



MODELAGEM HIDROGEOLÓGICA DE FLUXO E TRANSPORTE
ADVECTIVO NA BACIA DO ENGENHO NOGUEIRA, CAMPUS
PAMPULHA DA UFMG, BELO HORIZONTE, MG

GROUNDWATER FLOW MODELING AND ADVECTIVE
TRANSPORT AT ENGENHO NOGUEIRA BASIN, IN UFMG PAMPULHA
CAMPUS, BELO HORIZONTE, MG

Laila Garcia Maia Gonçalves¹; Leila Nunes Menegasse Velásquez²;

Artigo recebido em: 28/10/2015 e aceito para publicação em: 25/07/2016.

DOI: <http://dx.doi.org/10.14295/ras.v30i2.28624>

Resumo: O estudo teve como objetivos a construção e calibração de um modelo numérico permanente de fluxo de água subterrânea a partir de dados secundários e a sua aplicação teórica na avaliação de transporte advectivo de partículas para identificar zonas de transporte de poços tubulares pertencentes à UFMG, no campus Pampulha. A área está situada no Complexo Belo Horizonte, que constitui o aquífero fissural gnáissico, sobreposto pelo aquífero granular, formado por solos residuais e coluvionares areno-argilosos a argilo-arenosos e por depósitos aluvionares argilo-arenosos com lentes de argila orgânica plástica. Ambos os aquíferos possuem forte conexão hidráulica entre si. Foram divididas cinco unidades hidrogeológicas e definidas cinco zonas de recarga na área de estudo variando de 100 a 400 mm/ano de acordo com a ocupação do solo, com a sua textura e com as cotas altimétricas. A modelagem numérica de fluxo se mostrou bastante satisfatória e compatível com o modelo conceitual concebido para área, e, na modelagem de transporte advectivo de partículas, foram identificadas zonas de transporte cuja contaminação pode afetar a qualidade da água bombeada a dezenas de metros de distância ao longo do tempo. O bombeamento dos poços considerados equivale a aproximadamente 50% da recarga feita por chuva. Os resultados devem contribuir para a gestão quantitativa e qualitativa da água subterrânea no campus Pampulha da UFMG. Foi utilizado o software *Visual MODFLOW* 2011.1, e o aplicativo *MODPATH*.

Palavras-chaves: Modelagem Numérica. Hidrogeologia. Bacia do Córrego do Engenho Nogueira. Advecção.

Abstract: The objectives of this study were the construction and calibration of a groundwater flow permanent numerical model with secondary data and its theoretical application in advective transport of particles assessment for identifications of transport zones for pumping wells belonging to UFMG, in Pampulha campus. The study area are part of the Belo Horizonte Complex that forms a gneiss fissure aquifer system superimposed by granular aquifer formed by residual soils and sandy-clay to clayey-sand colluvium, and clayey-sand alluvial deposits with plastic organic clay lenses. Both aquifers have strong hydraulic connection with each other. Five hydrogeological units were divided and five recharging zones were defined in the study area ranging from 100 to 400 mm/year according to land use, material texture and altitudes. Numerical modeling of groundwater flow proved satisfactory and consistent with the conceptual model designed for the area. The advective transport modeling of particles identified transport zones for pumping wells which contamination can affect pumped water quality to tens of meters away over time. The water pumped from wells amounts to approximately 50% of direct recharge made by rain. The results should contribute to the quantitative and qualitative management of groundwater in the Pampulha campus of UFMG. The tools used were *Visual MODFLOW* 2011.1 and *MODPATH*.

Keywords: Numerical Modeling. Hydrogeology. Engenho Nogueira Creek Basin. Advection.

1 INTRODUÇÃO

Desde o ano de 2013 a região SE do Brasil tem sido palco de uma atípica recessão

do índice pluviométrico, e, consequentemente, de gradativa redução de vazão dos rios que abastecem as regiões metropolitanas, tal como no município de Belo Horizonte, no

1 Universidade Federal de Minas Gerais (lailagmg@gmail.com)

2 Professora do Instituto de Geociências da Universidade Federal de Minas Gerais. IGC/UFMG (mene-gase@yahoo.com.br)

qual está localizada a área deste estudo.

Diante deste quadro, o abastecimento tem sofrido constantes interrupções, impulsionando a iniciativa privada e os órgãos públicos a intensificar o uso da água subterrânea. Essa tendência pode ter como consequência a exaustão dos aquíferos, tornando indispensáveis políticas de gestão desses mananciais, visando a sua sustentabilidade. O campus da UFMG se enquadra dentre os órgãos públicos que, pela sua natureza, apresenta elevado consumo de água, e possui, no momento, a intenção de incrementar a produção e uso da água subterrânea a partir dos aquíferos do seu subsolo, colocando em operação poços inativos construídos na década de 1990.

Do ponto de vista técnico, o modelo numérico pode ser uma ferramenta de gestão flexível e confiável, aplicando-se à validação do modelo conceitual do funcionamento hidráulico do aquífero, e permitindo analisar a resposta dinâmica do sistema subterrâneo ante a variação das condições de bombeamento, recarga, dentre outros. Além disso, também é uma ótima ferramenta de apoio para a avaliação de poluição antrópica.

Dentro das possibilidades de aplicação da modelagem numérica, a delimitação de perímetro de proteção de poços tubulares se torna evidente, já que determina com uma maior precisão as áreas as quais devem ter um maior controle de ocupação.

Desde o último modelo da área de estudo realizado por Carvalho-Filho (1997) no campus da UFMG, novas informações do subsolo foram geradas por meio de instalação de poços de monitoramento do nível d'água no aquífero granular e de sondagens geotécnicas para a construção de novos prédios. Além disso, Ribeiro (2013) estudou nesta mesma área a recarga de ambos os aquíferos, granular e fissural, por meio de monitoramento automatizado do nível d'água.

Frente a esse acervo de dados e tendo em vista o projeto de ampliação do uso da água subterrânea no campus, atentou-se para a necessidade de elaborar um novo modelo computacional a partir de um modelo físico com maior grau de detalhe. Assim, o estudo objetivou a construção de um modelo hidro-

geológico numérico em regime permanente, a partir da inserção de novos dados gerados ao longo dos últimos 15 anos e também definir as zonas de transporte dos poços que atualmente se encontram em funcionamento e dos que deverão ser ativados, de modo a respaldar as decisões administrativas em referência ao aproveitamento e preservação da água subterrânea dentro do campus.

2 MÉTODOS

O estudo contou com duas etapas gerais de trabalho: aquisição e compilação de dados e modelagem hidrogeológica numérica com a simulação numérica de transporte de partículas (ou transporte advectivo). O protocolo de modelagem seguiu os passos propostos por Anderson e Woessner (1992) até a etapa de calibração, seguido por uma aplicação teórica de transporte advectivo.

A modelagem hidrogeológica teve como objetivo essencialmente *interpretativo*. Esta ainda caracteriza-se como matemática, determinística, numérica, na qual foi aplicado o método de diferenças finitas em um sistema aquífero tridimensional. Foi utilizado o programa que emprega o método de diferenças finitas com bloco centrado, denominado *MODFLOW* (MCDONALD E HARBAUGH, 1988 *apud* ANDERSON E WOESSNER, 1992) e o pacote de transporte de partículas *MODPATH/MODPATH-PLOT* versão 3.

O *MODFLOW* é um software que simula o fluxo da água subterrânea num sistema tridimensional, cujos cálculos são realizados pela equação de controle de fluxo através do meio poroso:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(K_{xx} \frac{\partial h}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(K_{yy} \frac{\partial h}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(K_{zz} \frac{\partial h}{\partial z} \right) - W = S_s \frac{\partial h}{\partial t}$$

Onde:

K_{xx} , K_{yy} e K_{zz} = valores da condutividade hidráulica nos eixos das coordenadas x , y e z (LT-1)

h = carga hidráulica (L)

W = termo geral que define a taxa do volume de fluxo por unidade de volume por unidade de tempo em recarga (+) ou descarga (-) de água ($T-1$)

S_s = armazenamento específico do material poroso ($L-1$), e

t = tempo.

O transporte advectivo desconsidera qualquer mistura longitudinal e lateral. O soluto se move com uma velocidade definida pela equação de Darcy corrigida para fluxo através dos poros, ou seja, divide a velocidade de Darcy pela porosidade efetiva. O *MODPATH* é um módulo de pós-processamento que descreve, através do transporte advectivo, o movimento de partículas imaginárias infinitesimais posicionadas no meio poroso saturado (*particle tracking*), computando e apresentando os caminhos destas em três dimensões baseado no “output” do *MODFLOW* (POLLOCK, 1994).

As Zonas de Captura são definidas através da área de recarga do aquífero que contribui diretamente para o poço, enquanto que a Zona de Influência é delimitada pelo cone de rebaixamento de nível d’água causado pelo bombeamento de um poço.

Definir o perímetro de proteção de um poço utilizando estes conceitos de zonas de captura e de influência pode ser inviável tecnicamente e/ou economicamente, sendo necessário adotar perímetros internos, tal como a Zona de Transporte, que caracterizam isócronas, definidas por pontos com o mesmo tempo de trânsito até chegar ao alvo. A utilização do software *MODPATH* tem como objetivo definir tais isócronas.

3 CARACTERIZAÇÃO FÍSICA DA ÁREA DE ESTUDO

A área estudada é limitada pelas coordenadas UTM N-609.217/E-7.803.785 e N-607.643/E-7.801.339 (Datum *SAD69*), compreendendo o campus Pampulha da Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG) e o Centro de Desenvolvimento da Tecnologia Nuclear (CDTN), região norte de Belo Horizonte (Figura 1). Em ambos os locais, as instalações são abastecidas majoritariamente pela Companhia de Saneamento de Minas Gerais (COPASA). A UFMG possui dois poços em operação, localizados no Colégio Técnico (COLTEC), e o CDTN, um poço em suas dependências.

