

XVIII CONGRESSO BRASILEIRO DE ÁGUAS SUBTERRÂNEAS

ANÁLISE DA RECARGA E DA CONEXÃO HIDRÁULICA NO SISTEMA AQUÍFERO GRANULAR- FISSURAL NO CAMPUS PAMPULHA DA UFMG - BELO HORIZONTE, MG.

João Pedro Marques Ribeiro¹; Leila Nunes Menegasse Velasques² & Carlos Alberto de Carvalho Filho³.

Resumo

Foram analisadas a recarga e a conexão hidráulica entre os aquíferos granular e fissural do sistema aquífero do campus Pampulha da UFMG, em Belo Horizonte, Minas Gerais. Na área, o aquífero granular é livre, se sobrepõe ao fissural e é constituído de aluviões, colúvios, enquanto o aquífero fissural é livre a semiconfinado, representado por gnaisses, granitos e diques de diabásio do Complexo Belo Horizonte. Foi realizado monitoramento automatizado e manual por 8,5 meses envolvendo completamente a estação chuvosa, de agosto/2012 a abril/2013. O monitoramento automatizado foi feito em 3 poços de monitoramento e 3 poços profundos, com leituras a cada 15 minutos, e o monitoramento manual foi realizado semanalmente em 2 poços profundos e em 1 poço de monitoramento. O cálculo da recarga do aquífero granular foi realizado segundo a técnica de variação do nível d'água natural. Os dados deste monitoramento foram analisados por meio de técnicas estatísticas de correlação, tendo-se identificado a influência da precipitação sobre a recarga, a caracterização da conexão hidráulica foi detalhada, estimando-se o tempo de resposta da potenciometria à precipitação de cada aquífero e o tempo gasto entre a recarga direta do meio granular e recarga indireta do meio fissural.

Palavras-Chave: Recarga direta; Conexão hidráulica; Transdutores de Pressão.

Abstract

Recharge and hydraulic connection between the granular and fractured aquifers of the aquifer system UFMG campus Pampulha in Belo Horizonte, Minas Gerais were analyzed. In the area, the granular aquifer is free, overlies the fissure and is composed of alluvium, colluvium, while the fractured aquifer is free to confined, represented by gneisses, granites and diabase dikes of Belo Horizonte complex. Automated and manual tracking was done by completely covering 8.5 months the rainy season, from August/2012 to abril/2013. Automated monitoring was done at 3 monitoring wells and 3 deep wells, with readings every 15 minutes, and the manual was monitored weekly in 2 deep wells and one monitoring well. The calculation of the granular aquifer recharge was performed according to the technique of level variation d'natural water. Data from this monitoring were analyzed using statistical correlation techniques, the influence of precipitation on the recharge having been identified, the characterization of hydraulic connection was broken, estimating the response time of the potentiometric precipitation of each aquifer and time spent between direct recharge the granular medium and indirect recharge through the fissure.

Key Words: Recharge; Hydraulic Connection; Pression Transducers.

1. INTRODUÇÃO

¹ Instituto de Geociências - UFMG, (011) 99418-6662, marquesribeiroster@gmail.com; ² Instituto de Geociências - UFMG, (031) 4995-424, menegasse@yahoo.com.br ; ³ Centro de Desenvolvimento de Tecnologia Nuclear – CDTN , (031) 3069-3351 cacf@cdtn.br.

As características climáticas, geológicas e de ocupação do solo controlam a dinâmica e a quantidade de água que recarrega os aquíferos, portanto tais conhecimentos são imprescindíveis para o gerenciamento do uso sustentável da água subterrânea.

Conceitualmente, recarga é a quantidade de água que se infiltra naturalmente no subsolo a partir de chuvas e corpos de água, ou artificialmente, por meio de atividades humanas (irrigação, perdas nas redes de abastecimento e esgoto, sistemas de tratamento de água e esgoto, etc.) até atingir o aquífero.

A quantificação da recarga indica a quantidade de água que efetivamente atinge o aquífero e o entendimento de seu processo permite identificar os elementos naturais e ou antrópicos atuantes como facilitadores ou como obstáculos à efetivação da infiltração. A proposta deste estudo compreende esses dois campos de investigação, realizados quantificando a recarga e investigando agentes geológicos atuantes neste processo, e, determinando e caracterizando a conexão hidráulica existente entre dois aquíferos constituintes do sistema aquífero a qual pertence a área de estudo.

