



## MODELAGEM NUMÉRICA DE FLUXO DE UM AQUÍFERO CÁRSTICO-FISSURAL

### NUMERICAL FLOW MODELING OF A FISSURED-KARSTIC AQUIFER

Rodrigo Sérgio de Paula<sup>1</sup>, Leila Nunes Menegasse Velásquez<sup>2</sup>

Artigo recebido em: 11/06/2012 e aceito para publicação em: 15/07/2013.

**Abstract:** The study was conducted in Boi Morto creek, city of São Francisco, Minas Gerais, Brazil, in which all rural communities are exclusively supplied by groundwater. The goal of work was to define a flow numerical model from hydrological data previously monitored in the field in order to contribute to the water resources planning. The model was made using Visual Modflow 2009.1 software, steady, by finite difference method, the units represented pelitic-carbonate (Subgroup Paraopeba) as a system as equivalent porous. The input data were calculated from hydrological monitoring data in the basin: i) hydraulic conductivities according to the directions and features of fractures and ducts; ii) rainfall; iii) runoff; iv) hydraulic head of deep wells and v) recharge. The results showed good consistency with the measured and calculated values and mean absolute error <10%, evaluated as satisfactory considering the strong site anisotropy inherent to this type of aquifer. The study reinforced the possibility of obtaining good results in modeling fissure karst site predominantly controlled by fractures.

**Keywords:** : Neoproterozoic limestones. Recharge. Bambuí Group. São Francisco basin.

**Resumo:** O estudo foi conduzido na bacia do riacho do Boi Morto, município de São Francisco/MG, na qual todas as comunidades rurais são abastecidas exclusivamente por água subterrânea. O objetivo do trabalho foi a definição de um modelo numérico de fluxo a partir de dados hidrológicos previamente monitorados em campo, de modo a contribuir para o planejamento dos recursos hídricos locais. O modelo foi realizado em regime permanente, utilizando-se o software Visual Modflow 2009.1, pelo método de diferenças finitas, considerando representado as unidades pelito-carbonáticas (Subgrupo Paraopeba) como um sistema como poroso equivalente. Os dados de entrada foram os calculados a partir do monitoramento hidrológico da bacia e levantamento de campo, quais foram: i) condutividades hidráulicas de acordo com as direções/características das fraturas/condutores; ii) pluviometria; iii) deflúvio superficial; iv) carga hidráulica dos poços profundos e v) recarga. Os resultados do modelo mostraram ótima coerência com os valores medidos/calculados e erro médio absoluto < 10%, avaliado como satisfatório considerada a forte anisotropia local inerente a esse tipo de aquífero. O estudo reforçou a possibilidade de se obter bons resultados de modelagem em meios cárstico-fissurais predominantemente controlados por fraturas.

**Palavras-chave:** Calcários neoproterozóicos. Recarga. Grupo Bambuí. Bacia do rio São Francisco.

## INTRODUÇÃO

Um modelo numérico do fluxo de água subterrânea permite representar as condições hidrogeológicas, em um intervalo de tempo definido, para simular qual será a resposta do aquífero diante diversas intervenções que podem incidir nele, a partir da análise matemática de propriedades hidrogeológicas, sob uma determinada condição inicial.

Segundo White (2007) apud Cota (2011) a elaboração de modelos numéricos de fluxo em aquíferos cársticos apresenta um his-

tórico de 40 anos. O sistema cárstico possui tripla permeabilidade, consideradas a matriz, as fraturas e os dutos. Uma das abordagens proposta por White é a realização de um modelo de meio poroso equivalente em escala grande o suficiente para que a heterogeneidade do sistema seja representada por valores médios de condutividade hidráulica. Utilizando esse conceito e a mesma abordagem Scanlon et al. (2003) utilizaram o MODFLOW para representação do aquífero regional cárstico denominado

<sup>1</sup> rodrigo.spdm@yahoo.com.br

<sup>2</sup> Professora do instituto de geociências da universidade federal de minas gerais. IGC/UFMG (menegasse@yahoo.com.br).

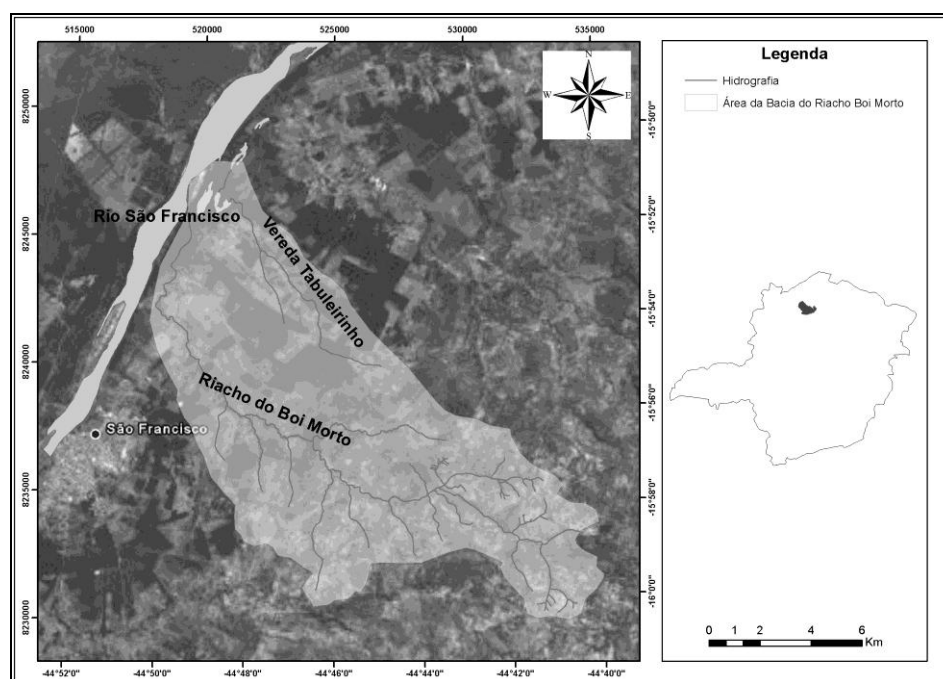
Edwards (330 km<sup>2</sup>), no Texas/EUA, e Quinn et al. (2006) para uma área de 150 km<sup>2</sup>.

Com base no conceito de meio poroso equivalente, foi realizado nesse trabalho o modelo de fluxo em regime permanente em um sistema aquífero cárstico-fissural com cerca de 150 km<sup>2</sup>, utilizando o software Visual MODFLOW versão 2009.1. A localidade é a bacia do riacho Boi Morto (Figura 1), afluente direto pela margem direita do rio São Francisco no município homônimo.

No que tange ao aspecto quantitativo da

água, esse trabalho visou contribuir para um melhor entendimento da dinâmica hídrica subterrânea, de modo a gerar e disponibilizar dados para serem empregados nos programas de gerenciamento dos recursos hídricos da região.

Especificamente, o objetivo do trabalho foi a elaboração de um modelo numérico de fluxo do sistema aquífero cárstico-fissural em regime permanente, a partir da caracterização da anisotropia do carste e da caracterização hidrológica superficial e subterrânea da bacia.



**Figura 1** – Mapa de localização da bacia do riacho Boi Morto (Base digital do Google Earth)

**Figure 1** – Localization map of Boi Morto creek basin (Digital base of Google Earth)

## CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA

Regionalmente a área de estudo está localizada na bacia intracratônica do São Francisco, a qual é coberta por sedimentos proterozóicos a fanerozóicos (CHANG et al., 1988, apud ALKMIM e MARTINS-NETO, 2001), constituídos dos Supergrupos Espinhaço (Paleo/Mesoproterozóico) e São Francisco (Neoproterozóico), e dos Grupos Santa Fé (Permo-Carbonífero), Areado, Mata da Corda e Urucuia (Cretácicos).