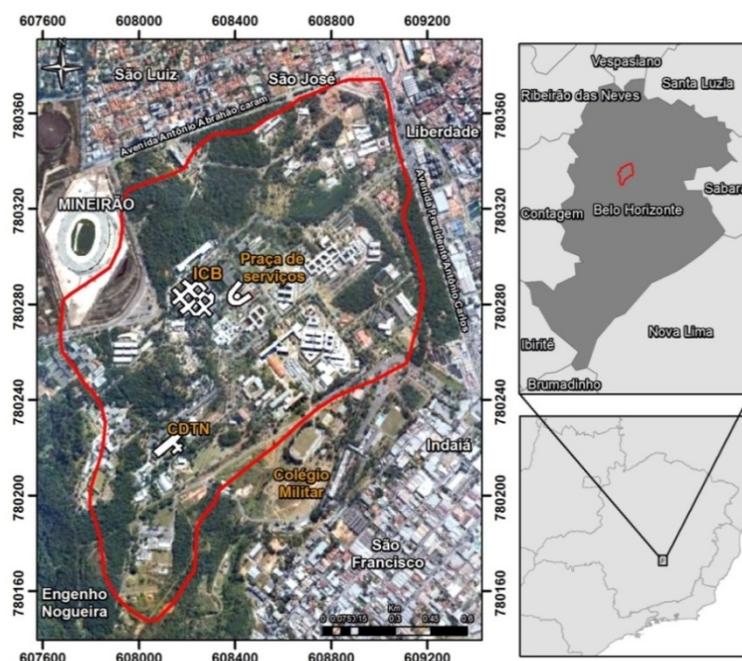


Figura 1 - Localização da área de estudo (em vermelho) e ocupações adjacentes

Figure 1 - Study area location (in red) and adjacent occupations

Fonte: (Google Earth, 2014; IBGE, 2007)

A bacia do córrego do Engenho Nogueira (CEN) possui a extensão de 11,4 km² e a área estudada, 1,9 km², situada na porção média da bacia. O CEN e afluentes totalizam 12,7 km de extensão e aproximadamente 53%

da rede se encontra canalizada. O CEN é um afluente da margem direita do Ribeirão Pampulha, que, por sua vez, deságua no Ribeirão do Onça, afluente do Rio das Velhas (Figura 2).

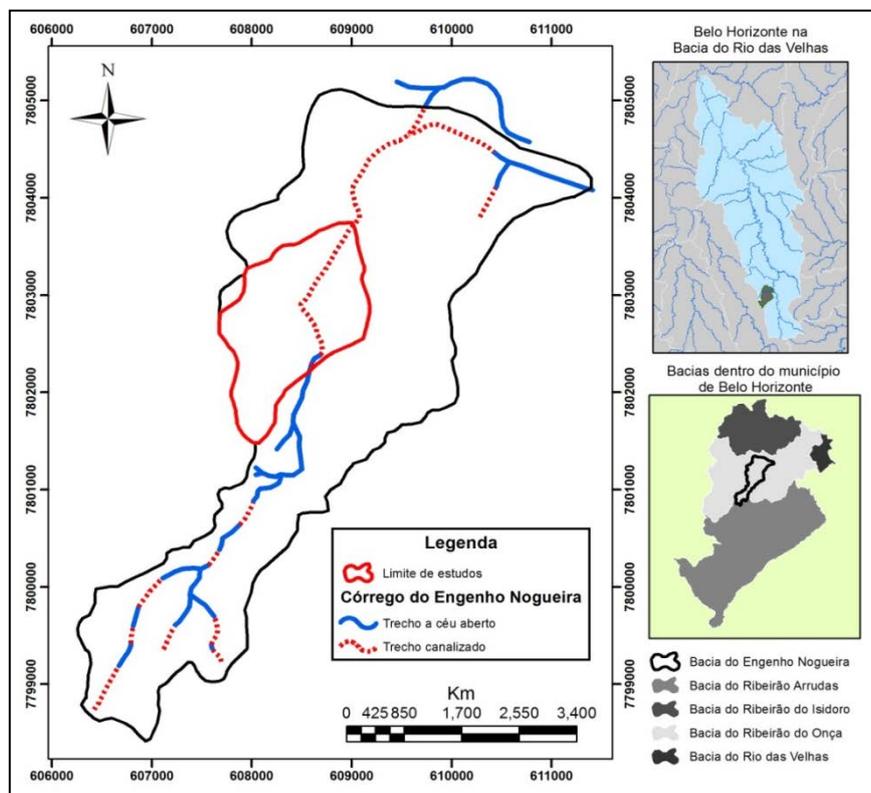


Figura 2 - Área estudada no contexto da bacia do Córrego Engenho Nogueira, em Belo Horizonte e na Bacia Estadual do Rio das Velhas (Projeto Manuelzão, 2004; IBGE, 2007; IGAM, 2009; SMOBI, 2010)

Figure 2 - Study area in the context of the basin of the Engenho Nogueira stream, Belo Horizonte and the Rio das Velhas Basin

O clima da Belo Horizonte, segundo a classificação de Köppen é Cwa – tropical de altitude com inverno seco e verão chuvoso. Segundo as normais climatológicas médias do período base 1961 a 1990 da estação 83587, publicadas pelo Instituto Nacional de Meteorologia – INMET, a temperatura média compensada do município varia entre a média mínima de 18°C em julho e média máxima de 23°C, em fevereiro, com picos de temperaturas mínima e máxima de 3,1°C (junho/1979) e 35,5°C (outubro/1963). A normal da precipitação anual desta mesma estação é de 1.463,7 mm, sendo aproximadamente 89% incidente entre outubro e março.

Segundo dados da estação pluviométrica do CDTN, a média do total anual dos

anos 2002, 2003, 2008, 2010 e 2012 foi de 1.333,6 mm. O trimestre mais chuvoso foi de novembro a janeiro e o mais seco, de junho a agosto.

A área possui cota máxima de 860 mNM na porção sul e mínima de 800 mNM na porção norte, esta no antigo leito do CEN. Carvalho-Filho (1997) classificou o relevo local em colina (divisores hidrológicos) e várzea (leito e planície de inundação do CEN). O relevo do tipo colina foi subdividido pelo autor em vertente (forma convexa, declividade alta) e topo (altitudes elevadas).

De uma maneira geral, a área estudada se encontra ocupada por unidades administrativas e vias de acesso asfaltadas ou revestidas por paralelepípedos. Ocorrem áreas com ve-

getação não original, como gramas e jardins, e áreas com vegetação nativa densa no alto das colinas.

3.1 Geologia e hidrogeologia

A área de estudo e a maior parte da área de Belo Horizonte encontram-se sobre os terrenos granito-gnáissicos arqueanos denominados “Complexo Belo Horizonte” (NOCE *et al.*, 1994). Intrusivos a estes gnaisses, ocorre um enxame de diques máficos proterozoicos e espessos veios de quartzo concentram-se no contato das rochas metavulcânicas com o embasamento granito-gnáissico.

As rochas assinalam duas fases de deformação principais evoluindo em regime essencialmente dúctil, a dúctil/rúptil (SILVA *et al.*, 1995). Com base na interpretação de aéro-

fotos do município de Belo Horizonte, Beato *et al.* (2001) infere que fraturas de direção NE-SW são abertas enquanto que as de orientação NW-SE são preenchidas por diques máficos.

Sobreposto aos gnaisses ocorre o manto de intemperismo que, somado ao saprólito das rochas granito-gnáissicas pode atingir até 120 metros de profundidade na região do bairro do Cincão, na bacia da Lagoa da Pampulha (BEATO *et al.*, 2003), adjacente à área de estudo. Silva *et al.* (1995) destacam ainda os sedimentos aluviais e depósitos de vertentes (colúvio, depósitos de natureza torrencial e de tálus).

Na área do estudo estão presentes, segundo mapeamento 1:5.000 de Mendes *et al.* (1960) cinco litotipos, quais sejam: gnaisse, granodiorito, metabasito, argila, veio de quartzo e indiferenciados (Figura 3).

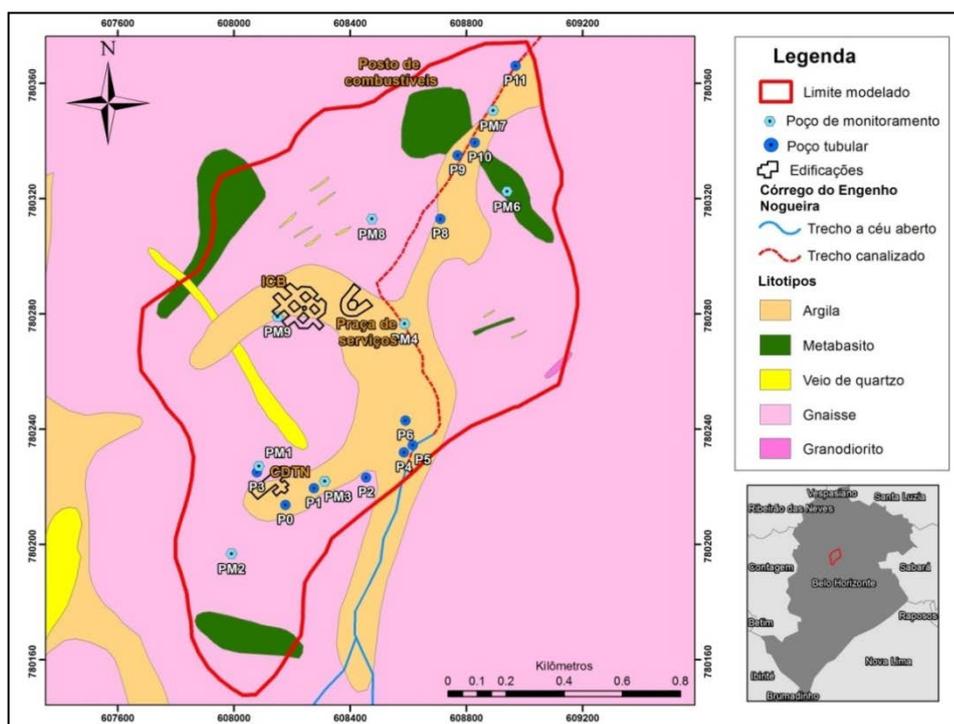


Figura 3 - Mapa geológico da área de estudo (Modificado de Nuclebrás, 1979)

Figure 3 - Geological map of the study area

No presente trabalho, devido à impossibilidade de mapeamento normalmente imposta em regiões submetidas a cortes e aterros característicos do processo de urbanização, foram identificados em relatórios de sondagens rasas e profundas das construções civis e de poços tubulares já realizadas na área, dando

respaldo à uma nova interpretação geológica em profundidade do local. Foram identificados os seguintes litotipos e materiais descritos a seguir.