O campus Pampulha da Universidade Federal de Minas Gerais – UFMG, no município de Belo Horizonte/MG possui uma área de 2,5 km², assenta-se sob o Domínio litoestrutural e morfológico do Complexo Belo Horizonte, constituído de rochas gnáissicas e graníticas, com espesso manto de intemperismo.

As rochas gnáissicas e graníticas provenientes do Complexo Belo Horizonte constituem, na área de estudo, ao aquífero fraturado subjacente ao aquífero granular, este composto pelo espesso manto de intemperismo presente na região de estudo.

2. LOCALIZAÇÃO E CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO

O estudo foi realizado no campus universitário da UFMG localizado na bacia hidrográfica da Pampulha, região norte da cidade de Belo Horizonte (Fig. 1). A área do campus comporta parte das sub-bacias dos Córregos Engenho Nogueira e Mergulhão, entretanto, somente a porção média da sub-bacia do Córrego Engenho Nogueira, foi alvo desse estudo.

A área está dentro das coordenadas UTM 607.200 e 609.600 Oeste, e 7.800.800 e 7.804.000 Sul, onde se encontram ainda as estruturas do Colégio Militar, o Estádio Magalhães Pinto e o CDTN (Fig. 2).

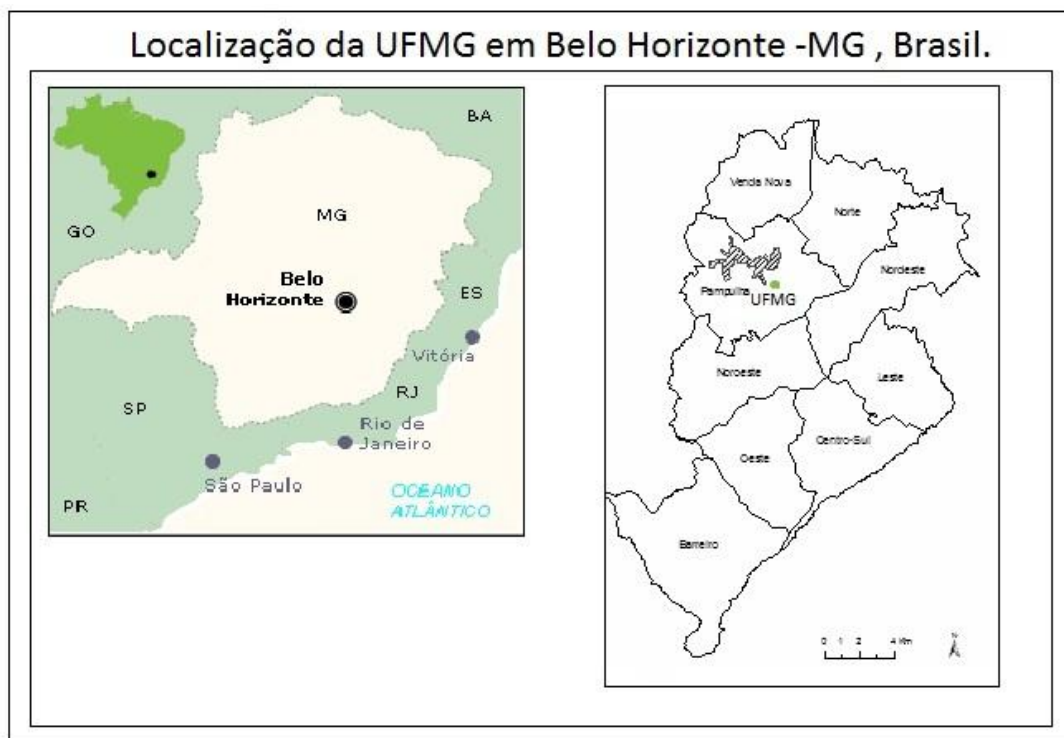


Figura 1: Localização do município de Belo Horizonte no Estado de Minas Gerais, e do campus da UFMG na cidade de Belo Horizonte.