Na área de estudo afloram as unidades neoproterozóicas pelito-carbonáticas do Grupo Bambuí, sobrepostas pelas rochas siliclásticas do Grupo Urucuia e pelas coberturas cenozóicas (Figura 2). Para Alkimim e Martins Neto (2001) o Grupo Bambuí é constituído, da base para o topo, das Formações Sete Lagoas, Serra de Santa Helena, Lagoa do Jacaré e Serra da Saudade; entretanto, tais unidades estão agrupadas como

Subgrupo Paraopeba (BRAUN, 1968) na área. Isso porque uma forte característica em todas as unidades do Grupo Bambuí, e em especial na área de estudos, são as frequentes intercalações dos termos químicos e metapelíticos, dificultando e até mesmo impossibilitando se identificar os limites entre as formações. Por isso foram definidas no estudo três unidades litológicas, ou hidroestratigráficas, representantes de sequências com predomínio de uma ou outra litologia, sem, contudo, relacioná-las aos termos estratigráficos formais existentes.

A Formação Sete Lagoas é constituída por margas, calcilutitos, calcarenitos, biolutitos e calcissiltitos cinza escuros de água rasa portadores de estromatólito. A Formação Serra de Santa Helena constitui-se de folhelhos e ardósias. A Formação Lagoa do Jacaré, por calcarenitos oolíticos e oncolíticos e pelitos. E a For-

mação Serra da Saudade por pelitos. O Grupo Urucuaia é constituído por uma sequência de arenitos eólicos que passam a aluviais no topo.

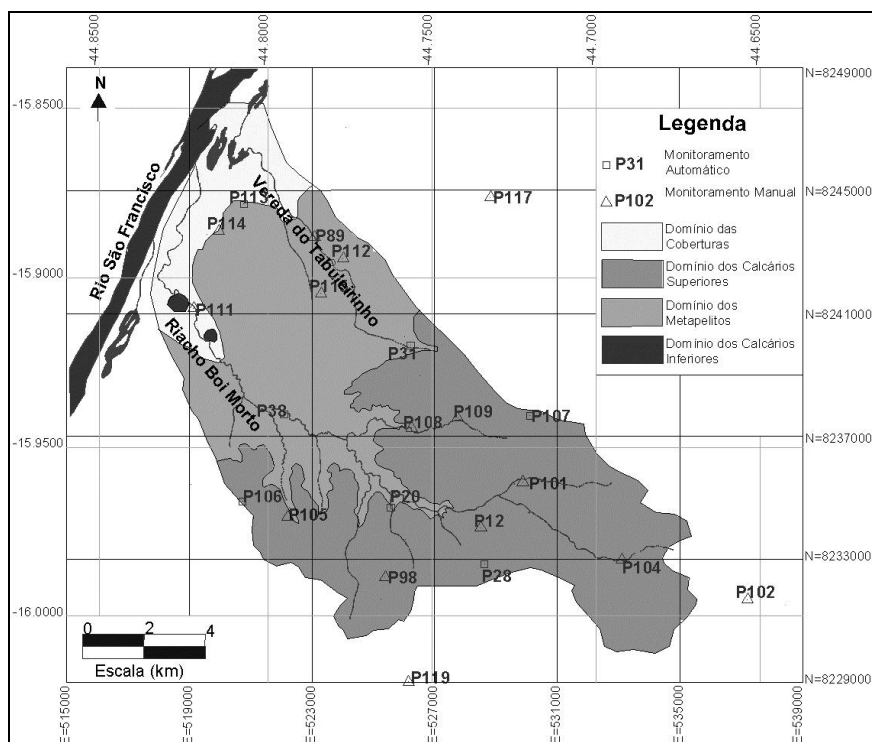
Embora as unidades identificadas na área apresentem indícios de correlação estratigráfica com estas formações, não houve, neste estudo, uma preocupação com a estratigrafia formal, já que não é objeto do trabalho. Por isso as unidades geológicas serão identificadas informalmente.

A posição da área na porção central no cráton do São Francisco favoreceu a um empacotamento de rochas sub-horizontais, baixo grau metamórfico e fraca deformação dúctil. Entretanto, é observado intenso fraturamento, o

qual condiciona as direções de dissolução cárstica e de fluxo.

Predomina um relevo ondulado, com feições, de absorção cárstica (sumidouros), de circulação (cavernas de pequeno porte e dutos) e surgências.

Hidrogeologicamente identificam-se duas unidades aquíferas cárstico-fissurais pertencentes às rochas do Grupo Bambuí, separadas por um aquífero metapelítico. Arenitos Urucuaia e pelitos “correlacionáveis” à Formação Serra da Saudade expõem-se incipientemente a montante (Figura 2), aqui definidos como unidades não saturadas.



**Figura 2** – Mapa geológico da Bacia do Riacho Boi Morto (Modificado de MOURA & SOUZA, 2010)  
**Figure 2** – Geological map of Boi Morto creek basin (Modified of MOURA & SOUZA, 2010)

O Aquífero dos Calcários Inferiores é formado por alternância de calcilito e calcarenito fino encontrado abaixo do nível de base do rio São Francisco, estendendo-se por mais de 120 m abaixo deste nível. O aquífero é confinado e coberto, ora pelo aluvião, ora pelo metapelito. A recarga se dá de forma indireta, seja através dos aluviões alimentados pelo transbordamento do rio São Francisco, seja através do aquífero metapelítico sobreposto.

O Aquífero dos Metapelitos, com espessura mínima de 60m, possui intercalações de rochas carbonáticas, porém de ocorrência secundária. As fraturas fechadas dos metapelitos proporcionam uma baixa porosidade secundária,

resultando em baixa vazão (menos de 2m<sup>3</sup>/h) nos poucos poços dessa unidade.

O Aquífero dos Calcários Superiores é constituído de um pacote de calcarenitos com lentes de metapelitos que totalizam 60m de espessura. De uma maneira geral possui comportamento de fluxo livre, mas em algumas regiões este aquífero se encontra localmente confinado. Alimenta-se diretamente através das fraturas expostas dissolvidas e sumidouros e, indiretamente, pelas coberturas coluvionares. Na classificação de White (2012) pode ser considerado suspenso e aberto por encontrar-se acima do nível de base regional e sobreposto a uma camada impermeável.

Os Aquíferos de Cobertura são representados pelos sedimentos cenozóicos inconsolidados constituídos por depósitos aluvionares e coluvionares, presentes, sobretudo, na planície de inundação do rio São Francisco. Em função de sua pouca espessura (10m), alta permeabilidade, e baixo potencial hídrico, neste estudo, apenas sua importância para a recarga do Aquífero dos Calcários Inferiores será considerada.

Pelo fato da topografia se atenuar para oeste no sentido do rio São Francisco, é presumível ser esse o sentido do fluxo de todo o sistema aquífero, ou seja, a bacia drena diretamente para o nível de base regional.

O riacho do Boi Morto é intermitente a montante e perene a jusante, a partir do domínio dos metapelitos, até onde desemboca no rio São Francisco, o que se deve à contribuição sazonal do aquífero carbonático superior.

O clima regional é do tipo sub-úmido, com precipitação média de 1134,1mm evapotranspiração potencial de 1151mm, excedente hídrico de 298,9mm (dez/mar) e déficit hídrico de 316mm (abr/out), conforme dados verificados em Alkmim e Martins-Neto (2001).