O gnaisse não aflora na área de estudo, pois é coberto por um manto de intemperismo com espessuras de 30 a 50 metros

composto por depósitos sedimentares e por saprólito, este último com texturas que variam de areia grossa até argila.

O metabasito intrusivo, constituído de anfibólio e feldspato, apresenta-se ora em formato de dique, ora em configuração de soleira. Em superfície, encontra-se inteiramente decomposto, formando solo de coloração marrom avermelhada. Veios de quartzo são descritos nas perfurações a norte da área, bem como em superfície na região centro-norte, formando um corpo alongado na direção SE-NW.

Sobrepostos ao saprólito ocorrem depósitos sedimentares quaternários mesclados, resultantes da transição entre o solo aluvial/coluvial. As espessuras deste material variam de 20 a 30 metros nas porções mais altas e 25 a 35 metros na área de várzea. O pacote sedimentar é constituído de uma camada de solo argilo-arenoso sobre outra camada de solo de 15 a 20 metros de textura areno-argilosa que se torna gradativamente mais grosseira no sentido do saprólito.

Digno de nota é a ocorrência de uma argila cinza escuro a negra, rica em matéria orgânica, nas regiões de fundo de vale, intercalando-se com o solo argiloso (MENDES *et al.*, 1960). Tal intercalação, verificada em vários furos de sondagem em região próxima do CEN, possui uma disposição descontínua e espessuras variáveis alcançando 15 metros na porção norte da área.

Hidrogeologicamente, o aquífero caracteriza-se como fissural, sotoposto a um aquífero granular constituído pelo manto de intemperismo aluvio-coluvionar e pelo solo residual originado do substrato gnáissico.

As variações texturais do sistema aquífero granular foram observadas em descrições litológicas de poços profundos, poços de monitoramento e sondagens do tipo SPT. São

descritas como material cuja textura se torna gradualmente mais grossa à medida que se aproxima da rocha sã. Este sistema aquífero caracteriza-se como livre a semi-confinado, anisotrópico e heterogêneo, e se constitui de materiais inconsolidados de texturas argilo-arenosa e areno-argilosa sobrepostos ao saprólito.

O sistema aquífero fissural constitui-se do gnaiss são do Complexo Belo Horizonte, cujo topo situa-se a uma profundidade média de 45 metros.

O fluxo subterrâneo de ambos os aquíferos é fortemente controlado pelo relevo com áreas de recarga nas cotas mais elevadas e de relevo plano, sendo o escoamento de água pelo subsolo em direção aos vales, como, por exemplo, a região de brejo localizada em frente ao CDTN, na região SW da área de estudo.

4 MODELO HIDROGEOLÓGICO CONCEITUAL

4.1 Contornos do modelo

Os limites da área do modelo hidrogeológico foram delineados segundo os altos topográficos da bacia do CEN, os quais foram considerados como contornos hidráulicos, à exceção do limite da porção sul, a qual foi cortada transversalmente ao talvegue do CEN (Figura 4).

A cota máxima do modelo corresponde à maior cota observada dentro dos contornos hidráulicos (862 mNM) e a cota mínima, à menor cota alcançada dentre os poços profundos presentes na área (700 mNM), partindo do pressuposto que a esta profundidade as fraturas do gnaiss do Complexo Belo Horizonte já estariam fechadas suficientemente para caracterizar um fluxo nulo.

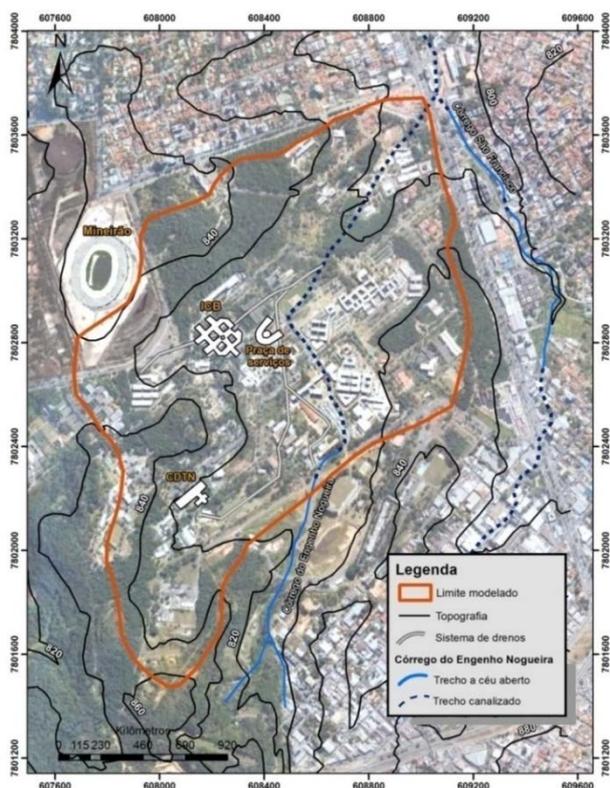


Figura 4 - Limites hidráulicos do modelo hidrogeológico conceitual (Google Earth, 2014)

Figure 4 - Hydraulic limits of the conceptual hydrogeologic model

4.2 Comportamento Hidrogeológico dos materiais

Os diferentes litotipos foram classificados, em função de suas propriedades hidráulicas, em cinco unidades hidrogeológicas, sendo duas com potencialidades hídricas pobres (aquitardes) e três de maiores potencialidades (aquíferos), conforme apresentado na Tabela 1 e na Figura 5.

Foi considerada uma espessura média do manto de intemperismo (depósitos sedimentares e saprólito) de 45 m a 50 m, correspondentes às porções mais elevadas e áreas de várzea, respectivamente.

Os materiais inconsolidados de texturas argilo-arenosa e areno-argilosa sobrepostos ao saprólito conformam os aquíferos argilo-arenoso, areno-argiloso e saprólito, respectivamente (Figura 5).

Tabela 1 - Correlação dos litotipos e das unidades hidrogeológicas com os respectivos intervalos de K (condutividade hidráulica)

Table 1 - Correlation of rock types and hydrogeological units with the respective K intervals (hydraulic conductivity)

Unidade Geológica	Litotipo	Intervalo de K (cm/s)	Unidade hidrogeológica	Sistema aquífero
Cobertura sedimentar	Solo argilo-arenoso	$10^{-6} \leq K \leq 10^{-4}$	Aquífero argilo-arenoso	
	Lentes de argila orgânica	$10^{-9} \leq K \leq 10^{-6}$	Aquitarde argila orgânica	Sistema Aquífero Granular (poroso)
Complexo Belo Horizonte	Manto de intemperismo	Solo areno-argiloso	$10^{-6} \leq K \leq 10^{-4}$	Aquífero areno-argiloso
		Saprólito de gnaiss	$10^{-4} \leq K \leq 10^{-3}$	Aquífero saprólito
	Diques metabásicos	$10^{-9} \leq K \leq 10^{-5}$	Aquitarde gnaiss Belo Horizonte	Sistema Aquífero Fissural (fraturado)
	Veio de quartzo	$10^{-7} \leq K \leq 10^{-2}$		
	Gnaiss são	$10^{-7} \leq K \leq 10^{-2}$		

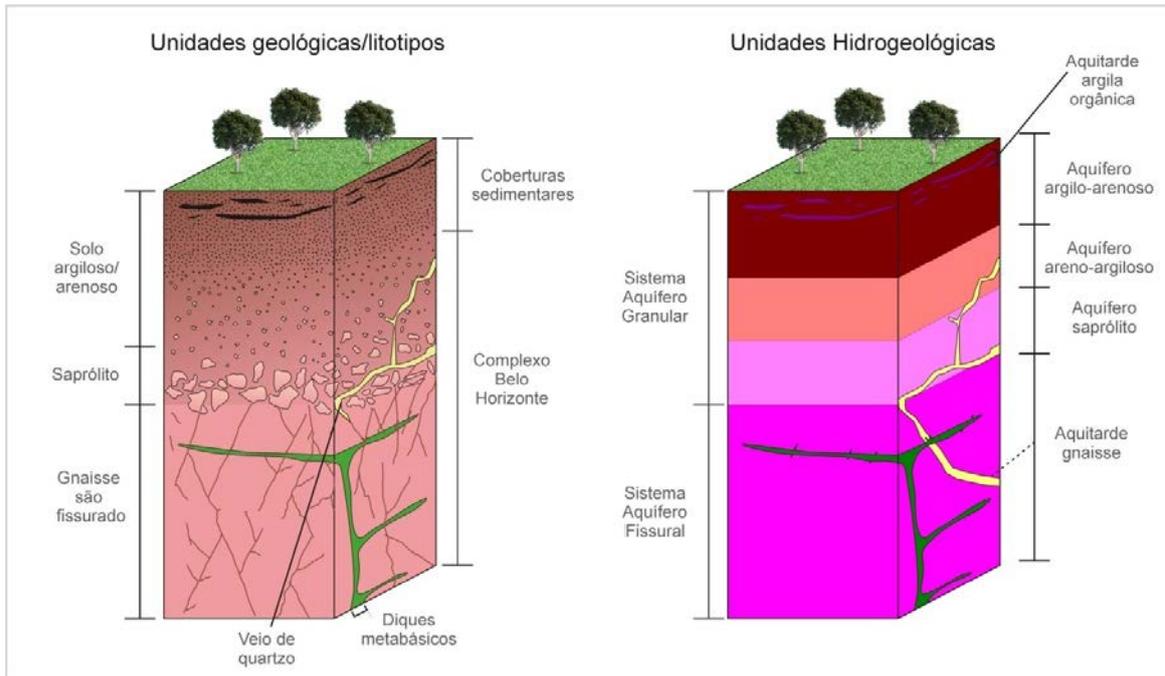


Figura 5 - Correlação entre a geologia da área e as unidades hidrogeológicas estabelecidas
Figure 5 - Correlation between the geology of the area and hydrogeological units