O campus da UFMG em Belo Horizonte ocupa uma área de 3.340.000 m², dos quais 430.867 m² são de área construída, de acordo com dados do Departamento de Planejamento Físico e Projetos (DPFO), atualizados em 2013. A extensão total da área deste estudo é de 2.500.000 m².

De acordo com a reitoria da UFMG o campus Pampulha é frequentado por 30.254 alunos, 2.267 professores e 4.323 funcionários. O abastecimento hídrico do campus é feito, principalmente, pela empresa de abastecimento público de Minas Gerais – COPASA, salvo as instalações do Centro de Desenvolvimento de Tecnologia Nuclear que é abastecido por um poço tubular profundo instalado em suas dependências e dois poços do campus para abastecimento da escola de Veterinária.



Figura 2: Imagem do Campus da UFMG, com destaque para as avenidas e pontos de referência no seu entorno. Fonte: Google Earth, 2013.

O município de Belo Horizonte insere-se na grande unidade geotectônica conhecida como Cráton do São Francisco, referente ao extenso núcleo crustal do centro-leste do Brasil. Predominam as rochas arqueanas do Complexo Belo Horizonte e sequências supracrustais do período paleoproterozóico (COSTA, 2002).

O complexo Belo Horizonte é formado por rochas gnáissicas e migmatíticas parcialmente milotinizadas. Estas rochas apresentam a característica de suas fraturas serem abertas e penetrativas, mas, distantes umas das outras, resultando em pouca intercomunicação entre elas, comprometendo a capacidade específica (COSTA, 2002).

O domínio do Complexo Belo Horizonte integra a unidade geomorfológica denominada Depressão de Belo Horizonte, que representa cerca de 70% do território da capital mineira, contexto em que se encontra a área de estudo. A unidade geomorfológica em questão é caracterizada pelo predomínio de relevo pouco declivoso, com drenagem pouco encaixada. A principal característica do relevo são as colinas de topo plano a arqueado (BEATO, 2001).

Na área de estudo, o Córrego Engenho Nogueira (CEN) encontra-se canalizado na maior parte do campus. A canalização compreende o trecho entre o Colégio Técnico (Coltec), na porção sul da área de estudo, até a entrada principal da UFMG pela Avenida Antônio Carlos, na porção

norte da área de estudo. No trecho entre o Coltec até o anel rodoviário, que fica fora da área de estudo, o córrego Engenho Nogueira, encontra-se sem canalização.

O clima da região de estudo, segundo a classificação de Köppen, é Cwa, isto é, tropical de altitude com inverno seco e verão chuvoso. A temperatura média anual é de 21,5°C, a precipitação média de 1.479,5mm e a evapotranspiração potencial (ET0) calculada pelo método de Penman é de 1.404,8mm, referentes ao período de monitoramento de 1997 a 2000 (BEATO et al. 2003). O período de deficiência hídrica se estende de maio a outubro, com maiores déficits em agosto, e a partir de novembro se inicia o período chuvoso, com excedente hídrico de dezembro a março, este de 234 mm a 477 mm, calculado por Beato et al. (2003) para os anos de 1997 a 2000.

A maior parte da capital mineira, incluindo a área objeto desse estudo, assenta-se sobre o chamado Sistema Aquífero Fraturado, constituído de rocha sã sotoposta ao manto de intemperismo, que constitui um aquífero granular.

Enquanto o aquífero granular superior é sempre livre, o aquífero fraturado pode se apresentar livre a semiconfinado, heterogêneo e anisotrópico. Independentemente da rocha formadora e da natureza do solo que o recobre, o aquífero fraturado está intercomunicado com o aquífero granular que o sobrepõe (COSTA, 2002). Assim, a recarga do aquífero fraturado ocorre, majoritariamente, pela infiltração de águas pluviais através das coberturas detríticas, isto é, através dos aquíferos granulares.

