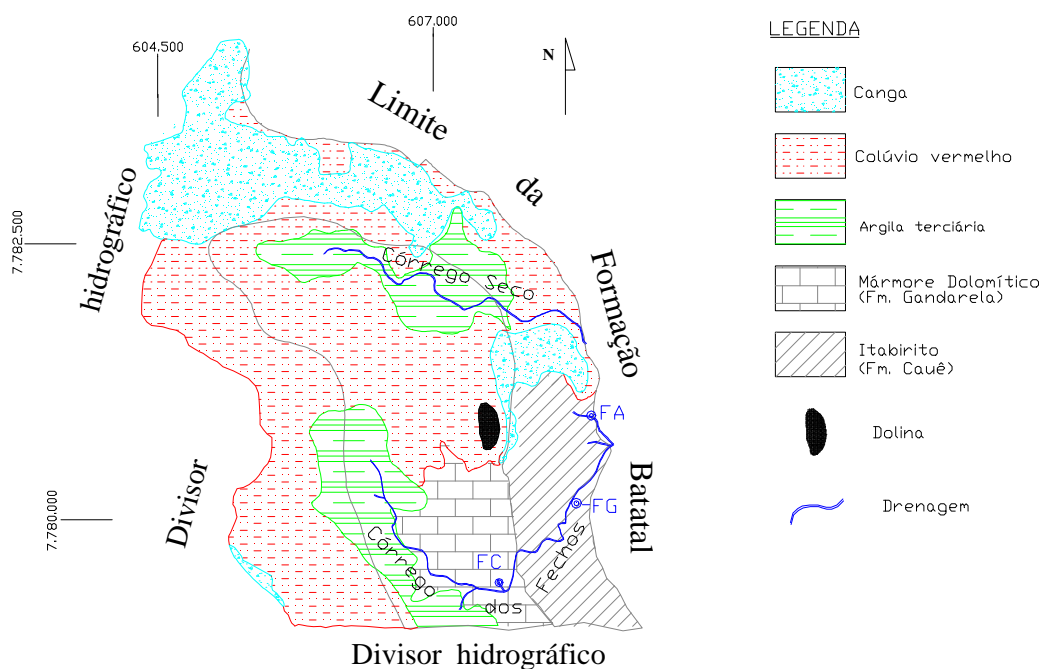


Figura 3 - Distribuição de litótipos na área de estudo. FC - Surgência Cárstica dos Fechos. FG - Surgência Fechos Galeria. FA - Surgência Fechos Auxiliar. Distâncias em coordenadas de projeção UTM.

5. MODELO HIDROGEOLÓGICO COMPUTACIONAL

O modelo hidrogeológico computacional, representativo do sistema de escoamento das águas subterrâneas do Bairro Jardim Canadá, foi desenvolvido com base no

respectivo modelo conceitual. Nestes termos, o modelo computacional foi concebido em uma configuração espacial tridimensional e num regime de escoamento estacionário relativo a uma estação chuvosa (águas altas). Utilizou-se, para isso, do pacote de simulação MODFLOW (McDonald & Harbaugh, 1988), através da versão Visual MODFLOW (Guiguer & Franz, 1998). A calibração dos resultados foi feita com os dados obtidos nos piezômetros e cisternas existentes na área, bem como através da comparação entre as vazões de descarga simuladas e as vazões medidas em diferentes surgências de água subterrânea .

CARACTERIZAÇÃO DAS CONDIÇÕES DE CONTORNO

Os limites geográficos externos da área de estudo, os quais delimitam os contornos do domínio de cálculo do modelo, são definidos com base na caracterização dos respectivos contornos físicos e topográficos. Desta forma os filitos da Formação Batatal constituem-se em barreiras físicas representadas por um brusco contraste de diminuição de permeabilidade, os quais formam os contornos norte e leste da área de estudo. Por outro lado, os divisores topográficos de águas nas porções sul e oeste da área, assim como nas bordas das bacias hidrográficas dos córregos Seco e dos Fechos, constituem-se em contornos hidráulicos do sistema, sendo admitido, por isto, um fluxo de água subterrânea igual a zero nestes divisores. A Figura 4 mostra, de forma esquemática e bidimensional, as condições de contorno do sistema de fluxo na área de estudo.