Destacam-se as lentes de argila cinza escuro a negras intercaladas no solo argilo-arenoso, próxima do CEN, chegando a aproximadamente 15 metros de espessura na localidade do P11. Ela provoca retardo na recarga para as partes mais profundas, resultando em aquíferos suspensos localizados, tendo sido identificada, portanto, como aquitarde.

O sistema aquífero fraturado, representado pelas rochas granito-gnáissicas são fraturadas (aquitarde gnáissico), com eventuais intrusões de diques de diabásio e veios de quartzo, apresenta-se ora livre ora semiconfinado. Perfis litológicos de poços profundos (*e.g.*, P4, P9, P10) mostram a presença de fraturas até 95 metros de profundidade, isto é, até a cota de 700 mNM. A partir desta cota, devido à ausência ou à ínfima abertura de fraturas, considera-se que a rocha se comporte como aquífugo ou aquíclude respectivamente.

As intrusões de diques metabásicos interceptadas pelos poços profundos (*e.g.*, P4, P10) foram encontradas em profundidade, somente na região SE e N e, devido a sua ocorrência restrita, considerou-se ter um papel irrelevante na compartimentação dos sistemas aquíferos. Já os veios de quartzo, encontrados aflorantes na porção centro-norte e a norte,

possuem fraturas abertas com uma permeabilidade elevada, no entanto, sua ocorrência restrita e descontínua limita a sua classificação como aquífero.

Deve-se ressaltar que o sistema aquífero fraturado foi abordado como um meio poroso equivalente (MPE), no qual as porosidades primária e secundária e a condutividade hidráulica são substituídas por um meio contínuo de propriedades hidráulicas equivalentes.

O solo indiferenciado (argilo-arenoso/areno-argiloso) possui uma porosidade efetiva de 4,6% (DGeo, 2014), enquanto que, ao saprólito e ao gnaisse são foram atribuídos valores inferiores, de 1,0% e 0,05%, respectivamente, conforme faixa de valores apresentados em Domenico e Schwartz (1998) para cristalino fraturado, e Croff *et al.* (1985 *apud* Domenico e Schwartz, 1998) para granitos.

4.3 Dinâmica de circulação, recargas e descargas

Conforme observado por Ribeiro (2013), devido à elevada conexão hidráulica entre os dois sistemas aquíferos, granular e fraturado, a água infiltrada recarrega em menos de um dia o aquífero fissural. Por isso, os

níveis d'água de poços tubulares e de monitoramento foram considerados como parte de uma mesma potenciometria.

A recarga direta no aquífero granular depende essencialmente da ocupação do solo (porte da vegetação, grau de impermeabilização) e da textura do material. Foram definidas cinco zonas de recarga, baseando-se nos estudos específicos de Ribeiro (2013).

- Zonas de baixa elevação (798 a 835 mNM), com grande quantidade de prédios, gramas, paralelepípedos. Recarga de 20-30% da precipitação.
- Zonas elevadas (cotas até 850 mNM) composta por gramados e algumas construções. Recarga de 30-35% da precipitação.
- Regiões com construções, gramados e paralelepípedos de altas cotas altimétricas (entre 816 e 836 mNM) e localizadas na porção leste da área estudada, próximo à Avenida Antônio Carlos. Recarga de 25-35% da precipitação.
- Talvegue do córrego do Engenho Nogueira na área norte, menor elevação da área de estudo (abaixo de 803 mNM). Está presente no subsolo porções de argila orgânica em espessuras consideráveis que impedem a rápida infiltração. Recarga de 8-15% da pre-

cipitação.

- Zonas de cotas altimétricas superiores na bacia (entre 820 a 860 mNM) com cobertura densa de árvores. Recarga de 20-25% da precipitação.

Nas porções de talvegue da área foi instalado um sistema de drenos para escoamento das águas subterrâneas, ou seja, foi considerada como uma zona de descarga, classificada no modelo como Grupo 1.

Praticamente todo o CEN que atravessa a área encontra-se canalizado em tubulações variadas, as quais apresentam rachaduras em sua estrutura. Por isso, foi atribuído às galerias do CEN um contorno de baixa descarga sob a nomenclatura Grupo 2.

A descarga subterrânea ocorre também através do bombeamento por poços tubulares profundos: o P3 (localizado no CDTN), P5 e P6 (ambos localizados no COLTEC – ver Figura 3).

A Figura 6 ilustra esquematicamente o modelo conceitual com o posicionamento das unidades hidrogeológicas, dinâmica de fluxo e entradas e saídas de água do sistema.

De uma maneira geral, o fluxo de água subterrânea acompanha a topografia, sendo este direcionado das porções mais altas para os drenos e para a região do talvegue do CEN que seguem para norte, em direção à Avenida Presidente Antônio Carlos (Figura 7).

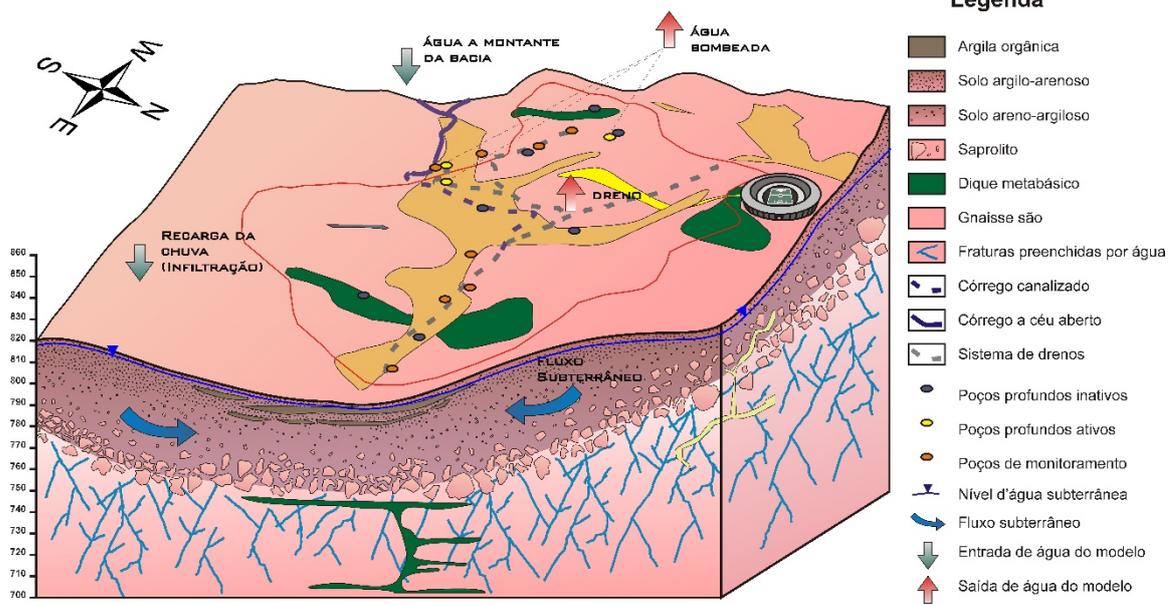


Figura 6 - Blocodiagrama esquemático do modelo conceitual e do balanço hídrico. Nota: Blocodiagrama rebatido no mapa geológico de Nuclebrás (1979). A superfície não exhibe rochas aflorantes
Figure 6 - Schematic block diagram of the conceptual model and the water balance

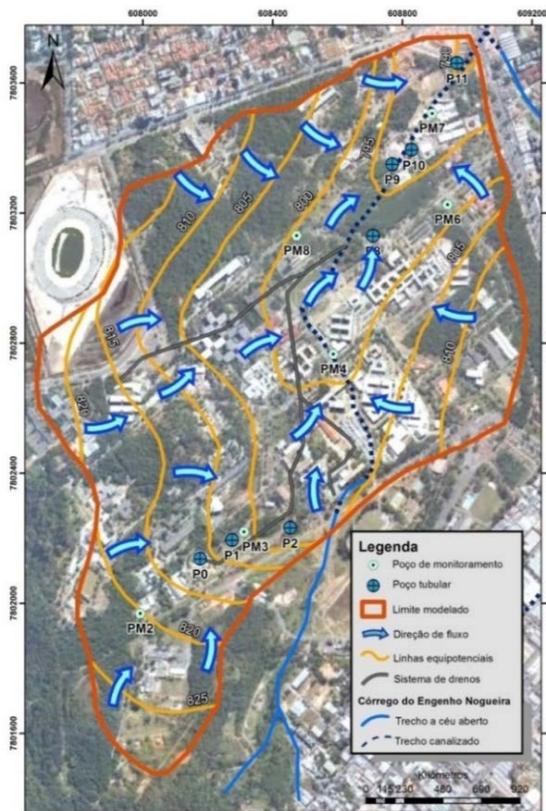


Figura 7 - Mapa potenciométrico com indicação de direção de fluxo concebido conceitualmente a partir de informações dos poços profundos e de monitoramento (Imagem do Google Earth, 2014)

Figure 7 - Potentiometric map with flow direction designed from water level of pumping and observations wells

5 DESENVOLVIMENTO E RESULTADOS DA MODELAGEM DE FLUXO DA ÁGUA SUBTERRÂNEA

5.1 Definição da malha do modelo

O dimensionamento da malha do modelo foi representado tridimensionalmente por uma área de 3,86 Km², com topo e base limitados a 862 e 700 mNA, respectivamente, e polígono limitado pelas coordenadas N-607640/E-7801350 e N-609230/E-7803780. Para tanto, a malha foi composta por 159 colunas e 243 linhas e 21 camadas, resultando em 811.377 células com as dimensões em planta de 10m x 10m.