As fraturas, do Aquífero Fissural na região da bacia da Pampulha, têm direções predominantes NW e N. E, sendo que as fraturas com direção NE são mais favoráveis à circulação de águas subterrâneas se comparadas às fraturas com direção NW. Isso por que, as fraturas de direção NW são preenchidas com diques básicos possuindo menor condutividade. Sendo assim, poços abertos nas fraturas de direção NE teriam maior potencial de vazão do que em fraturas NW (BEATO et al., 2003).

O aquífero granular é representado por um manto de intemperismo constituído pelo solo residual jovem, e predominância de areias e argilas. Possui camada aluvionar de no máximo vinte metros, e média de quinze a vinte de profundidade, sendo um aquífero livre na bacia da Pampulha a qual a área de estudo pertence.

Na área de estudo existem 7 (sete) poços profundos pertencentes ao campus da UFMG, e 5 (cinco) poços de monitoramento. A profundidade dos sete poços tubulares é de 100 a 80 m e dos quatro poços de monitoramento de 12 a 7 m.

3. MATERIAL E MÉTODOS

Neste estudo foi utilizada a rede de poços de monitoramento existente no campus da UFMG - poços profundos (P) e poços de monitoramento (PM) e a estação meteorológica instalada e

operada pela Comissão Nacional de Energia Nuclear/Centro de Desenvolvimento de Tecnologia Nuclear (CNEN/CDTN) localizada dentro do campus universitário.

Monitorou-se o nível d'água em 3 poços no meio granular (2 com transdutores de pressão e 1 manualmente) e 4 poços profundos (2 com transdutores de pressão e 2 manualmente) ao longo de 8 meses, envolvendo completamente a estação chuvosa, de agosto/2012 a abril/2013. Transdutores de pressão foram programados para realizarem leituras a cada 15 minutos, e o monitoramento manual foi realizado semanalmente (Fig. 3).

Enfatiza-se que, propositalmente, foram selecionados dois pares de poços, cada par com poços P e PM o mais próximo entre si (P10/PM6 e P8/PM8), a fim de realizar as correlações de dados do nível d'água entre os meios granular e fissural, nos quais foram instalados os transdutores de pressão. Já os demais poços (P2, P4 e PM2) não foram assim associados.