## ESTUDOS ANTERIORES

Os poços profundos são o principal meio de extração da água subterrânea, com vazão média de 21m<sup>3</sup>/h, profundidade média de 93m e nível estático médio de 13 m, de acordo com os estudos anteriores, os quais demonstram a importância da água subterrânea para a região:

Castro e Freire (2002), e Velásquez et al. (2003) realizaram estudos geológicos, hidrogeológicos, hidrogeoquímicos e epidemiológicos na região desse estudo em escala 1:100.000. Os trabalhos tiveram como ênfase a origem do flúor na água subterrânea e sua relação com a endemia de fluorose dental em comunidades rurais do município de São Francisco, sendo duas dessas comunidades (Vaqueta e Brejo dos Angicos) pertencentes à bacia do riacho do Boi Morto. Os autores identificaram ocorrência de fluorita sub-centimétrica em veios calcíticos dos calcários, e de fluoreto excessivo (>1,5mg/L) nas águas ingeridas pelas comunidades endêmicas, comprovando, assim, essa relação.

Velásquez et al. (2007), aprofundaram os estudos na região fazendo avaliações isotópicas e ampliações nos estudos epidemiológicos.

Moura e Souza (2010), realizaram o mapeamento geológico, hidrogeológico e hidrogeoquímico de semi-detalle da bacia do Boi Morto, na escala 1:60.000.

## MATERIAL E MÉTODOS

A anisotropia dos aquíferos foi avaliada por meio da caracterização dos sistemas de fraturas e das feições de dissolução cárstica. A área da bacia foi dividida em 164 células de 1km<sup>2</sup>, sendo que em cada célula foi escolhido um afloramento de calcário para as medições nas rochas carbonáticas. Em cada afloramento selecionado delimitou-se uma área de aproximadamente 9m<sup>2</sup>, onde foram identificadas as famílias de fraturas e realizadas as medidas de orientação, frequência, espaçamento e abertura de cada fratura nos calcários, superando 750 medidas. Nas feições de condutos cársticos mediu-se a sua direção.

Devido à presença e importância de fraturas sub-horizontais, isto é, paralelas a S0, as mesmas foram caracterizadas ao longo de uma espessura padrão de 3m no maciço aflorante. As direções de fraturas levantadas foram usadas para analisar a anisotropia do sistema aquífero, mas no processo de modelagem numérica, elas foram consideradas como pertencentes a aquíferos porosos equivalentes.

Foi avaliado o comportamento dos aquíferos cárstico-fissurais quanto ao armazenamento e interconexão hidráulica das discontinuidades, a partir das séries temporais do nível d'água, visando detectar variações espaciais dessas propriedades para maior segurança na entrada de dados durante a modelagem. Tal avaliação requer uma medida de dependência estatística, podendo ser feita com funções de autocorrelação e correlação cruzada de séries temporais como descrito por Marques et al. (2011) de nível de água dos poços e precipitação. Segundo o autor (op. Cit.) a análise de séries temporais é uma aproximação sistemática para investigar a correlação do tempo em dados experimentais. A função de autocorrelação mede a relação linear ou a dependência entre uma série de dados de nível d'água e seus valores de defasagem temporal. Ferrari e Karmann (2008) descrevem que, para um sistema cárstico, o tempo necessário para perda de memória das condições iniciais está entre 0,1 e 0,2 em função  $r(k)$ . Se estes valores forem encontrados em intervalos de tempo curtos, indicam um sistema cárstico ativo e bem desenvolvido, com pequeno armazenamento. A função de correlação cruzada mede a relação entre duas séries, nível de água e precipitação em questão, e a possível relação causal.

Para a avaliação da potenciometria da água subterrânea foram instalados transdutores de pressão automáticos em quatro poços pro-

fundos inativos e em três poços em operação (Tabela 1). Adicionalmente procedeu-se ao monitoramento manual dos poços desprovidos dos transdutores, de modo a aferir os dados automáticos e ampliar a rede monitorada, que ocorreu durante pelo menos um ano hidrológico.

Os dados de leituras automatizadas das profundidades de descida e recuperação do nível de água nos poços em operação foram em-

pregados para o cálculo da permeabilidade por meio do programa Aquifer Test 3.5 e calculado pela Lei de Snow.

Para a caracterização hidrológica, foram instalados um pluviógrafo a montante da bacia e um transdutor de pressão em uma seção fluvial a jusante do riacho Boi Morto para, indiretamente, se obter a vazão do riacho, recarga e descarga da bacia (Tabela 1).

**Tabela 1** – Coeficientes de correlação, correlação cruzada e tempo de resposta

**Table 1** – Correlation coefficient, cross correlation and answer time

Ponto	Coordenadas UTM			Geográficas		Coeficiente		Tempo (dias)	
	X	Y	Z	Longitude	Latitude	auto correlação	correlação cruzada	(k)	rxy(k)
P107	530101	8237668	581	44°48'46"	15°56'25"	0,18	0,23	28	0
P106	520734	8234883	530	44°48'24"	15°57'56"	0,18	0,15	7	7
P28	528621	8232846	519	44°43'59"	15°59'02"	0,17	0,24	10	21
P20	525568	8234693	513	44°45'22"	15°58'02"	0,14	0,56	3	0
P38	522087	8237739	501	44°47'39"	15°56'23"	0,18	0,29	26	0
P31	526140	8239995	501	44°45'23"	15°55'09"	0,17	0,02	26	27
P113	520775	8244578	453	44°48'23"	15°52'40"	0,15	0,26	22	13

Com base na caracterização geológica e hidrológica foi desenvolvido um modelo conceitual para a bacia, definindo seus limites, redes de drenagem, linhas e condições de fluxos de água subterrânea e principais zonas de recarga e descarga. Dentre as unidades hidroestratigráficas, identificaram-se aquíferos e aquífero.

No modelamento numérico do fluxo de água subterrânea, foi adotado o MODFLOW (MCDONALD e HARDAUGH, 2009), que utiliza o método das diferenças finitas. O programa utilizado foi o Visual Modflow, versão 2009.1, desenvolvido por Guiguer e Franz da Waterloo Hydrogeologic Inc.

A simulação do fluxo de água foi realizada em regime permanente, isto é, sob as condições do aquífero em seu estado de equilíbrio, buscando definir, através da retroanálise, valores de recarga e de condutividade hidráulica do aquífero.

Tendo-se em consideração as propriedades geológicas encontradas (anisotropia estrutural) e hidrogeológicas (aquífero poroso equivalente, condutividade hidráulica e balanço hídrico), o modelo computacional foi considerado calibrado, quando o erro médio absoluto entre cargas medidas e simuladas tornou-se menor que 10%.

A avaliação da recarga foi analisada a partir da separação dos hidrogramas em duas partes de escoamentos: de base e superficial.

Segundo Custodio e Llamas (1983), o fluxo de base pode ser aproximado, para regime de longo tempo, à recarga. O escoamento de base foi calculado matematicamente utilizando a média móvel, gerando-se uma série de vazões em que os maiores valores e as pequenas variações são filtrados (TUCCI, 1986). Unindo os pontos de mudança de tendência da curva resultante, o volume acima da curva dos mínimos da média móvel é o escoamento superficial, enquanto que o volume abaixo é o escoamento subterrâneo.

## RESULTADOS E DISCUSSÕES

Os dados de anisotropia foram relacionados às unidades aquíferas e condutividade hidráulica do aquífero, foram selecionaram-se 13 poços para análise de carga hidráulica e um ponto de medição fluviométrica. A calibração do modelo foi realizada a partir da comparação entre os valores observados e calculados da carga hidráulica e balanço de massa.