5.2 Condições de contorno

O delineamento do modelo numérico levou em consideração todos os contornos físicos e hidráulicos definidos no modelo conceitual, adquirindo a mesma configuração da bacia delimitada. Em relação às cotas altimétricas, as cotas mínima e máxima da bacia foram as estabelecidas no dimensionamento da malha, sendo estas limitadoras para uma condição de fluxo nulo.

5.3 Recarga

Baseando-se nos desníveis topográficos, tipologia dos materiais em subsuperfície e no estudo de Ribeiro (2013), foram definidas cinco zonas na área modelada com diferentes valores de recarga (Figura 8).

A Tabela 2 mostra o intervalo de valores de recarga permitido para se realizar a calibração e seus valores finais. A recarga variou de 20% a 35% da precipitação anual, à exceção das porções a norte da área, que, em função da presença da espessa lente de argila orgânica, apresentou valores próximos entre 7% e 8% da precipitação anual.

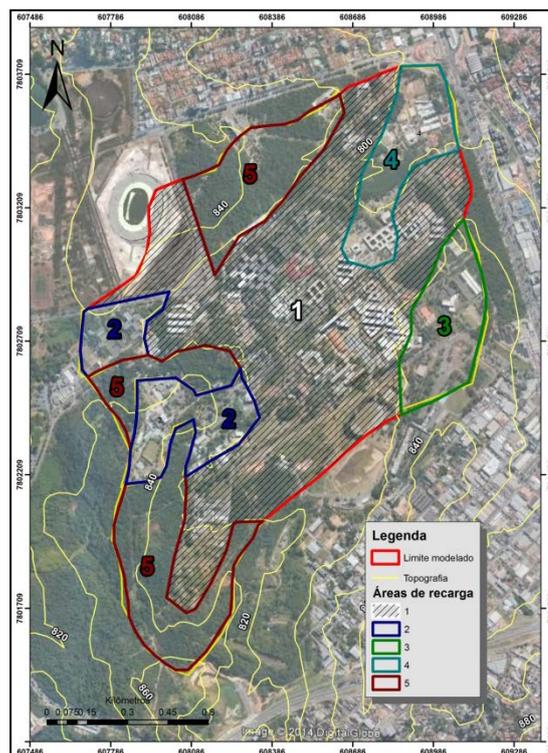


Figura 8 - Zonas de recarga classificadas no modelo numérico (Imagem do Google Earth, 2014)

Figure 8 - Recharge zones in the numerical model

Tabela 2 - Códigos do modelo numérico associados às zonas de recarga. Intervalos definidos no modelo conceitual com a precipitação média de 1.333,6 mm/ano

Table 2 - Codes of the numerical model associated with the recharge areas. Set intervals in the conceptual model with average rainfall of 1,333.6 mm/year

Código da cor	Cor	Intervalo de recarga	Valores obtidos pela calibração (mm/ano)
1		20-30%	280
2		30-35%	400
3		25-35%	390
4		8-15%	100
5		20-25%	270

5.4 Drenos

Conforme apresentado na Figura 9, tanto o sistema de drenos propriamente dito (Grupo 1) quanto o canal do CEN (Grupo 2)

foram concebidos como saída de água do sistema. Ambos foram colocados na camada 2, devido sua posição em subsuperfície e sendo calibrados com valores de condutância de 50 m²/dia e 30 m²/dia, respectivamente.

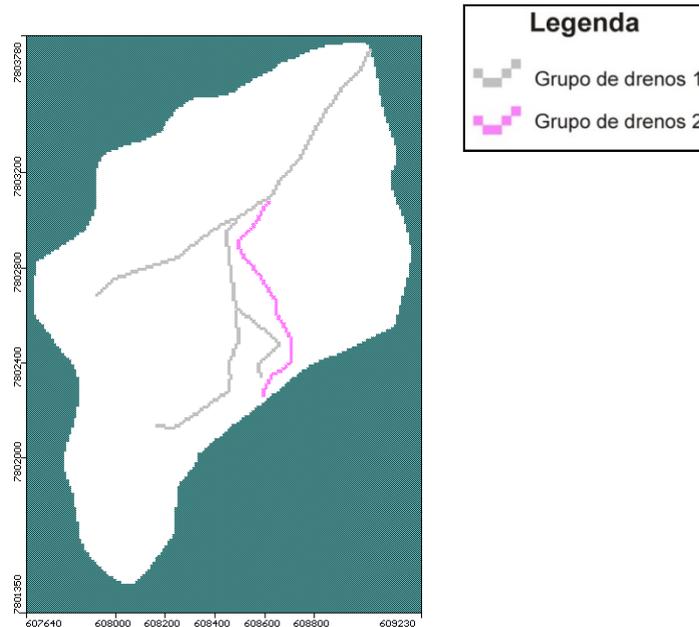


Figura 9- Traçado dos drenos no modelo numérico. Visão da camada 2 (Figura extraída do modelo construído no *MODFLOW*)

Figure 9 - Drains in the numerical model. Layer 2 view

5.5 Condição de contorno geral de 3º tipo (GHB)

O limite sul do modelo não seguiu os moldes da bacia do CEN, tendo sido excluída uma porção à montante que acrescenta uma vazão subterrânea à bacia estudada. A condição de contorno do tipo GHB foi utilizada para simular a entrada do fluxo subterrâneo oriundo da porção a montante da bacia do CEN para dentro da área de estudo. O GHB teve sua condutância calibrada de modo que o fluxo de entrada calculado pelo modelo fosse próximo do valor obtido por meio dos cálculos manuais da lei de Darcy.

Obteve-se o valor aproximado de 201 m³/dia de fluxo oriundo da porção da bacia a montante da área modelada, assim, o GHB inserido no modelo foi calibrado com a condutância de 0,35 m²/dia, adicionando no modelo a vazão de 206 m³/dia.

5.6 Condutividade hidráulica

As cinco unidades hidrogeológicas diferenciadas no modelo conceitual foram representadas no modelo numérico por sete códigos (Tabela 3) e os valores finais de calibração encontram-se apresentados na mesma tabela.

Tabela 3 - Atribuição dos códigos de cor no modelo numérico para cada unidade hidrogeológica

Table 3 - Color codes in the numeric model for each hydrogeological unit

Código da cor Cor	Sistema aquífero	Unidade hidrogeológica	Litotipo	Intervalo de Condutividade Hidráulica (cm/s)*	Valor de calibração [cm/s]		
					Kx	Ky	Kz
5	Sistema Aquífero Granular (poroso)	Aquífero argilo-arenoso	Argila-arenosa	$10^{-6} \leq K \leq 10^{-4}$	$6,5 \times 10^{-04}$	$6,5 \times 10^{-04}$	$5,0 \times 10^{-04}$
6		Aquitarde argila orgânica	Argila orgânica	$10^{-9} \leq K \leq 10^{-6}$	$9,0 \times 10^{-06}$	$9,0 \times 10^{-06}$	$8,0 \times 10^{-06}$
27		Aquífero areno-argiloso	Areia-argilosa	$10^{-6} \leq K \leq 10^{-4}$	$8,0 \times 10^{-04}$	$8,0 \times 10^{-04}$	$7,0 \times 10^{-04}$
28		Aquífero saprólito	Saprólito	$10^{-4} \leq K \leq 10^{-3}$	$1,0 \times 10^{-04}$	$1,0 \times 10^{-04}$	$1,0 \times 10^{-04}$
3	Sistema Aquífero Fissural (fraturado)	Aquitarde gnáissico	Metabásica	$10^{-9} \leq K \leq 10^{-5}$	$1,0 \times 10^{-06}$	$1,0 \times 10^{-06}$	$1,0 \times 10^{-06}$
29	Veio de quartzo		$10^{-7} \leq K \leq 10^{-2}$	$2,0 \times 10^{-03}$	$2,0 \times 10^{-03}$	$2,0 \times 10^{-03}$	
14	Gnaisses são		$10^{-7} \leq K \leq 10^{-2}$	$3,0 \times 10^{-05}$	$3,0 \times 10^{-05}$	$3,0 \times 10^{-05}$	

*Faixa de valores definida no modelo conceitual. Fonte: Domenico e Schwartz (1998), Fetter (1994)

5.7 Poços de observação

Os valores de nível d'água de 7 poços tubulares inativos e de 6 poços de monitoramento foram considerados para a calibração do modelo numérico no regime permanente (Figura 10). As cargas hidráulicas do modelo numérico para calibração foram obtidas através da média aritmética dos dados do período seco do ano 2000. Ressalta-se que, além dos poços em funcionamento (P3, P5 e P6), o PM1 também não foi utilizado na construção do modelo devido sua alta influência pelo bombeamento do poço P3.