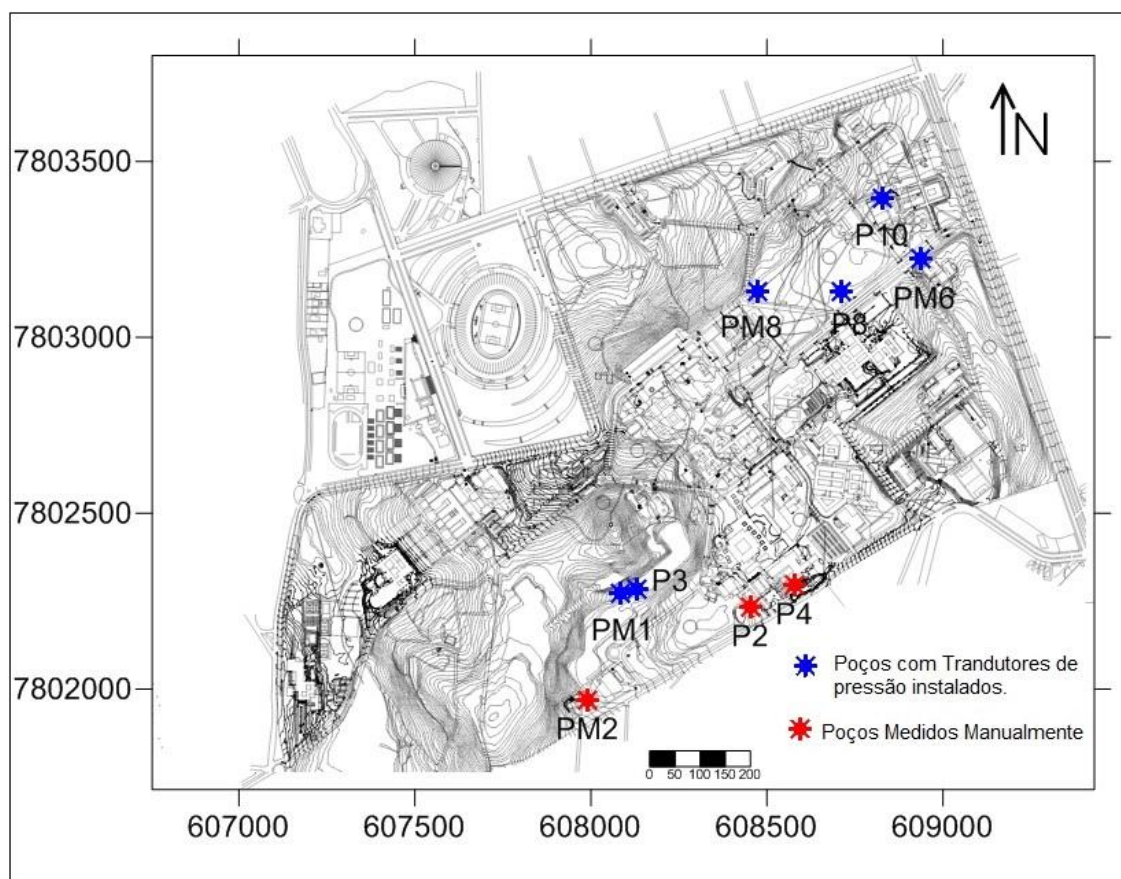


Figura 3: Localização dos pontos d'água monitorados.

A recarga foi calculada apenas para o aquífero granular, pelo método da variação do nível estático que, segundo Healy & Cook (2002) é:

$$R = S_y \frac{dh}{dt} = S_y \frac{\Delta h}{\Delta t}$$

Em que, R é a recarga, S_y é a vazão específica, Δh ou o dh é a variação do nível de água estático e Δt ou o dt é a variação do tempo. O valor de Δh foi obtido pelo somatório de todas as elevações do NA medidos. O valor de S_y usado foi determinado em teste de bombeamento de um poço profundo.

A fim de se identificar o grau do fator precipitação nas variações sazonais do NA no aquífero granular e no fissural, foram feitas correlações entre os dados de precipitação e do NA em poços de monitoramento do aquífero granular e nos poços profundos do aquífero fissural.

Utilizou-se ainda a Função de Correlação Cruzada (FCC) para se obter a defasagem de tempo (*lag*) entre os eventos de chuva e a chegada de uma *input* ou frente de recarga, correlacionando-se a precipitação diária com a variação diária do nível d'água.

A conexão hidráulica entre os dois aquíferos, granular e fissural, foi testada por meio de correlação (*Spearman*) do nível d'água de ambos aquíferos. E o tempo de defasagem de resposta entre o aquífero granular e fissural foi testada pela FCC.

4. RESULTADOS

Apresentam-se os gráficos ilustrando o comportamento do nível de água em resposta à precipitação para o período de agosto/2012 a abril/2013 em três poços de monitoramentos e quatro poços profundos. Os pares de poço de monitoramento-poço profundo P10/PM6 e P8/PM8 tiveram monitoramento automatizado com leituras de 15/15 minutos (Fig. 4) enquanto nos poços profundos (P) P2 e P4 e no poço de monitoramento (PM) PM2 o monitoramento foi manualmente semanalmente (Fig. 5).