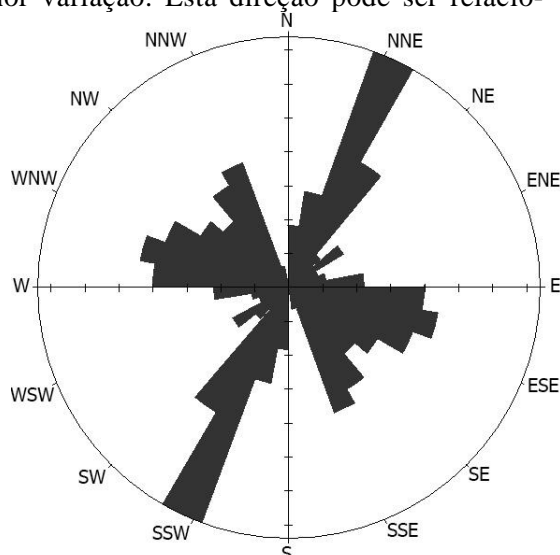
### Anisotropia e Condutividade Hidráulica

A distribuição das fraturas se mostrou homogênea, com alta densidade geral - média superior a três fraturas/m<sup>2</sup>. Identificaram-se nitidamente três famílias de fraturas, quais são: N20°-40°E, direção de primeira ordem, N20°-40°W e N65°-85°W (Figura 3).

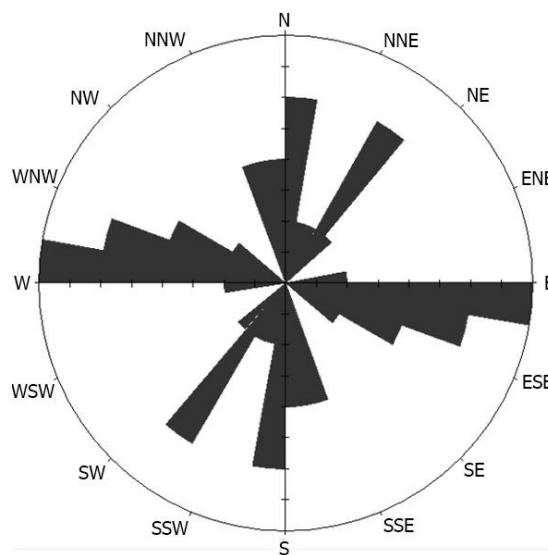
A partir de uma análise das aberturas de fraturas nos calcários (Tabela 2) foi possível

definir a importância de cada direção no fluxo subterrâneo. Entre as direções para oeste, a N20°-40°W foi interpretada como sendo a mais condutora, por apresentar uma maior porcentagem de fraturas largas e muito largas (3 a 100 cm). A família N65°-85°W apresenta uma maior homogeneidade entre as fraturas moderadamente largas e largas (0,25 a 3 cm) exibindo uma menor variação. Esta direção pode ser relacio-

nada diretamente com o desenvolvimento de condutos, que apresenta direção predominante para N70°-90°W (Figura 4). A trama estrutural entre as famílias de fraturas para NW, condutos, assim como a direção N20°-40°E contribuem para uma homogeneização do sistema cárstico-fissural, podendo, com isto, considerá-lo como poroso equivalente.



**Figura 3** – Direções de fraturas dos calcários  
**Figure 3** – Main trends of limestones fractures



**Figura 4** – Direções dos condutos dos calcários  
**Figure 4** – Main trends of limestone conduits

Tabela 2 – Abertura das fraturas de acordo com as principais direções  
Table 2 – Opening of fractures according to the main directions

Abertura das Fraturas	Distribuição Percentual das Direções das Fraturas		
	N20-40E	N20-40W	N65-85W
Bem fechada <0,10 mm	0	0	0
Fechada 0,10 a 0,25mm	0	12	0
Parcialmente aberta 0,25 a 0,50mm	0	16	0
Aberta 0,50 a 2,5mm	13	3	15
Moderadamente larga 2,5 a 10mm	49	9	49
Larga 1 a 3 cm	13	27	28
Muito larga 3 a 10 cm	18	30	5
Extremamente larga 10 a 100 cm	7	3	3
Cavernosa > 1 m	0	0	0
TOTAL	100	100	100

A condutividade hidráulica geral da região é regida pelas fraturas, com os condutos agindo apenas como rotas de distribuição e homogeneização do sistema. Este fato pode ser confirmado, uma vez que não há grandes variações de condutividade hidráulica calculadas entre os métodos de Cooper-Bredehoeft-Papadoulos (1967) e pela Lei de Snow, ou seja, tanto o método pontual de campo ( $10^{-1}$  a  $10^{-3}$  cm/s) como o método aplicado para fraturas ( $3,45 \times 10^{-2}$  cm/s) têm ordem de grandeza seme-

lhantes, mostrando um sistema aquífero homogêneo.

### Balanco Hídrico

O balanço hídrico mostrou uma recarga para toda a bacia de 118mm/a, que corresponde a 11,4% do total pluviométrico (1028mm). A descarga total da bacia foi de  $25.340.928\text{m}^3/\text{a}$ , sendo 60% produzido pelo escoamento superficial e 40 % relacionado ao escoamento de base.

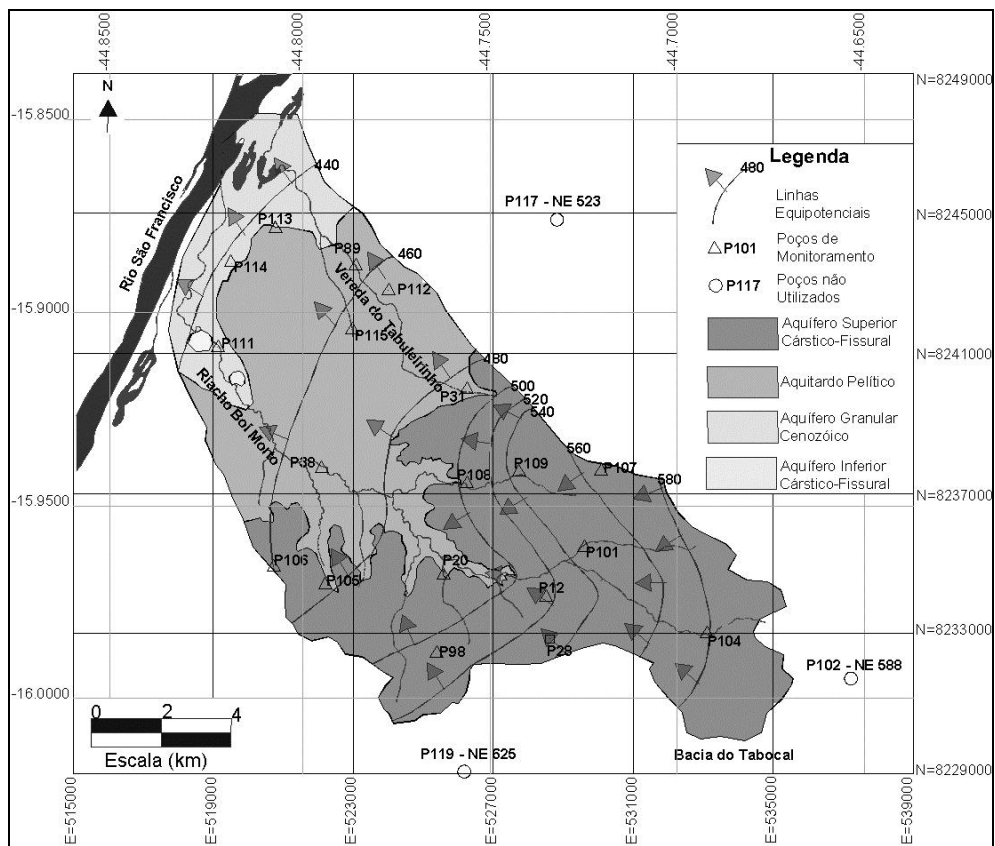
**Modelo Hidrogeológico Conceitual e de Fluxo**

O modelo foi verticalmente limitado entre as cotas 580m e 340m, correspondentes, respectivamente, à região de carga hidráulica mais elevada e ao limite inferior do Aquífero dos calcários inferiores.

A elevada intensidade de fraturas no Aquitardo metapelítico, embora quase fechadas, propicia uma drenança vertical e, portanto, uma conexão hidráulica entre os aquíferos carbonáticos inferior e superior.