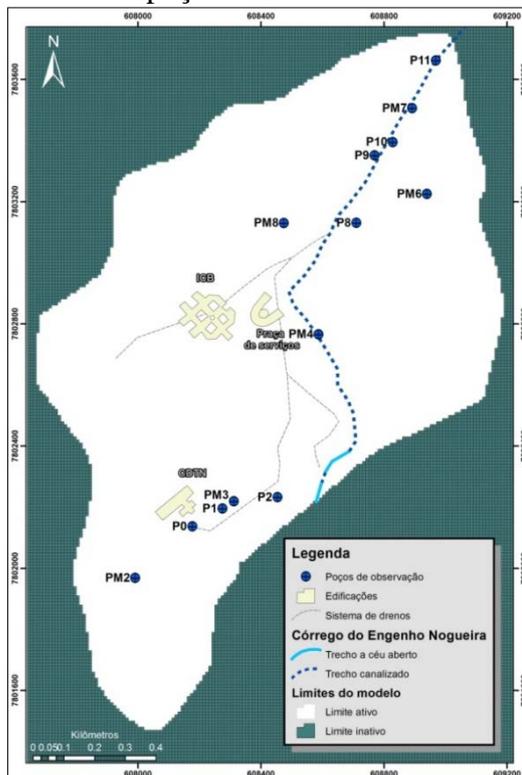


Figura 10 - Localização dos poços de observação dentro do modelo numérico (Modificado do modelo construído no MODFLOW)

Figure 10 - Observation wells in the numerical model

5.8 Erros da calibração

A calibração do modelo foi realizada segundo o método de tentativa e erro, ajustando progressivamente os parâmetros de calibração segundo critérios estabelecidos no modelo hidrogeológico conceitual.

A Figura 11 e a Tabela 4 apresentam as cargas hidráulicas calculadas para o modelo numérico para cada um dos treze pontos de observação. O coeficiente de correlação entre os valores calculados e observados ao final da calibração foi de 0,993, sendo os erros conforme a seguir: 1,289 m para média residual; 1,432 m para a média residual absoluta; 1,697 de RMS; e, 5,476% para o RMS normalizado. Este nível de erro correspondeu à melhor situação de calibração.

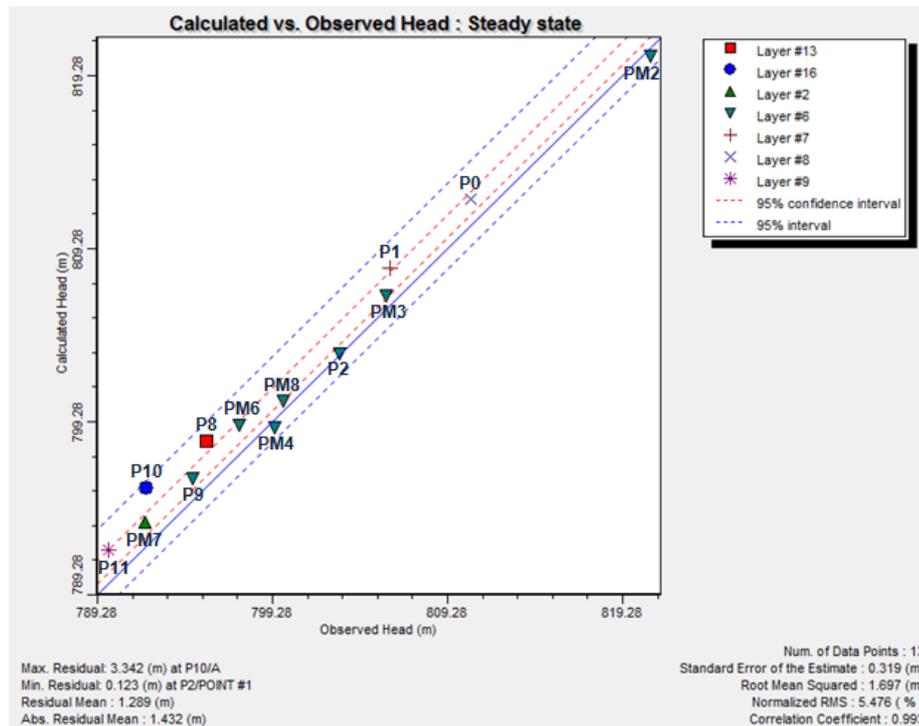


Figura 11 - Gráfico dos níveis d'água medidos em campo versus calculado na calibração do modelo (Extraído do MODFLOW)

Figure 11 – Diagrams of the water levels measured in the field versus calculated in the model calibration

Tabela 4 - Diferença entre os valores medidos e calculados e sua representação gráfica

Table 4 - Difference between the measured and calculated values and its graphical representation

Ponto	Carga hidráulica (m)		C - O
	Observada (O)	Calculada (C)	
P0	810,60	812,2	1,6
P1	806,00	808,2	2,2
P2	803,10	803,2	0,1
P8	795,50	798,2	2,7
P9	794,70	796,0	1,3
P10	792,10	795,4	3,3
P11	789,90	791,8	1,9
PM2	820,90	820,4	-0,5
PM3	805,80	806,6	0,8
PM4	799,40	799,0	-0,4
PM6	797,40	799,1	1,7
PM7	792,00	793,5	1,5
PM8	799,90	800,5	0,6

Apesar de estar dentro do padrão aceitável, observa-se nos resultados que os pontos P8 e P10 se afastam da tendência dos demais. Estes poços de observação apresentaram diferenças entre os valores calculados e medidos de 2,7 e 3,3 metros, respectivamente. É possível que este comportamento tenha ocorrido devido à posição mais profunda das seções filtrantes de ambos os poços em relação aos demais em virtude da grande proporção de argila orgânica que ocorre nos primeiros 14 metros do solo. A posição dos filtros nestes

casos delimitou a zona principal de entrada d'água entre o saprólito e o gnaiss são, o que resultou em cargas potencial hidráulica diferentes em relação aos demais poços avaliados.

O balanço de massa nesta calibração apresentou uma discrepância aceitável, de 0,12% (Figura). Apesar de estar dentro do padrão aceitável, observa-se nos resultados que os pontos P8 e P10 se afastam da tendência dos demais. Estes poços de observação apresentaram diferenças entre os valores calculados e medidos de 2,7 e 3,3 metros, respectivamente. É possível que este comportamento tenha ocorrido devido à posição mais profunda das seções filtrantes de ambos os poços em relação aos demais em virtude da grande proporção de argila orgânica que ocorre nos primeiros 14 metros do solo. A posição dos filtros nestes casos delimitou a zona principal de entrada d'água entre o saprólito e o gnaiss são, o que resultou em cargas potencial hidráulica diferentes em relação aos demais poços avaliados.

O balanço de massa nesta calibração apresentou uma discrepância aceitável, de 0,12% (Figura).

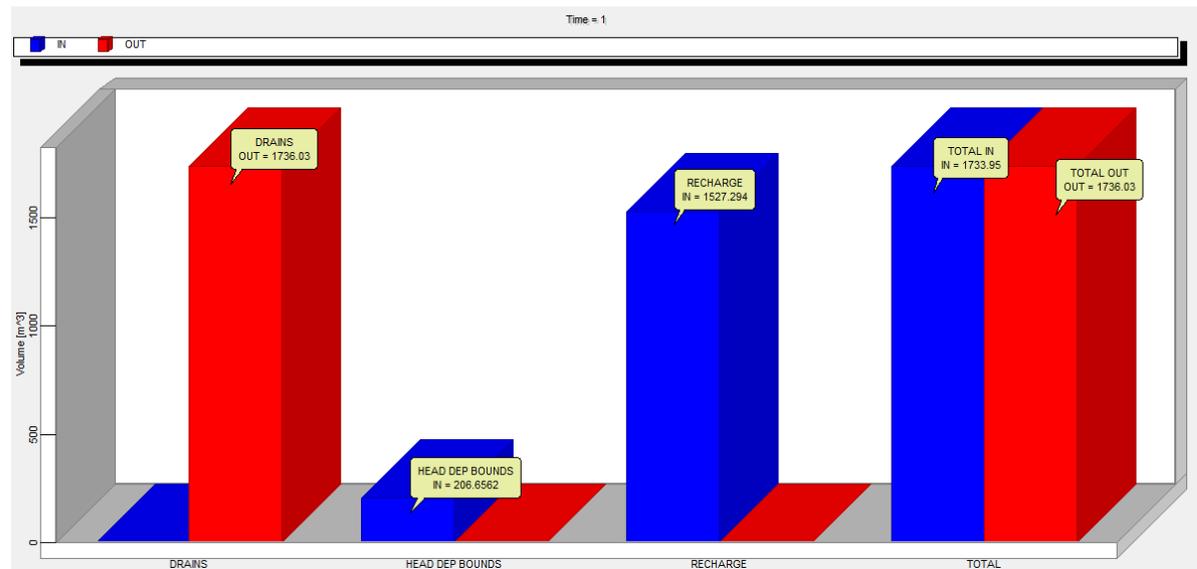


Figura 12 - Balanço de massa do modelo numérico (Figura extraída do *MODFLOW*)

Figure 12 - Mass Balance of the numerical model

A Figura apresenta a comparação entre as linhas equipotenciais resultantes da calibração e as confeccionadas no modelo conceitual, constatando-se várias semelhanças e algumas diferenças em suas morfologias. As disparidades ocorreram principalmente nas porções nas quais não existiam pontos medidos e as equipotenciais do modelo conceitual foram interpretadas sem referência. Em ambas as figuras o fluxo se desloca das partes de maiores elevações topográficas para as porções de várzea, onde estão dispostos os drenos, retratando uma forte influência do relevo e das condições de contorno no fluxo.