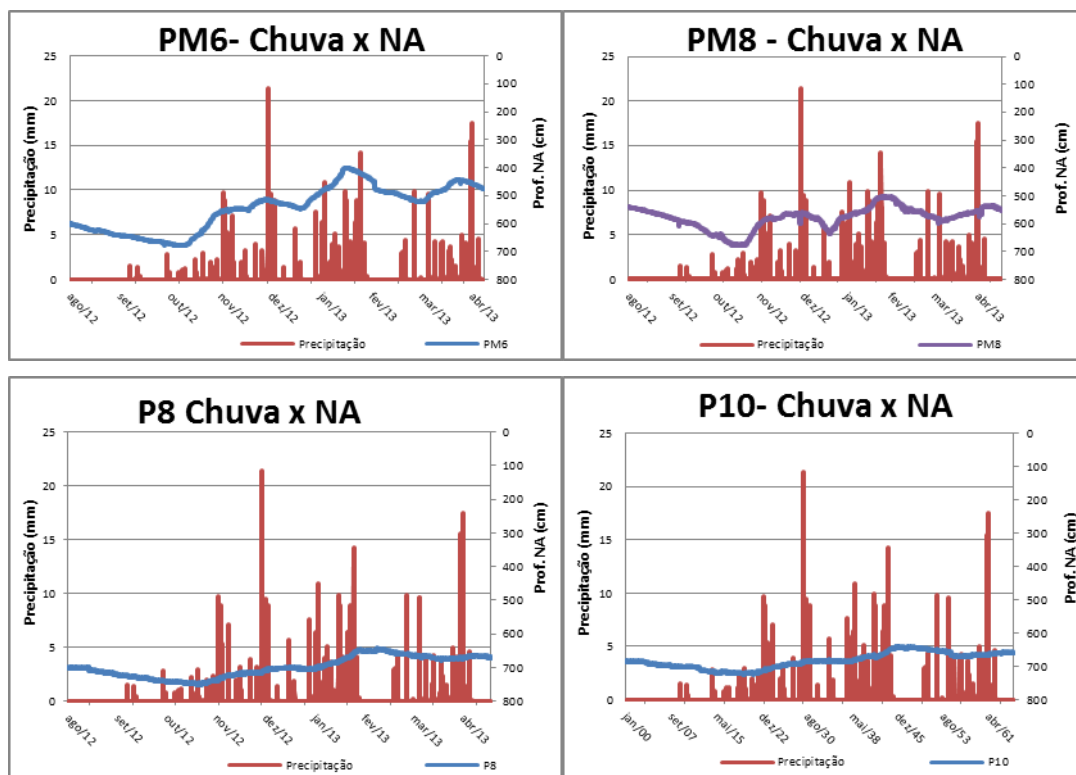


Figura 4 : Precipitação e profundidade do NA monitorado automaticamente em PM e P entre agosto de 2012e abril de 2013.