As regiões norte, leste e sul da bacia não apresentam condições físicas de contorno, en-

tretanto, o monitoramento do nível de água teve abrangência maior do que a bacia do riacho Boi Morto. Isso possibilitou constatar a não continuidade lateral de fluxo subterrâneo no entorno dessas direções, o que permitiu o isolamento hidráulico do modelo, exceto uma conectividade de aporte para dentro da bacia na porção SE, proveniente de uma bacia adjacente denominada Tabocal (Figura 5). A porção oeste da bacia é bordada pelo rio São Francisco, caracterizando uma condição de contorno de Dirichlet.



**Figura 5 – Mapa potenciométrico da Bacia do Riacho Boi Morto**  
**Figure 5 – Potentiometric map of Boi Morto creek basin**

O sentido do fluxo do modelo foi representado para a condição de um sistema poroso, homogêneo, anisotrópico “equivalente”, ou seja, meio poroso de alta permeabilidade (FONTENELLE et al., 2009), respeitando a anisotropia das unidades. Tal classificação se justifica em função da interconexão das famílias de fraturas de alto ângulo com as fraturas de alívio sub-horizontais, produzindo uma distribuição da água infiltrada em uma área ampla e possibilitando a alimentação de fraturas em profundidade (FEITOSA et al., 2008), o que caracteriza um padrão regional de porosidade e

condutividade semelhante para todo o sistema aquífero.

A carga hidráulica mais elevada (580m) ocorre na cabeceira da bacia e a mais baixa a jusante (440m). O sentido do fluxo geral é, portanto, no sentido noroeste, concordante, inclusive, com a direção de fraturas N20°-40°W, as mais abertas encontradas.

O fluxo nos aquíferos carbonáticos é essencialmente sub-horizonta, concordante com o acamamento e sob regime laminar, visto que a mediana e moda da abertura das fraturas é menor que 0,65cm, ou seja inferior ao limite de

1,0cm sugerido por White (1993) apud Pessoa (2005) para a passagem do sistema fraturado para o cárstico.

O zoneamento dos valores de recarga, diferenciadas a partir das características das unidades hidrogeológicas aflorantes, mostrou a seguinte análise qualitativa: mais elevada na unidade do Aquífero dos calcários superiores (75,56mm/a), intermediária nas coberturas alúvio-coluvionares (36,50mm/a), representante como zona de recarga para o Aquitardo (6,21mm/ano). Tomando como pressuposto que a reação mais rápida à precipitação indica também maior taxa de recarga, o zoneamento realizado pode ser ratificado por meio da correlação cruzada, que tem a pluviometria como entrada e a carga hidráulica como saída (Tabela 1). Os resultados indicaram, de uma maneira geral, uma rápida reação do aquífero aos eventos pluviométricos, com tempos de resposta inferiores a um mês.

Verificou-se uma resposta mais rápida para os poços locados no aquífero superior (P-20, P-106 e P-107), variando de menos de 24 horas a 7 dias. Apenas o P-28 apresentou uma resposta mais lenta, de 21 dias, cujo local se encontra próximo a uma falha geológica.

O tempo de resposta médio ocorreu no poço locado no aquífero inferior (P-113), na porção em que o mesmo está sotoposto aos aluviões, levando cerca de 13 dias.

O tempo de resposta mais lento também ocorreu no poço locado no aquífero inferior, porém, na região em que o aquífero se encontra sotoposto diretamente ao aquitardo (P-31), levando cerca de 27 dias. Surpreendentemente o poço P-38 situado nesse contexto apresentou uma resposta de menos de 24 horas. Esse poço situa-se a 20m do leito do riacho Boi Morto, no seu trecho perene, o qual pode estar alimentando indiretamente este poço por meio de fratura.

Os poços P-28 e P-38 apresentam, portanto, comportamento anômalo quando compara-se a resposta da correlação cruzada com o esperado pela litologia. Contudo, como sugere Ferrari e Karmann (2008), embora a análise das séries de tempo forneça conhecimento para o comportamento de um “sinal” (entrada ou stress no aquífero), ela não é capaz de isolar as causas exatas de um dado sinal de saída. Ou seja, outros fatores, não conhecidos, podem interferir nos tempos de resposta, tal como a complexidade rúptil do sistema cárstico-fissural.

Em geral, os resultados são coerentes

indicando zonas de recarga mais rápida nos calcários (P-20, P-106 e P-107) seguido do P-113 no domínio de coberturas, e por fim o P-31 indicando uma recarga mais lenta nos metapelitos.

A autocorrelação do nível de água dos poços, que indica o tempo de trânsito da água sazonalmente armazenada, revelou boa coerência em relação ao sistema aquífero. Com exceção do P-107, os demais poços do aquífero superior apresentaram as menores defasagens de tempo, variando de 3 a 10 dias (Poços P-20, P-106 e P-28). Todos os poços do aquífero inferior apresentaram defasagens entre 22 a 28 dias (P-31, P-38 e P-113). Tais resultados refletem o bom grau de desenvolvimento e conectividade dos aquíferos, e de modo particular do aquífero superior, em que as fraturas supostamente se encontram mais abertas pela descompressão.

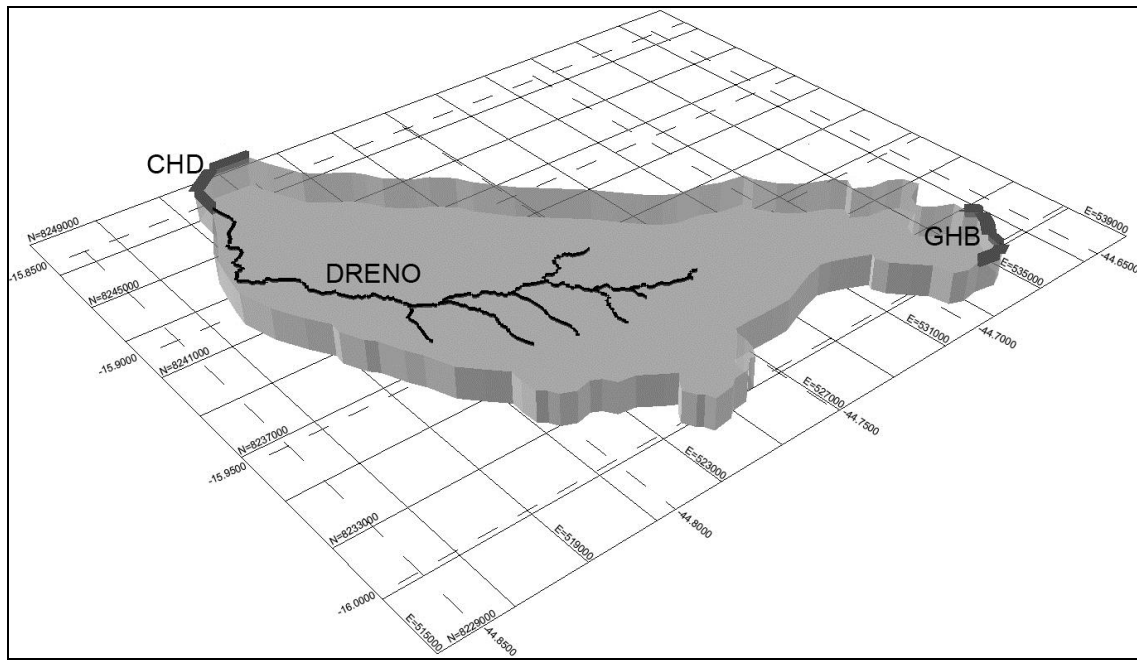
A zona de descarga foi representada pela drenagem do riacho do Boi Morto e pelo rio São Francisco. Numericamente, foi considerada uma zona de descarga na porção noroeste da bacia para representar a continuidade do fluxo subterrâneo (Figura 6).