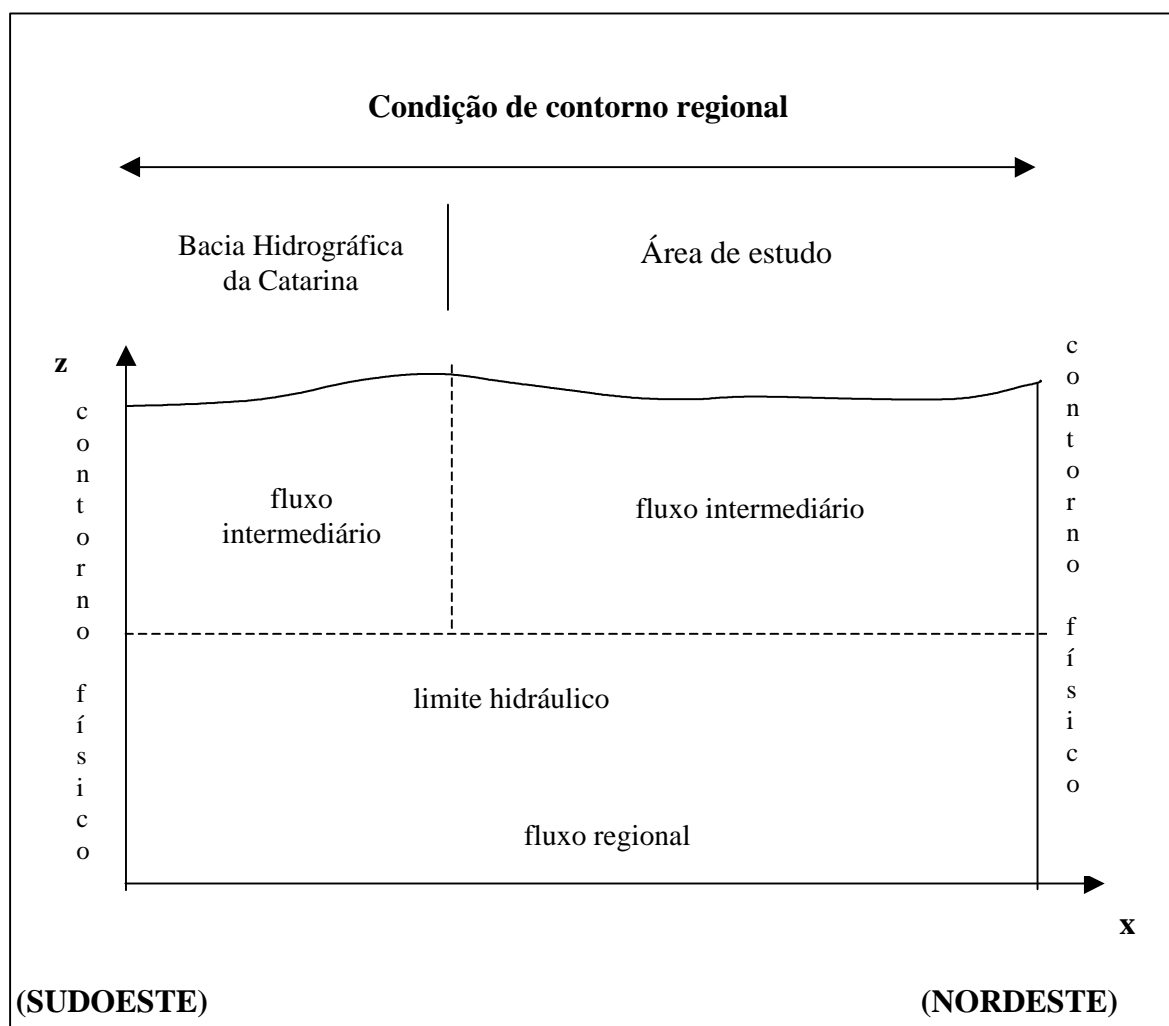


Figura 4 - Demonstração gráfica bidimensional, perpendicular ao fluxo, das condições de contorno na área de estudo inserida num contexto regional. O contorno lateral sudoeste da área de estudo é representado por um divisor de águas subterrâneas, o contorno lateral nordeste é coincidente com a condição de contorno regional representada por filitos da Formação Batatal, o contorno inferior da área de estudo é representado pela superfície que separa o fluxo local do regional e, por último, o contorno superior do sistema é representado pela superfície de topo de água subterrânea.

MALHA DE CÁLCULO

O modelo hidrogeológico computacional desenvolvido para o Bairro Jardim Canadá e arredores foi estruturado em uma malha de cálculo de 74 linhas, 75 colunas e 09 camadas horizontais representando assim um bloco tridimensional do sistema subsuperficial com 450 metros de espessura na direção vertical, 4800 metros de largura na direção horizontal “x” (oeste – leste) e 5200 metros na direção horizontal “y” (sul – norte). A distribuição areal de 4800 x 5200 metros está compreendida entre os seguintes intervalos de coordenadas (604.100 m - 608.900 m) UTM-E e (7.778.600 m - 7.783.800 m) UTM-N. As nove camadas, totalizando um pacote de 450 metros, possuem

espessuras homogêneas de 50 metros cada, distribuídas entre as cotas topográficas de 1525 metros e 1075 metros, e são numeradas de cima para baixo de 1 até 9, tendo como cota de referência o nível médio de cada camada. Assim, a camada 9 tem a sua espessura definida entre as cotas de 1125 e 1075 metros; porém o programa Visual MODFLOW a identifica com a cota de 1100 metros.