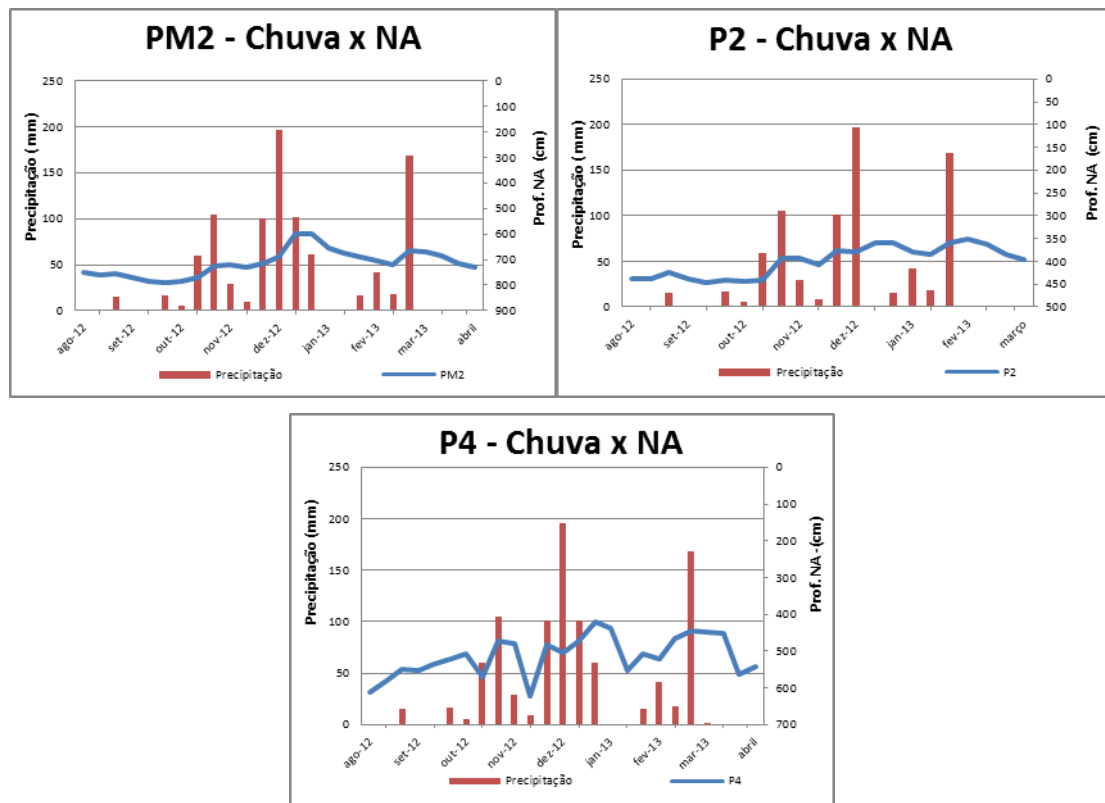


Figura 5 : Precipitação e profundidade do NA monitorado manualmente em PM e P entre agosto de 2012e abril de 2013.

Tabela 1 : Coeficiente de Correlação de Spearman Precipitação e N.A. com frequência mensal.

Poços com <i>Divers</i>		Poços manuais	
PM6	-0,79	P2	-0,77
PM8	-0,70	P4	-0,38
P8	-0,51	PM2	-0,80
P10	-0,55		

Notaram-se moderados valores de coeficiente de correlação de frequência mensal (Tab. 1) nos PM6, PM8, PM10 a forte no PM2, enquanto nos poços profundos, referentes ao aquífero fissural, os valores de correlação foram variáveis, entre fraco (P4) e moderado P2, P8 e P10. Esse resultado é perfeitamente compatível com a condição hidrogeológica apresentada, pois o aquífero freático está mais deliberadamente exposto à precipitação direta, e a fraca correlação em P4 deve-se a localização deste poço a cerca de 10 m do córrego Engenho Nogueira, no seu trecho a céu aberto, que pode estar promovendo uma possível recarga indireta.

Estes resultados confirmam a influência da precipitação no nível d'água, e após estes resultados foram feitos correlogramas de Função de Correlação Cruzada (FCC) com a finalidade de se identificar, em cada poço e poço de monitoramento, qual o tempo gasto para que a chuva atingisse, de forma significativa, o nível potenciométrico dos aquíferos.

É importante ressaltar que esses tempos de resposta do NA às precipitações calculadas por FCC referem-se ao tempo final do processo de chegada de toda a frente de recarga.

Foram usados dados diários e restritos aos poços com transdutores de pressão, de modo a se obter maior confiabilidade nos resultados. Obtiveram-se defasagens de tempo de 45 e 70 dias para os poços de monitoramentos (Tab.2; Figs 6 e 7) e de 50 a 69 dias para os poços profundos (Tab. 2; Figs 8 e 9).

Tabela 2: Defasagem de tempo (dias) entre a Precipitação e o NA, nos poços, por análise de FCC.

Poço de monitoramento	Lag (dias)	Poço Profundo	Lag (dias)
PM6	70	P10	50
PM8	45	P8	69

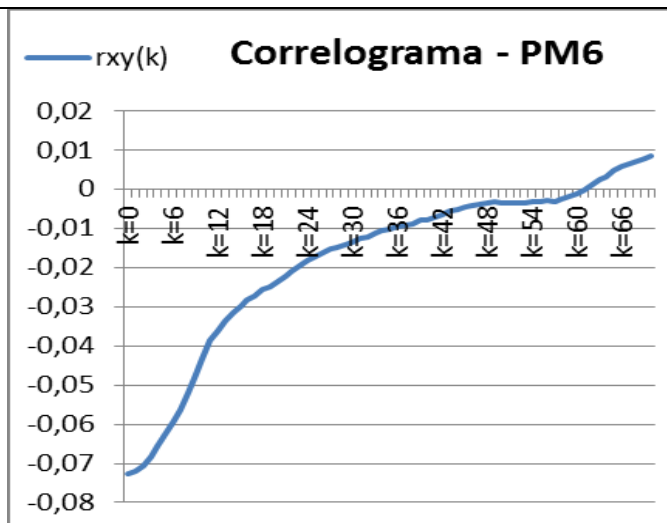


Figura 6: FCC de precipitação e nível d'água – PM6.