Condutividades hidráulicas anisotrópicas são de difícil representação em modelos de diferenças finitas, assim, as direções preferenciais das fraturas que regem o fluxo nos calcários (N20°-40°W e N65°-85°W) foram representadas por, no mínimo, duas camadas homogêneas contendo tais resultantes de fluxo. A relação trigonométrica  $K_x$  e  $K_y$  para os ângulos relacionados a essas direções foram expressas em função de  $K_y$ , e mantida durante a calibração do modelo numérico. No aquitardo assumiu-se que o fluxo horizontal é praticamente nulo, tendo-se adotado um valor mínimo ( $1,39 \times 10^{-6}$ cm/s) que garantisse a percolação vertical.

Admitindo-se o fechamento das fraturas com a profundidade, a componente  $K_z$  foi considerada de duas a três vezes maior no Aquífero superior em relação à inferior.

O aquífero cárstico fissural inferior, na região abaixo do aquífero de cobertura (Figura 5) foi representado com o maior valor de condutividade do modelo, por se entender que apresenta maior dissolução devido ao grande volume de água circulante da descarga subterrânea em uma pequena área e das lagoas de transbordamento do rio São Francisco, as quais operam como constantes fontes de recarga artificial.





**Figura 6** – Modelo tridimensional com a localização dos CHD, Drenos e GHB (escala vertical 10X)  
**Figure 6** – Three-dimensional model with the CHD, Drains, GHB location (vertical scale 10X)

**Modelo Computacional**

O modelo computacional foi representado por uma área quadrada de 400Km<sup>2</sup> de modo a envolver toda a área da bacia estudada, que possui aproximadamente 150km<sup>2</sup> e, vertical-

mente, por uma espessura de 240m, correspondente à diferença entre a maior (580m) e a menor (340m) carga hidráulica (Tabela 3).

**Tabela 3** – Geometria do modelo computacional  
**Table 3** – Geometry of the computational model

Limite	Mínimo (m)	Máximo (m)	Total (m)	Número Células/Camadas	Tamanho das Células/Camadas (m)
Abcissas (x)	517000	537000	20000	200	100
Ordenadas (y)	8229000	8249000	20000	200	100
Camadas (z)	340	580	240	8	30

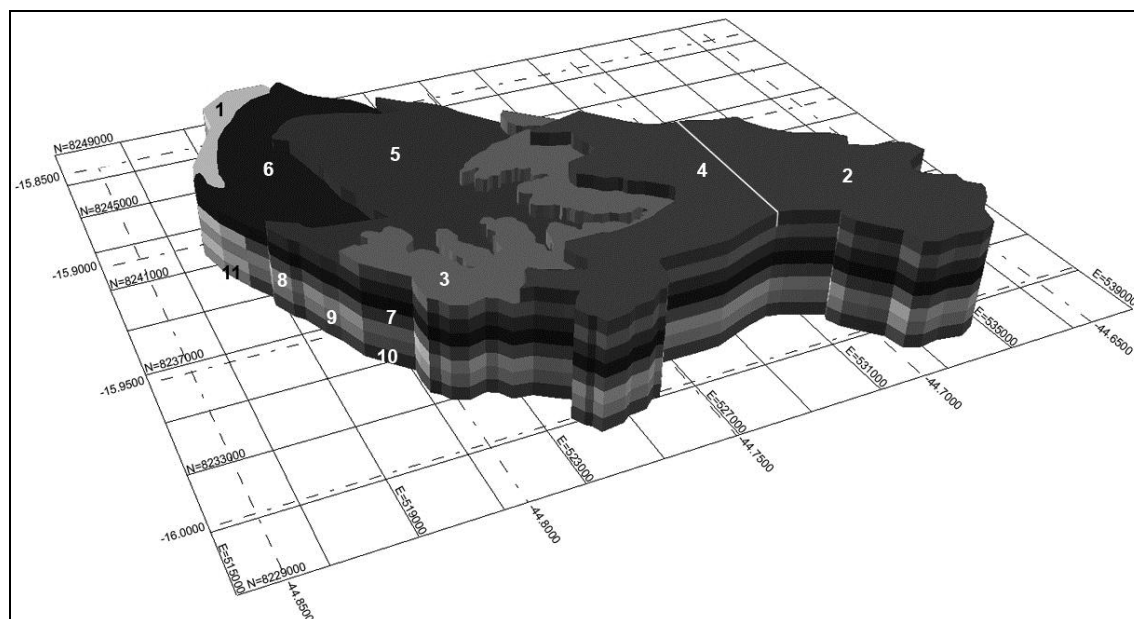
Definidos os limites do modelo computacional, as características geológicas e hidrogeológicas encontradas e/ou calculadas na área foram aplicadas a cada célula. A área externa ao modelo conceitual do sistema aquífero foi inativada de modo a representar uma condição de fluxo nulo.

Na discretização das células, feita com base no mapa geológico, admitiu-se que cada litologia dentro de uma zona saturada fosse dividida em camadas de 30m, especificando-se um valor de condutividade hidráulica para cada camada (Figura 7). O Aquífero inferior foi representado por quatro camadas de 30m, enquanto que no Aquífero superior, apesar da unidade litoestratigráfica apresentar 120m de espessura, o monitoramento do nível de água permitiu identificar apenas 60m de espessura saturada, a

qual foi, por isso, representada em duas camadas de 30m. O Aquitardo metapelítico foi representado por duas camadas de 30m de espessura.

As células ativas foram relacionadas, hidrogeologicamente, com a carga hidráulica e o fluxo de água, podendo ocorrer os seguintes casos: Carga hidráulica especificada e fluxo desconhecido (condição tipo 1 – Dirichlet); Carga hidráulica desconhecida e fluxo especificado (condição do tipo 2 – Neumann) e carga hidráulica e fluxo especificados (condição do tipo 3 – Cauchy).

Para proceder à comparação do valor monitorado com o valor calculado pelo balanço hídrico da bacia foi utilizado a opção Zbud's - zone budget sendo associados aos dreno, constant head – CHD e General Head Boundary – GHB.



**Figura 7** – Discretização das condutividades hidráulicas; 2, 3: aquífero superior; 5, 6: aquífero inferior; 7, 8, 9, 10: aquífero inferior (escala vertical 15X)

**Figure 7** – Discretization of hydraulic conductivities; 2, 3: upper aquifer; 5, 6: bottom aquifer; 7, 8, 9, 10: bottom aquifer (vertical scale 15X)

A condição do tipo 1 foi fisicamente representada pelo rio São Francisco, local de descarga de todo o sistema aquífero, e numericamente representada como CHD (Figura 6), ou seja, células às quais atribui-se um valor de carga hidráulica invariável. Foram utilizadas cargas hidráulicas de 450m a 445m na camada-5, correspondente à variação topográfica do rio São Francisco. O porte do rio São Francisco e sua influência nas bacias dos riachos adjacentes é expressiva, tal que, não há necessidade de representar a continuidade do aquífero em profundidade.

A condição do tipo 2 foi representada pela principal forma de entrada de água, ou seja, as zonas de recarga, definidas em número de três. A recarga foi aplicada na célula ativa mais alta de cada coluna do modelo com fluxo especificado, sendo uma no domínio dos aquíferos de cobertura (aquífero granular), uma no domínio do aquífero pelítico, sendo este diretamente sobreposto ao aquífero carbonático inferior, e outra sobre o aquífero carbonático superior.

A saída e entrada de água do sistema foi representadas pela condição do tipo 3. Fisicamente a saída foi representada pelo riacho Boi Morto e a entrada pelo fluxo subterrâneo constatado a SE da área (ver modelo conceitual). Numericamente, tais condições foram representadas, respectivamente; por drenos, mantendo

uma condutância de  $23,2\text{cm}^2/\text{s}$  nas camadas 3, 4 e 5 e GHB, mantendo a condutância de  $58,9\text{cm}^2/\text{s}$  na camada 1 (Figura 6).