As incertezas do modelo podem ser atribuídas nas informações duvidosas a respeito: da localização e detalhes do funcionamento do sistema de drenos; das tubulações da galeria do CEN e sua atuação como drenos; da base do sistema fraturado na cota 700 metros,

bem como na atribuição de meio poroso equivalente e sua condutividade hidráulica típica de aquífero.

4.1 Simulação numérica do transporte de partículas

Os poços tubulares avaliados nesta simulação foram os ativos no CDTN e na UFMG (P3, P5 e P6) e os poços cuja exploração de água está sendo considerada para complementar o abastecimento dentro da UFMG nos próximos anos (P8, P9 e P10).

A atribuição de valores de vazão para cada poço levou em consideração os testes de bombeamento realizados em março de 2015 nos poços da UFMG e em dezembro de 2012 no P3, do CDTN (Tabela 5). O tempo de operação considerado para cada um dos poços foi de 10 horas por dia.

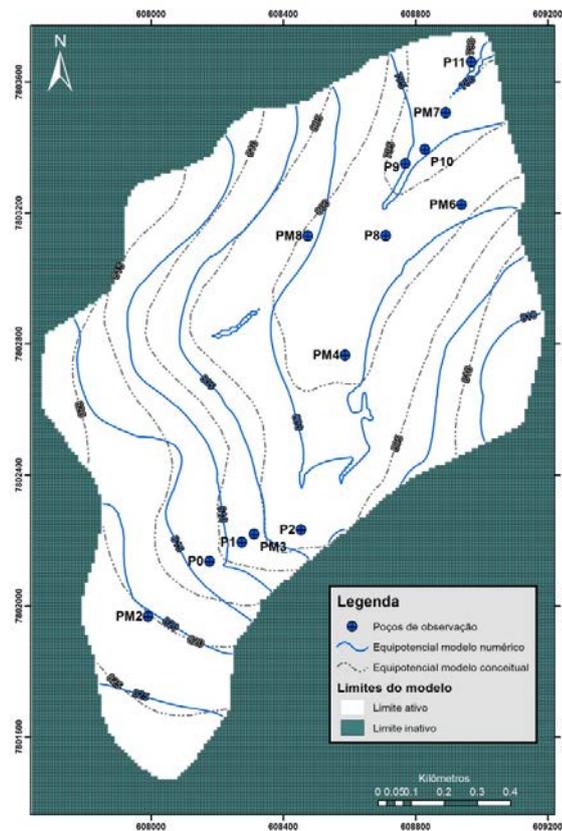


Figura 13 - Potenciometria resultante da calibração do modelo numérico em comparação com as confeccionadas no modelo conceitual (Modificado dos resultados extraídos do *MODFLOW*)

Figure 13 - Water Table resulting from the numerical model calibration compared to the equipotential lines of the conceptual model

Tabela 5 – Vazão, tempo de bombeamento previsto e conversão para exploração diária dos poços

Table 5 – Flow, pumping time and conversion to daily operation of wells

Poços	Coordenadas (m) – UTM (SAD 69)		Vazão de teste m ³ /h	Tempo de bombeamento previsto (h)	Volume total em 10 horas (m ³)	Volume diário(m ³ /dia)
	X	Y				
P3	608135	7802290	9,3*	10	93	93
P5	608615	7802345	19,0		190	190
P6	608590	7802430	26,0		260	260
P8	608710	7803130	11,5		115	115
P9	608770	7803351	6,3		63	63
P10	608829	7803394	5,0		50	50
TOTAL					771	

*Valor obtido em teste de vazão realizado em 2012 realizado por Hidropoços (2012, *apud*: Ribeiro, 2013)

Foram inseridas 10 partículas radialmente ao redor dos poços-alvos e selecionado o método de “*backward tracking*”, para determinar a proveniência da água subterrânea/partícula que chega ao ponto-alvo conhecido e quanto tempo ela levou para chegar até este ponto.

Os valores de porosidade efetiva nos meios aquíferos foram atribuídos conforme

descrito no modelo conceitual: 4,6% para as porções rasas do solo, 1,0% para o saprólito de gnaiss e 0,05% para o gnaiss são.

A simulação do transporte de partículas foi realizada no regime permanente. O erro entre as entradas e saídas de água foi de 0,03%, conforme balanço de massa apresentado na Figura .

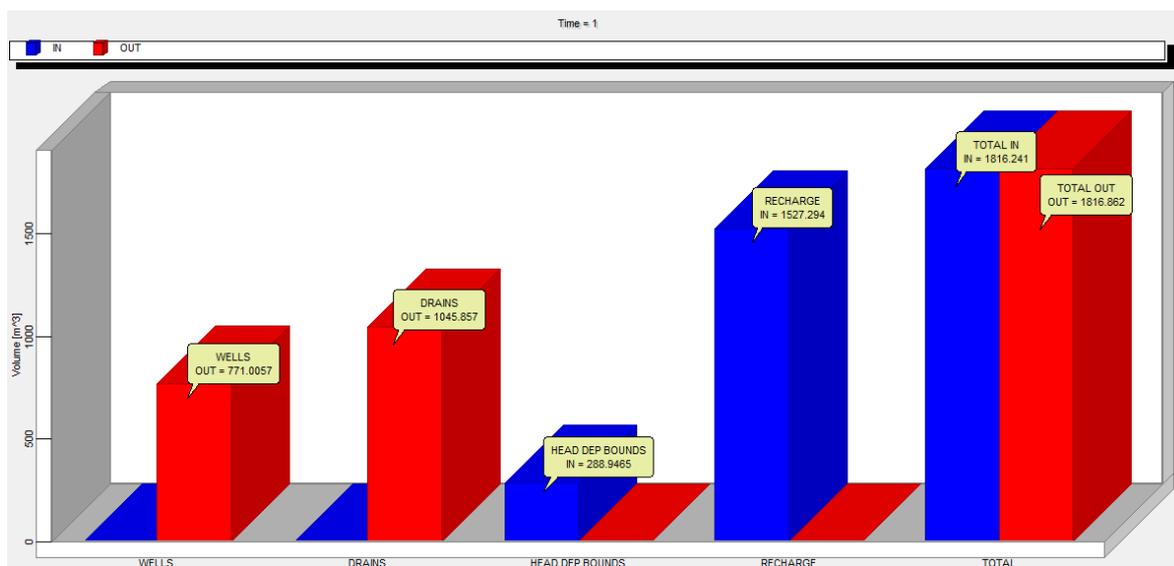


Figura 14 – Balanço de massa da simulação de transporte de partículas (Gerado pelo MODFLOW)
Figure 14 - Mass balance of the particle transport simulation

As saídas de fluxo compreenderam os poços tubulares, que bombearam 771 m³/dia e os drenos, que retiraram um fluxo de 1.046 m³/dia. Os drenos extraíram aproximadamente 690 m³/dia de água a menos que no modelo de fluxo em virtude do rebaixamento da carga hidráulica causado pelo bombeamento dos poços e consequente redução de suas funções drenantes.

O GHB nesta simulação adicionou cerca de 80 m³/dia de massa em relação ao modelo de fluxo calibrado. Este resultado é considerado plausível, já que, devido à proximidade desta condição de contorno com os dois poços de maior bombeamento no modelo (P5 e P6, de 260 e 190 m³/dia, respectivamente), as linhas equipotenciais se tornaram mais próximas nesta área, aumentando a velocidade do fluxo, e, conseqüentemente, a contribuição do GHB.

A Figura apresenta os poços tubulares e suas zonas sensíveis à contaminação, ou zonas de transporte, onde são ilustrados os caminhos das partículas referentes aos anos 1, 2, 3, 4, 5, 10, 20, considerando o ponto de partida do transporte na região dos filtros dos poços de bombeamento. Pode-se observar que, em geral, os locais de atenção localizam-se nas regiões de fluxo a montante dos poços de bom-

beamento, no entanto, existe a ocorrência de inversão de fluxo, conforme pode ser observado principalmente nos poços P6, P8 e P10.

Tanto o P9 quanto o P10 possuem áreas de proteção bastante semelhantes, ocorrendo nas margens esquerda e direita do córrego.

O P8 apresentou uma zona de proteção mais espalhada na margem direita do córrego. Na margem esquerda, a zona de transporte tem início nas proximidades da Unidade Administrativa 2 (UA2).

A zona de transporte do poço P6 chamou atenção devido às várias porções que podem comprometer a qualidade química de sua água, sendo elas: porção a montante da bacia não contemplada na área modelada; extremo sul da área modelada; região a norte do CDTN passando pelo Departamento de Química (DQ); área do CDTN; e região a sul da FAE. Isso pode ser atribuído à maior vazão deste poço, envolvendo fluxos subterrâneos de um raio maior de distância.

O P5, que está localizado próximo ao limite SE do modelo, possuiria suas águas contaminadas por regiões a montante da área do modelo ou até mesmo pelo córrego, que não se encontra canalizado nesta porção.