A malha horizontal foi estabelecida de modo a permitir a melhor individualização possível para as unidades hidroestratigráficas ao longo de toda a área modelada. A discretização do modelo foi estabelecida a partir de uma relação direta com os pontos de medidas de água subterrânea (cisternas, poços tubulares profundos, piezômetros e indicadores de nível d'água), de tal forma a não haver dois destes pontos na mesma célula. Isto é mais determinante horizontalmente. Porém, também na direção vertical, nos casos de piezômetros multicâmaras, as entradas d'água posicionam-se em células de camadas diferentes. No tocante à forma das células do modelo, optou-se por uma malha de células indeformadas, uma vez que as variações laterais das unidades hidroestratigráficas são mais representativas em relação às variações verticais.

CONDIÇÕES DE CONTORNO EM SEGMENTOS INTERNOS DO MODELO

Os córregos Seco e dos Fechos foram simulados como drenos neste modelo hidrogeológico computacional, admitindo-se assim que funcionam somente como saída de água do sistema subsuperficial. O Córrego Seco, localizado a norte da área de estudo e de caráter intermitente, escoar sobre argilas terciárias e, mais a jusante, sobre rochas itabiríticas da Formação Cauê. As perdas de carga existentes entre o sistema de água subterrânea e esta drenagem superficial (representadas em termos de condutância, $C = L^2/T$) variam ao longo de seu leito, de tal forma que no modelo foram utilizados os seguintes valores de condutância para o Córrego Seco: 1) $C = 200 \text{ m}^2/\text{dia}$ sobre as argilas terciárias; e, 2) $C = 1000 \text{ m}^2/\text{dia}$ sobre rochas itabiríticas. O leito do Córrego Seco está compreendido entre as cotas 1369 metros e 1269,50 metros.

O Córrego dos Fechos, também simulado como um dreno, localiza-se na porção sul da área modelada entre as cotas de 1348,5 metros e 1109,5 metros. Esta drenagem superficial escoar sobre argilas terciárias, dolomitos e rochas itabiríticas, bem como sobre a barreira de itabiritos duros. Desta forma, os valores de condutância (C) variam ao longo de seu traçado. Onde o Córrego dos Fechos atravessa os dolomitos e rochas itabiríticas, adota-se uma condutância de $1300 \text{ m}^2/\text{dia}$. Por sua vez, quando atravessa os domínios das argilas terciárias e da barreira de itabirito, a condutância adotada é de $200 \text{ m}^2/\text{dia}$.

Com base nos desníveis topográficos e tipologia dos materiais aflorantes foram definidas cinco áreas de recarga ao longo do domínio de interesse para o modelo. As áreas de recarga assim definidas são as seguintes: 1) partes de argilas terciárias; 2) porção de itabiritos duros; 3) partes elevadas de itabiritos intemperizados; 4) região do Altiplano Jardim Canadá; e, 5) depressão do Córrego dos Fechos. A Tabela 1 mostra os valores de recarga utilizados no modelo hidrogeológico computacional em cada uma destas áreas. Os valores finais de recarga, adotados no modelo hidrogeológico computacional, foram obtidos a partir dos processos de calibração.

Domínios de recarga	Fração da precipitação pluvial total, em %	Recarga (mm/ano)	Área recarga (m ²)
Partes de argilas Terciárias	*	0,10	2,35E+06
Barreira de itabiritos duros	**	0,001	0,62E+06
Partes elevadas de itabiritos	37%	788,51	3,58E+06
Altiplano Jardim Canadá	48%	1022,93	4,66E+06
Depressão do Córrego dos Fechos	40%	852,44	1,99E+06

* Obtida a partir da correspondência com a condutividade hidráulica vertical, K_z . ** Considerado como área de recarga desprezível.

Tabela 1 - Valores de recarga utilizadas no modelo (estimados com base na recarga total de 2.131,10 mm/ano) e da área aproximada de cada domínio.

PARÂMETROS HIDRÁULICOS

No modelo hidrogeológico computacional a discretização dos diferentes materiais foi obtida a partir de seções hidroestratigráficas horizontais, o que permitiu uma caracterização geométrica destes corpos. Com base nesta distribuição, foram atribuídos dez conjuntos de valores de condutividade hidráulica (K_x , K_y e K_z) correlacionáveis a nove fácies hidroestratigráficas e à barreira de itabiritos duros. A fácies hidroestratigráfica de ocre foi considerada como um domínio de células inativas no modelo hidrogeológico computacional, bem como os filitos da Formação Batatal.