O riacho Boi Morto foi representado, numericamente, como dreno, pois a vazão relativa ao escoamento superficial é pequena quando comparada com a contribuição subterrânea. Entretanto tal representação restringiu-se apenas ao trecho perene do riacho (Figura 6) em três camadas, de modo a acompanhar a topografia do terreno.

Foi utilizada uma carga variando conforme a topografia do riacho. Segundo Cota (2011), em pequenos riachos, a carga associada à condição de contorno pode ser tomada como sendo igual à elevação do terreno, se a condutância for mantida alta o suficiente para que a carga no aquífero seja igual à carga associada aos drenos.

O conhecimento da carga e fluxo permitiu representar a entrada de água subterrânea, localizada a montante da área por uma condição de contorno do tipo GHB, que mostra uma conectividade entre a bacia estudada e a bacia adjacente (bacia do córrego do Tabocal). Assim como no dreno, o valor da condutância do GHB foi mantido alto o suficiente (Tabela 4) para que a carga do aquífero fosse igual à cota do terreno, carga hidráulica esta verificada pela medição do nível estático em poços de observação.

**Tabela 4** – Pontos de controle de descargas da bacia  
**Table 4** – Discharge control points of the basin

Ponto de Monitoramento	Valores Observados	Valores Calculados	Erro
	Vazão (m³/h)	Vazão (m³/h)	(%)
F-1	370,00	418,29	13,0
CHD	2892,8	3058,83	5,6
GHB	-	1841,67	-

Além das condições de carga e fluxo, para cada bloco do modelo, foi atribuída uma condutividade hidráulica (Tabela 5), esta representada em todas as células ativas.

A propriedade 4 foi utilizada como uma barreira hidráulica (falha de gravidade), isto por

que há uma grande variação de carga hidráulica observada do lado esquerdo e direito desta falha. A variação de carga hidráulica entre os lados da falha é de 7m o que impossibilitou a calibração do modelo sem uma estrutura que individualize estas duas regiões (Figura 6).

**Tabela 5** – Relação entre a condutividade hidráulica e a litologia  
**Table 5** – Relationship between hydraulic conductivity and lithology

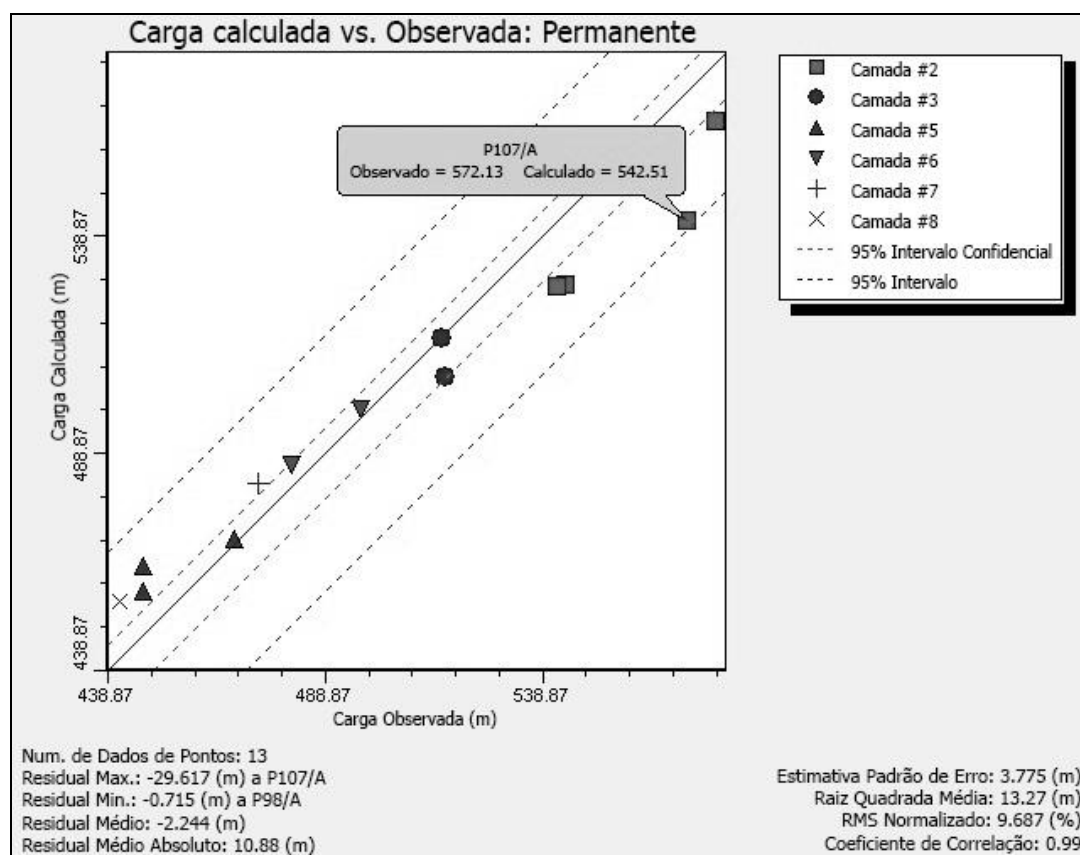
Ponto	Domínio	Condutividade Hidráulica				
		Kx (m/dia)	Ky (m/dia)	Kz (m/dia)	K <sub>m</sub> (m/dia)	K <sub>m</sub> (cm/s)
2	Calcário N20-40W	30,0	50,0	50,0	43,3	5,02E-02
3	Calcário N65-85W	50,0	14,0	50,0	38,0	4,40E-02
4	<i>Falha de blocos A/B</i>	0,0001	0,0001	0,0001	0,0001	1,16E-07
5	Metapelito	0,0008	0,0008	0,002	0,0012	1,38E-06
6	Metapelito	0,0008	0,0008	0,002	0,0012	1,38E-06
7	Calcários Finos N20-40W	9,0	20,0	20,0	16,3	1,89E-02
8	Calcários Finos N65-85W	20,0	9,0	20,0	16,3	1,89E-02
9	Calcários Finos N20-40W	9,0	20,0	20,0	16,3	1,89E-02
10	Calcários Finos N65-85W	20,0	9,0	20,0	16,3	1,89E-02
11	<i>Calcários Finos a Jusante</i>	150,0	90,0	150,0	130,0	1,50E-01
1	<i>Calcários Finos a Jusante</i>	90,0	150,0	150,0	130,0	1,50E-01

## CONCLUSÕES

A coerência obtida dos dados do modelo assim como os valores calculados mostrou uma boa aderência para o modelo. O erro médio quadrático normalizado inferior a 10 % entre cargas medidas e simuladas permitiu adotar o modelo computacional apresentado como válido para a bacia, tomando-se em consideração a forte anisotropia da área, o contexto hidrogeológico cárstico-fissural, a heterogeneidade litológica e a fidelidade dos dados de campo avali-

ados.

As condutividades hidráulicas resultantes do modelo se encontram coerentes com os valores calculados pelos testes de aquífero. Para análise do erro das cargas hidráulicas, valores observados (X) versus calculados (Y), verificando-se um erro médio quadrático normalizado de 9,7%, sendo o erro residual máximo de 29,62m para o ponto P-107 e o erro residual mínimo de 0,72m para o ponto P-98 (Figura 8).