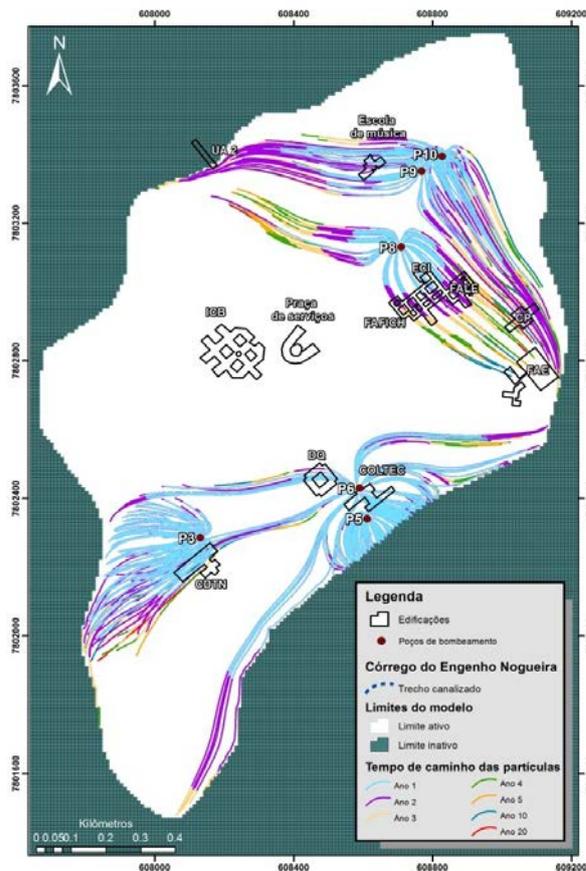


Figura 15 – Caminho inverso das partículas, partindo dos poços tubulares nos anos 1, 2, 3, 4, 5, 10 e 20. (Modificado dos resultados extraídos do *MODFLOW*)

Figure 15 - Reverse path of the particles, leaving the wells in years 1, 2, 3, 4, 5, 10 and 20

O P3, que já se encontra em uma cota mais elevada dentro do CDTN, tem sua zona de proteção bem concentrada a montante do poço. A Figura mostra, em planta, a linha de trajetória de partículas referente a uma determinada duração de tempo indicado por sua cor, induzindo à conclusão de que as partículas são muito mais rápidas nos primeiros anos que nos últimos. No entanto, as linhas desta figura mostram apenas a trajetória da partícula projetada em planta, e não a trajetória inteira, considerando o eixo z.

Conforme pode ser observado na Figura, o tempo de residência das partículas que entram na região mais afastada é bem maior até que cheguem às seções filtrantes dos poços, pois percorrem as porções mais profundas do aquífero para depois alcançar a área de descarga dos poços tubulares.

Além disso, as menores porosidades efetivas das unidades hidrogeológicas localizadas em maiores profundidades acrescentam um retardo maior em relação às partículas que percorrem somente as porções superiores.

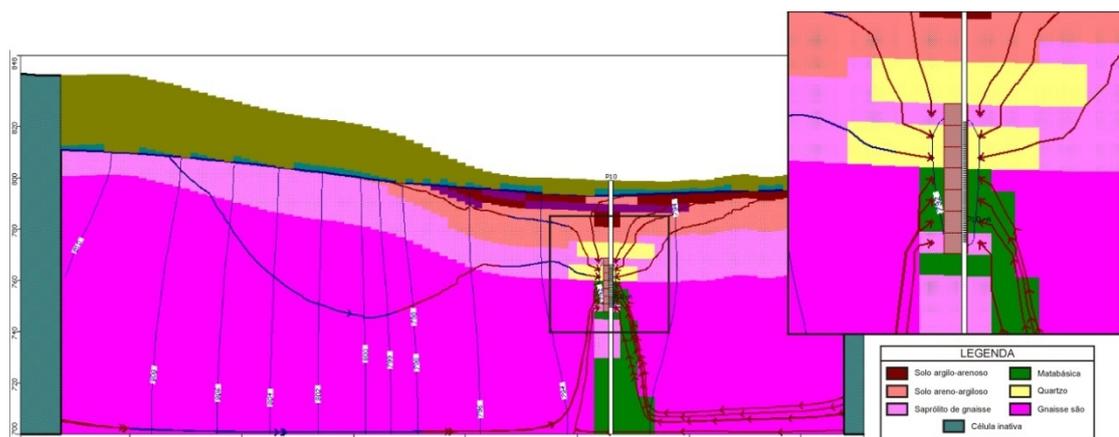


Figura 16 - Visão da linha 136 com as partículas em regime permanente. Exagero vertical de 2x (Gerado pelo *MODFLOW*)

Figure 16 - Line 136 with the particles in permanent operation

5 CONCLUSÕES

A modelagem hidrogeológica numérica se mostrou satisfatória na sistematização

e reprodução das informações obtidas ao longo dos anos e contempladas no modelo hidrogeológico conceitual. Dois poços se mostraram com erros maiores que os demais, fator

atribuído à posição dos filtros em uma porção diferente do aquífero, devido à camada de argila orgânica plástica posicionada nas porções superiores.

A vazão de 771 m³/dia considerada para a exploração dos poços equivale a aproximadamente 50% da recarga anual direta por chuva da área avaliada. A fim de respaldar as decisões administrativas, tal valor deve ser tomado como uma primeira referência para que o sistema aquífero da bacia não seja submetido a uma super exploração, a qual poderia

inviabilizar a longevidade de alguns poços de bombeamento.

A simulação de transporte advectivo indicou as áreas vulneráveis à contaminação que podem atingir os poços, sendo elas basicamente as porções a montante dos poços e em suas regiões a jusante próximas, onde o fluxo pode ser invertido com o bombeamento. Contaminantes dispostos em áreas distantes dos poços até mais de um quilômetro podem afetar a qualidade da água bombeada em poucos anos.

REFERÊNCIAS

- ANDERSON, M. P. e WOESSNER, W. W. **Applied Groundwater Modeling** - Simulation of Flow and Advective Transport. Montana: Academic Press, 1992.
- BEATO, D. A. C. (org). Projeto Pampulha: Estudo hidrogeológico da bacia da Pampulha. Belo Horizonte. CPRM/PHB/P, 2001.
- BEATO, D. A. C.; MEDEIROS; M. J. ; DREWS, M. G. P. & DUTRA, G M. **Impactos Urbanos em Águas Subterrâneas**: Bacia da Lagoa da Pampulha, Belo Horizonte - MG. Belo Horizonte. Revista água subterrânea, n° 17, 2003.
- CARVALHO FILHO, C. A. **Caracterização Hidrodinâmica de Parte do Sistema Aquífero da Bacia do Campus** – UFMG/ Belo Horizonte, Minas Gerais. 1997. 162 p. Dissertação de mestrado, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Sanitária e Ambiental, Faculdade de Engenharia, Universidade Federal de Minas Gerais.
- DGEO GEOLOGIA AMBIENTAL. **Relatório Final**. Belo Horizonte. 2014. Avaliação Ambiental da área do posto de combustível do campus da UFMG para descomissionamento. Fundep.
- FETTER, C. W. **Applied Hydrogeology**. 3rd Edition. Pearson. Prentice Hall. 1994. 691p.
- GOOGLE EARTH IMAGES. **Consultado em maio de 2014**.
- INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA - IBGE. **Localização geográfica dos municípios pertencentes a Região Metropolitana de Belo Horizonte**. 2007. Download a partir do site do IBGE: www.ibge.gov.br
- INSTITUTO MINEIRO DE GESTÃO DAS ÁGUAS - IGAM. **Unidades de Planejamento UPGRHS**. 2009. em: <<http://portalinfohidro.igam.mg.gov.br/download/mapoteca/basescartograficas/unidades-de-planejamento-upgrhs/5174-upgrhs2009>>.
- INSTITUTO NACIONAL DE METEOROLOGIA – INMET. **Dados climatológicos da estação Belo Horizonte 83587**. Acessado em <http://www.inmet.gov.br>, em 25 de outubro de 2015.
- MENDES, C. M., MENDES, P., BRANCO, J. J. R., COELHO, I. S. **Estudo geológico da área da Cidade Universitária**. Relatório do Instituto de Pesquisas Radioativas, Escola de Engenharia, UFMG. Belo Horizonte. 1960.
- NOCE, C. M.; MACHADO, N.; TEIXEIRA, W. **O Complexo Belo Horizonte e a evolução arqueana do Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais**. In: 38° Congresso Brasileiro de Geologia, 1994, Camboriú – SC, Anais, p.68-69.
- Nuclebrás. **Relatório de Análise de Segurança da Usina Piloto de Enriquecimento**. Nuclebrás/CDTN, Belo Horizonte. Anexo: Mapas das áreas-cidade Universitária – BH. Mapa Geológico 1:5000. 1979.
- POLLOK D. W. **User's Guide for MODPATH/MODPATH-PLOT, Version 3**: A Particle tracking postprocessing package for MODFLOW, the U.S. Geological Survey finite-difference ground-water flow model. US Geological Survey Open-File Report 94-464, 6ch. 1994. 242p.
- PROJETO MANUELZÃO. **Escolas Federais, Estaduais e Municipais na Bacia do Córrego do Engenho Nogueira**. 2004. Acesso em maio 2014 em http://www.manuelzao.ufmg.br/publicacoes/biblioteca_virtual/mapas/mapas_bacia_onca/escolas_bacia_engenho_nogueira
- RIBEIRO, J. P. M. **Análise da recarga no sistema aquífero granular e fissural no campus da UFMG**. Belo Horizonte, 2013. 120 p. Dissertação de mestrado, Instituto de Geociências, Universidade Federal de Mi-

nas Gerais.

SECRETARIA MUNICIPAL DE OBRAS E INFRA-ESTRUTURA - SMOBI. **Tabela de área representando as Bacias Hidrográficas de Belo Horizonte.** 2010. Arquivo em formato shape: BHidr_SMOBI.SHP -UTM SAD 69, FUSO 23S

SILVA A. B., CARVALHO E. T., FANTINEL L. M., ROMANO A. W., VIANA C. S. **Estudos geológicos, hidrogeológicos, geotécnicos e geoambientais integrados no município de Belo Horizonte.** Relatório final, 7 anexos. Belo Horizonte. 1995. Prefeitura Municipal de Belo Horizonte, FAPEMIG/UFMG/IGC.