A obtenção dos valores iniciais dos parâmetros hidráulicos utilizados neste modelo teve por base as referências bibliográficas de estudos anteriores desenvolvidos na região da área de estudo e no Quadrilátero Ferrífero, bem como os apresentados por outros autores. O resultado final apresentado é proveniente dos processos de calibração do modelo. A Tabela 2 mostra os valores de condutividade hidráulica utilizados neste estudo, em comparação com materiais similares e com valores utilizados por Rubio (1996) no modelo hidrogeológico computacional do Projeto Capão Xavier (CPX). A coluna “faixa de variação” da Tabela 2 representa o intervalo de valores experimentados nos processos de

calibração.

Unidades H.Est.	Fácies	Material similar	Faixa de variação (m/dia)	Rubio (1996) Modelo CPX (m/dia)		Referência (*)	Modelo deste estudo (m/dia)	
				Kxy	Kz		Kxy	Kz
UH1	Filitos	Filitos sem fraturas	1,0E-08	células inativas	células inativas	(a)	células inativas	células inativas
UH2	Itabiritos alterados	Itabiritos em geral da Serra da Moeda	9,0E-02 a 1,0E00	9,0E-2 a 1,0E00	9,0E-2 a 1,0E00	(a)	9,0E-01	5,0E-01
	Hematitas	Hematitas da Mina de Águas Claras	3,0E-01 a 3,0E00 p/ Kxy	3,0E-01	1,0E-01	(b)	1,55E00	7,5E-01
	Itabiritos finos	Silte, loess	8,0E-04 a 3,0E00	-----	-----	(c)	9,0E-03	9,0E-03
UH3	Dolomitos fraturados	Rochas carbonáticas fraturadas	2,0E-04 a 1,0E00	9,0E-03 a 8,0E-01	9,0E-03 a 2,0E-02	(c)	1,2E-01	1,2E-02
	Cárstica	Rochas carbonáticas caverníferas	1,0E00 a 5,0E03	5,0E00	5,0E00	(c)	2,55E00	2,55E00
UH4	Depósitos de canga	Rolados de hematita	-----	3,0E-01	3,0E-01	(a)	2,5E-01	2,5E-01
	Argilas terciárias	Argilas	5,0E-08 a 4,0E-04	-----	-----	(c)	5,0E-05	5,0E-06
	Colúvio vermelho	Silte, loess	8,0E-04 a 3,0E00	1,0E-01 a 8,0E-01	1,0E-03 a 1,0E-02	(c)	9,0E-02	1,0E-02
	Rolados de hematita	Areia siltosa	7,0E-02 a 1,0E01	3,0E-01	3,0E-01	(c)	3,5E-01	3,5E-01
Barreira	Barreira de Itabiritos duros	Rochas metamórficas pouco ou nada fraturadas	1,0E-08 a 2,0E-04	Células inativas	células inativas	(c)	8,0E-06	8,0E-06

(*) a) Rubio (1996); b) Bertachini (1994); (c) Anderson & Woessner (1992)

Tabela 2 - Valores de condutividade hidráulica adotados no modelo hidrogeológico computacional, comparados com valores obtidos em referências bibliográficas. A coluna “material similar” representa os materiais de referência comparáveis com os encontrados na área de estudo em termos granulométricos.

MEDIDAS DE CAMPO

As cargas hidráulicas representativas do aquífero do Bairro Jardim Canadá foram obtidas a partir dos pontos de água subterrânea cadastrados neste estudo e dos que são monitorados pela empresa MBR - Minerações Brasileiras Reunidas S.A. No total, foram utilizados 62 pontos de medidas, dos quais 25 pontos são cisternas, 15 são piezômetros

de uma câmara e 22 são pontos em piezômetros multicâmaras. Nestes, cada câmara foi considerada como um ponto específico de medida do respectivo valor do potencial hidráulico. A distribuição areal dos pontos de medida é mostrada na Figura 5.

As medidas de fluxo utilizadas na calibração deste modelo referem-se àquelas que foram obtidas junto às surgências de águas subterrâneas e, principalmente, às vazões obtidas no Córrego dos Fechos, junto ao vertedouro existente nesta drenagem e apresentadas em Rubio (1998). Desta forma, os valores de vazões da Surgência Cárstica dos Fechos, da Surgência Fechos Auxiliar, da Surgência Fechos Galeria e do vertedouro do Córrego dos Fechos foram comparados com os obtidos no modelo hidrogeológico computacional.