**Figura 8** – Gráfico de calibração de cargas observadas e calculadas

**Figure 8** – Observed and calculated head calibration graphics

Os resultados do balanço hídrico calculado (descarga, recarga, escoamento superficial e subterrâneo) foram muito próximos dos valores avaliados a partir do monitoramento hidrológico, verificou-se uma diferença de 13% entre o valor medido em campo e o calculado pelo modelo para a descarga do riacho Boi Morto. O valor de aporte de água subterrânea na bacia foi de 1841,67m<sup>3</sup>/h representado pelo GHB a montante. Foi observada uma diferença de 5,6% entre o valor calculado pelo balanço hídrico e pelo CHD para a descarga da bacia no rio São Francisco. Já o balanço de massa do modelo numérico apresentou um erro entre valor de entrada e saída de 0,01%. O valor total de recarga obtido no modelo foi de 118,07mm/a, correspondendo a 11,49% do total pluviométrico registrado no ano hidrológico de 2010/2011 (1027,9mm). A recarga apresentou, portanto, uma diferença inferior a 1% em relação à obtida pela separação do hidrograma.

O modelo numérico permitiu a verificação de um relevante aporte lateral para a bacia em estudo proveniente da bacia adjacente, fenômeno típico de sistemas cársticos, que muitas vezes é ignorado. O aporte externo a partir da bacia do córrego Tabocal é superior à recarga pluvial na própria bacia do riacho Boi Morto,

ambas as bacias drenam superficialmente no sentido do rio São Francisco, na direção NW. A interação subterrânea entre essas bacias decorre do fato de, na porção montante das mesmas a bacia do córrego Tabocal possui parte da sua cabeceira reentrante à do Boi Morto e embora o fluxo superficial drenante para a bacia do Tabocal, os fluxos subterrâneos desta porção seguem na direção NW em direção ao rio São Francisco, e para tanto percolam através da bacia do riacho do Boi Morto.

Contribuíram para esses resultados o levantamento sistemático em campo das discontinuidades litológicas, a análise de autocorrelação e correlação cruzada de séries temporais do nível de água e precipitação, o monitoramento automatizado do nível de água, e o monitoramento hidrológico.

Reitera-se a importância em se empregar dados fidedignos de monitoramento nos modelos numéricos de modo a se obter maior confiança no modelo. E ainda a importância de se instalar os transdutores de pressão em poços em operação, o que possibilitou a obtenção de condutividade hidráulica em diversos pontos, e permite ainda a construção futura de um modelo em regime transiente.

## AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao CNPq Processo 557.074/2008-3 e ao Instituto Mineiro de Gestão das Águas pelo apoio logístico.

## REFERÊNCIAS

- ALKMIM, F. F. & MARTINS-NETO, M. A. A Bacia intracratônica do São Francisco: arcabouço estrutural e cenários evolutivos. P. 9-30. In: PINTO, C. P.; Martins-Neto, M. A. (Org.). Bacia do São Francisco: Geologia e Recursos Naturais. Belo Horizonte: SBG/MG, 2001.
- BRAUN, O. P. G. Contribuição a estratigrafia do Grupo Bambuí em 1968. In: Congresso Brasileiro de Geologia, 22, Belo Horizonte, 1968. *Anais...* Belo Horizonte: SBG, 1968. P.155-166.
- CASTRO, R. E. L. E FREIRE, A. P. S. **Mapeamento geológico na sub-bacia hidrográfica do riacho Mocambo com ênfase nas ocorrências de fluorita e sua relação com as anomalias de fluoreto na água subterrânea no Município de São Francisco.** Belo Horizonte, Minas Gerais, 2002, 94 p. Trabalho de Graduação, Universidade Federal de Minas Gerais.
- CHANG, H. k.; MIRANDA, F. P.; MAGALHÃES, I.; ALKIMIM, F. F. Considerações sobre a evolução tectônica da Bacia do São Francisco em 1988. In: Congresso Brasileiro de Geologia - 35, Belém, 1988, *Anais*. Belém: Sociedade Brasileira de Geologia. v.5, 1988, p.2076-2090.
- COTA, S. D. S. **Desenvolvimento de modelo conceitual e matemático do aquífero cárstico-fissural na bacia do Rio São Francisco.** Waterloo, Ontário, Canadá, 2011, 46 p. Pós-Doutorado, University of Waterloo.
- CUSTODIO, E. E LLAMAS, M. R. **Hidrologia Subterrânea**, 2°. Ed. Volume 1. Ediciones Omega, S. A. Barcelona – Espanha. 1983.
- FEITOSA, F. A. C. et al. (Coord). **Hidrogeologia: Conceitos e Aplicações**, 3°. Ed. Revisada e ampliada. Rio de Janeiro: CPRM, [Recife]: UFPE, LABHID. 2008.
- FERRARI, J. A. E KARMANN, I. Comportamento Hidrodinâmico de Sistemas Cársticos na Bacia do Rio Betari, Município de Iporanga – SP. Departamento de Geologia Sedimentar e Ambiental – Instituto de Geociências – Universidade de São Paulo – USP, São Paulo, SP. **Revista do Instituto de Geociências – USP**. V.8, n.1, p. 1-13, 2008.
- FONTENELLE, L. G. E SANTOS, J. S. **Aplicação de Modelos de Hidráulica de Poços em Aquíferos Fissurais do Município de Baturité-Ceará.** Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Ceará-Publicação Interna. 8 p., 2009.
- MARQUES G. F. et al. Hydrodynamic characterization of a karst aquifer in the Brazilian semi-arid region with time series analysis of hydrology data. World Environmental & Water Resources Congress – EWRI/ASCE. 11 p., 2011.
- MCDONALD, M. G. E HARDAUGH, A. W. *Visual Modflow 2009 – User’s Manual For Professional Applications in Three – Dimensional Groundwater Flow and Contaminant Transport Modeling.* Schlumberger Water Services, Waterloo – Ontario - Canada. 2009.
- MOURA, F. D. E SOUZA, A. M. Mapa geológico da sub-bacia do córrego boi morto, município de São Francisco, escala: 1:60.000. Minas Gerais. Belo Horizonte, Minas Gerais, 2010. Trabalho de Graduação, Universidade Federal de Minas Gerais.
- PESSOA, P. F. P. **Hidrogeologia do aquífero cárstico coberto de Lagoa Santa, MG.** Belo Horizonte, Minas Gerais, 2005, 375 p. Tese de Doutorado, Universidade Federal de Minas Gerais.
- QUINN, J.J., TOMASKO, D., KUIPER, J.A. Modeling complex flow in a karst aquifer. **Sedimentary Geology**, n.184, p. 343-351, 2006.
- SCANLON, B.R., MACE, R. E., BARRET, M.E., SMITH, B. Can we simulate regional groundwater flow in a karst system using equivalent porous media models? Case study, Barton Springs Edwards aquifer, USA. *Journal of Hydrology*, v.276, p. 137-158, 2003.
- TUCCI, C. E. M. et al. (Org). **Hidrologia Ciência e Aplicação**, 2°. Ed. Rio Grande do Sul: Editora da Universidade Federal do Rio Grande do Sul. 1986.
- VELÁSQUEZ, L. N. M. et al. Origem do flúor na água subterrânea e sua relação com os casos de fluorose dental no Município de São Francisco, Minas Gerais. Relatório de Pesquisa Fapemig (Relatório CRA 294/99), 2003, 149 p.
- VELÁSQUEZ, L. N. M. et al. Estudo da tipologia das ocorrências de fluorita que ocasionam anomalias nos níveis de fluoreto da água subterrânea, e a sua relação com os casos de fluorose dental no Município de São Francisco, Minas Gerais. Relatório de Pesquisa Fapemig (Relatório CRA 1110/03), 2007, 164 p.
- WHITE, W. B. Analysis of Karst Aquifers. In: Alley, W. M. (Ed.) **Regional Ground-Water Quality**. Van Nostrand-Reinhold, New York, p. 471-489, 1993.
- WHITE, W. B. A brief history of karst hydrogeology: contributions of the NSS. **Journal of Cave and Karst Studies**, v.69, n.1, p. 13-26, 2007.
- WHITE, W. B. **Conceptual Models for Carbonate Aquifers.** National Ground Water Association, Vol. 50, n.2, p. 180-186, 2012.