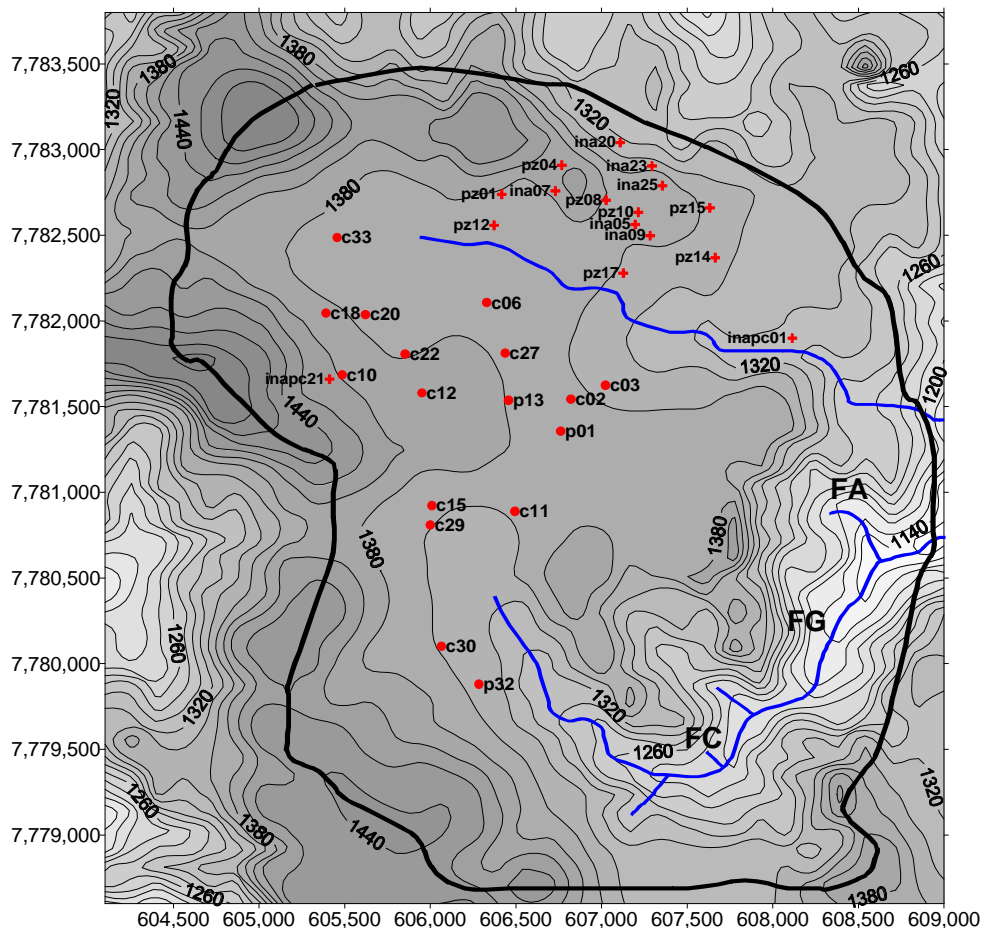


Figura 5 – Mapa de pontos de água subterrânea utilizados na elaboração e calibração do modelo hidrogeológico deste estudo e, segundo projeção de coordenadas UTM. No mapa “p” poço tubular profundo, “c” cisterna, “ina”, “inapc” e “pz” são piezômetros. FC – Surgência Cárstica dos Fechos, FG – Surgência Fechos Galeria e FA – Surgência Fechos Auxiliar.

CALIBRAÇÃO DO MODELO

O modelo hidrogeológico computacional do extremo norte do Sinclinal da Moeda, Bairro Jardim Canadá e arredores, foi calibrado por “tentativas e erros”, através de centenas de simulações estacionárias (cerca de 400) até a obtenção, em termos quantitativos, de um valor mínimo do erro absoluto médio entre cargas hidráulicas medidas e as cargas hidráulicas simuladas. No que diz respeito ao fluxo de água subterrânea, o modelo foi considerado calibrado quando a vazão simulada no Córrego dos Fechos coincidiu com as vazões medidas no vertedouro existente neste córrego.

As cargas hidráulicas apresentaram valores de calibração como mostrados na representação gráfica da Figura 6, para cargas medidas e cargas simuladas. Neste contexto, o termo MAE ("Mean Absolute Error"), ou erro absoluto médio, representa a média das diferenças absolutas entre valores de cargas medidas (h_m) e cargas simuladas (h_s), sendo dado por:

$$MAE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |(h_m - h_s)|$$

onde n é o número de pontos de medida. Assim, após a calibração final do modelo, como pode ser visto na Figura 6, os valores previstos para a carga hidráulica se aproximaram relativamente bem dos valores medidos em campo, com um erro absoluto médio (MAE) de 7,58 metros o que, dada a complexidade do sistema hidrogeológico em questão, representa uma calibração adequada.

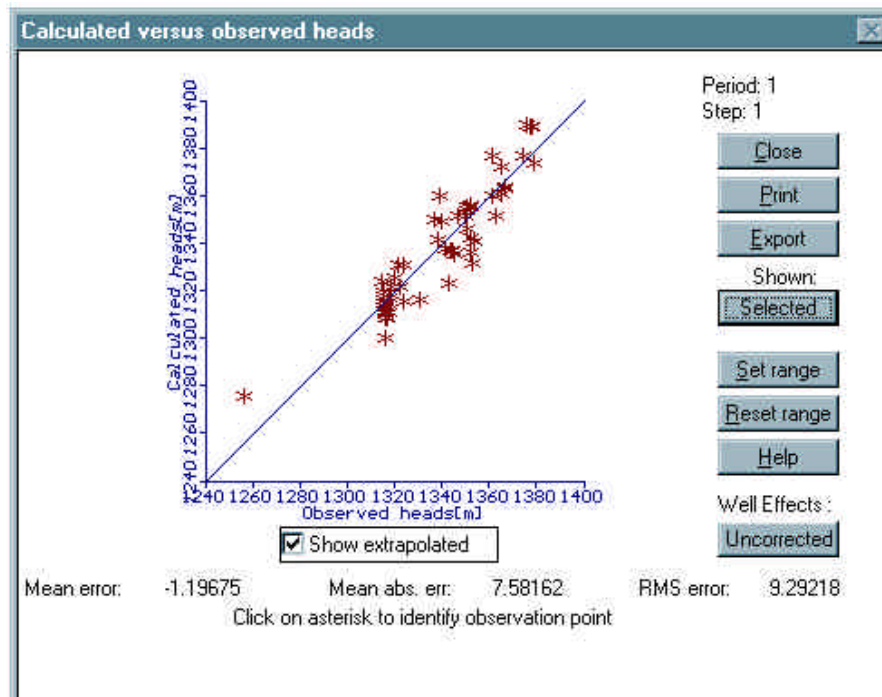


Figura 6 – Fase final de calibração do modelo; gráfico comparativo entre os valores das cargas hidráulicas simuladas pelo modelo e as cargas hidráulicas medidas em campo (valores dados em metros).

Com relação ao fluxo de água subterrânea, a calibração comparou as vazões medidas no vertedouro do Córrego dos Fechos, com as vazões simuladas neste mesmo setor do Córrego. O modelo hidrogeológico computacional apresentou uma vazão de 15.833,00 m³/dia na região do vertedouro, o que corresponde a uma lâmina d'água de aproximadamente 0,54 m no Córrego dos Fechos, segundo Rubio (1998). Esta medida foi comparada com a medida de 12/01/98 de 0,56 m (correspondente a 16.870,00 m³/dia) de lâmina d'água neste córrego. Por isso considerou-se aqui uma calibração satisfatória neste ponto de medida de fluxo. A surgência Fechos Galeria teve uma vazão simulada de 496,93 m³/dia contra 1238,00 m³/dia medidos em campo, e a surgência Fechos Auxiliar mostrou uma vazão simulada de 3084,70 m³/dia contra 3780 m³/dia medidos. O cenário de escoamento das águas subterrâneas, previsto pelo modelo hidrogeológico computacional, nas condições finais de calibração do modelo, é apresentado na Figura 7.

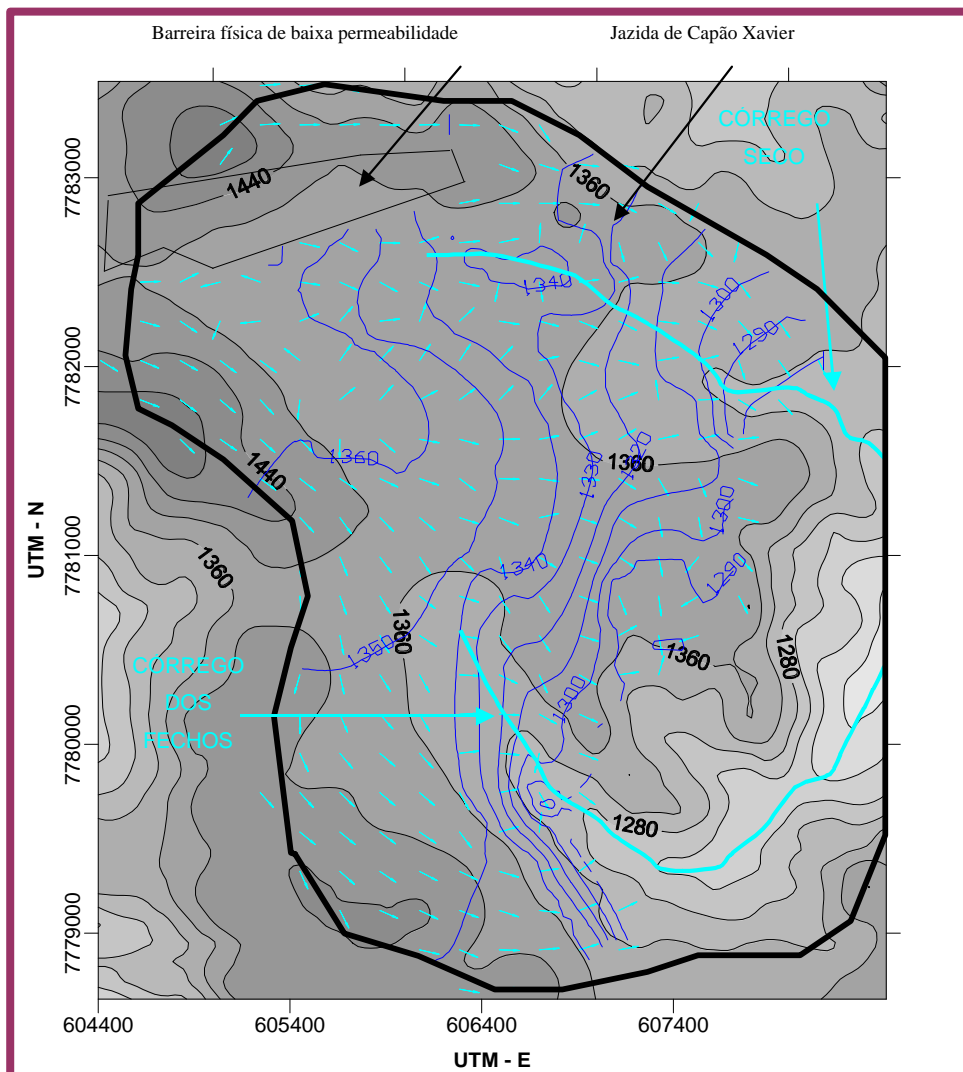


Figura 7 – Cenário hidrogeológico simulado, mostrando a distribuição potenciométrica no aquífero local, nas condições finais de calibração do modelo hidrogeológico computacional. Os números intercalados nas linhas isopotenciométricas (linhas em azul) indicam os valores dos níveis d’água correspondentes, em metros, e as setas, em azul, indicam o sentido resultante de escoamento do aquífero em todo o domínio de interesse. Localização em coordenadas de projeção UTM.

AVALIAÇÃO DOS RESULTADOS DA CALIBRAÇÃO

Os pontos de medidas mais discrepantes em relação às cargas medidas menos cargas simuladas foram os indicadores de nível d’água INAPC01/93, INAPC21/93, INA07/91 e PZ08B/91, definindo assim áreas com níveis de calibração mais baixos. Nestes casos, as variações entre cargas hidráulicas medidas e simuladas podem ser atribuídas a:

- 1) imprecisões na discretização das porções hidroestratigráficas existentes no sistema, ou seja, a geometria de cada corpo material e sua provável distribuição

espacial foram inferidas a partir de dados de campo e dados fornecidos pela empresa MBR, junto a Jazida de Capão Xavier. Uma vez que as heterogeneidades presentes são excessivas, a distribuição de materiais utilizadas no modelo apenas reflete uma proximidade com a realidade;

- 2) imprecisões no estabelecimento das condições de contorno do sistema de fluxo, isto é, por se tratar de uma região com desníveis topográficos acentuados, onde os altos de morros são coincidentes com a presença de litótipos da Fm Cauê, contendo porosidade intersticial secundária, os divisores de águas subterrâneas não necessariamente coincidem com divisores de águas topográficos, podendo os mesmos serem parcialmente deslocados entre si, no entanto este deslocamento ainda obedece as feições topográficas existentes; e,
- 3) imprecisões nas medidas de campo relativas aos valores de cargas hidráulicas e das vazões encontradas nas surgências de águas subterrâneas, principalmente na Surgência Cárstica dos Fechos.

As vazões medidas, em geral, foram algo mais elevadas do que as vazões simuladas, porém a maior vazão de comparação, no vertedouro do Córrego dos Fechos, apresentou uma diferença de 1000 m³/dia entre as cargas medidas e cargas simuladas. Isto representa uma diferença menor do que 8% do fluxo total medido neste vertedouro em 12/01/98.

A interpretação do modelo parte do princípio de que o modelo hidrogeológico computacional aqui apresentado reflete, de forma satisfatória, a realidade do sistema de fluxo estudado, sendo possível, com isto, a verificação do modelo conceitual e o estabelecimento de certos fenômenos hidrogeológicos, os quais, conceitualmente, foram impossíveis de determinação.

6. CONCLUSÕES

Apresentou-se neste trabalho um detalhamento sobre a metodologia empregada na concepção, desenvolvimento e calibração do modelo hidrogeológico computacional representativo do aquífero do bairro Jardim Canadá, em Nova Lima, Minas Gerais. O modelo hidrogeológico computacional do Bairro Jardim Canadá e arredores foi elaborado em uma configuração tridimensional, sob um regime de escoamento estacionário, possibilitando, assim, a verificação do respectivo modelo hidrogeológico conceitual

proposto anteriormente.

O modelo foi considerado calibrado quando mostrou um erro absoluto médio de 7,58 metros entre as cargas hidráulicas medidas e simuladas. Em termos de fluxo de água subterrânea a calibração foi atingida quando a vazão medida no vertedouro do Córrego dos Fechos aproximou-se da vazão simulada neste mesmo ponto de medida, com uma diferença menor do que 8%. A simulação foi feita em regime estacionário, representando um período de águas altas do sistema, o que permitiu uma avaliação hidrogeológica do Córrego Seco, de caráter intermitente.

A modelação matemática forneceu elementos que permitiram uma melhor compreensão da hidrogeologia do local, são eles:

- 1) a representação do tridimensionalismo do fluxo de água subterrânea na área de estudo, em meio à excessiva heterogeneidade existente;
- 2) a representação das influências topográficas internas ao sistema, ou seja, uma distinção entre as duas bacias hidrográficas existentes, definindo assim fluxos locais no interior do setor modelado;
- 3) o esclarecimento acerca da origem das águas subterrâneas na surgências existentes, principalmente na questão das águas de origem dolomítica na Surgência Fechos Galeria, instalada nos domínios da Formação Cauê. Neste caso o modelo verificou que as águas atravessam a unidade UH3 (coincidente com a Formação Gandarela) antes de sair do sistema de água subterrânea em UH2.

7. BIBLIOGRAFIA

- ALKMIM, F. F. - 1996 - Geologia e arcabouço estrutural da porção norte do Platô da Moeda, sudoeste de Belo Horizonte, MG. *Convênio MBR/COPASA*. DEGEO, EM, UFOP. Relatório Interno. 23pp.
- ANDERSON, M. A.; WOESSNER, W. W. – 1992 – Applied groundwater modeling: simulation of flow and advective transport. *Academic Press, Inc.* - California (USA). 381 pp.
- BERTACHINI, A. C. – 1994 – Hidrogeologia e desaguamento da Mina de Águas Claras. *Anais do 8º Congresso Brasileiro de Águas Subterrâneas* - ABAS. Recife - PE. pp. 274-283.
- CHEMALE, JR. F., ROSIÈRE, C. A., ENDO, I. - 1991 - Evolução tectônica do Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais, um modelo. *Pesquisas*. v. 18, n. 2, pp. 104 - 127.
- GUIGUER, N. e FRANZ, T. – 1998. User's Manual – VisualMODFLOW. *Waterloo*

Hydrogeologic, Inc., Waterloo, Ontario, Canada, 231 pp.

- LAZARIM, H. A.; LOUREIRO, C. O. – 1998 – Caracterização preliminar do Aquífero Jardim Canadá. *X Congresso Nacional de Águas Subterrâneas*. ABAS – Associação Brasileira de Águas Subterrâneas. São Paulo, SP. Setembro de 1998.
- LAZARIM, H. A. – 1999 - *Caracterização hidrogeológica no extremo norte do Sinclinal da Moeda, Quadrilátero Ferrífero, Nova Lima, MG. – Proposta de Modelo*". Dissertação de Mestrado; Curso de Mestrado em Geologia Econômica e Aplicada; Instituto de Geociências da UFMG; Belo Horizonte, MG. Junho de 1999.
- LAZARIM, H. A.; LOUREIRO, C. O. – 1999 – Rebaixamento das Águas Subterrâneas na Região em Torno da Jazida de Capão Xavier em Nova Lima, MG – Cenário Futuro. *II Conferência Latino Americana sobre Meio Ambiente – EcoLatina'99*, Encontro Técnico Sobre Meio Ambiente e Mineração. Belo Horizonte, MG. Outubro de 1999.
- McDONALD, M. G.; HARBAUGH, A. W. – 1988 – A modular three-dimensional finite-difference ground water flow model. *Techniques of water-resources investigations* 06-A1. USGS, 576p.
- RUBIO, R. F. - 1996 - COPASA/MBR Projeto Capão Xavier - Estudio Hidrológico Ambiental – Modelización hidrogeológica. *FRASA - Ingenieros Consultores, S.L.* Relatório Interno. 52 pp.
- RUBIO, R. F. - 1998 - COPASA/MBR Projeto Capão Xavier - Estudio Hidrológico Ambiental. *FRASA - Ingenieros Consultores, S.L.* Relatório Interno.
- SILVA, A. B.; SOBREIRO NETO, A. F.; BERTACHINI, A. C. – 1994 - Avaliação da utilização de modelos numéricos de simulação em meio aquífero fraturado. *Anais do 8º Congresso Brasileiro de Águas Subterrâneas - ABAS*. Recife - PE. pp. 298-307.