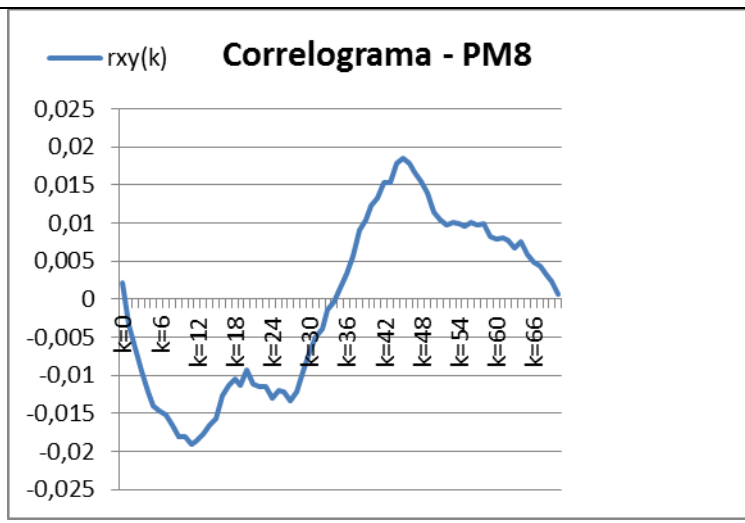


Figura 7: FCC de precipitação e nível d'água - PM8.

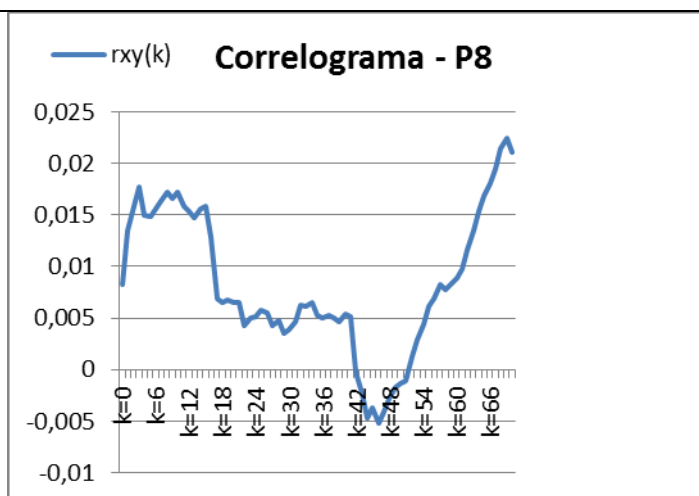


Figura 8: FCC de precipitação e nível d'água - P8.

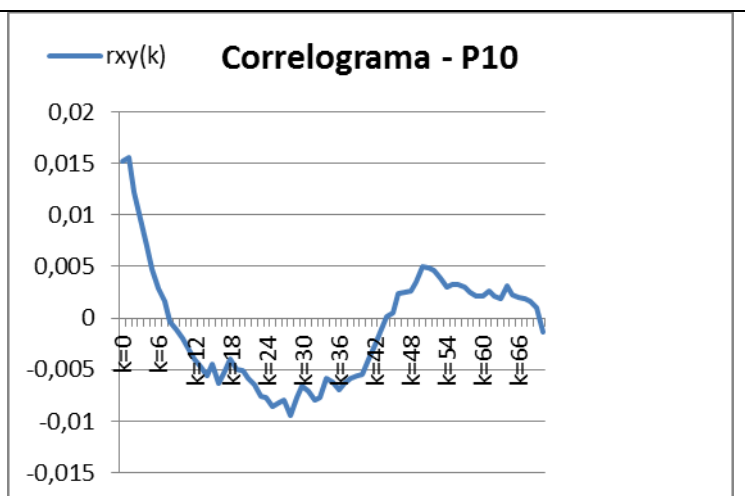


Figura 9: FCC de precipitação e nível d'água - P10.

O nível no PM8 responde com 45 dias aos inputs de infiltração, isto é, 25 dias antes do que o PM6 (70 dias). É razoável se pensar como causa dessa grande diferença os contextos hidrogeológicas e texturais da zona não saturada de ambos os locais: enquanto o PM6 atravessa em todo o seu perfil de 15 m de profundidade, um solo residual de gnaiss, o PM8 possui uma camada de até 3,9 metros de aterro, seguido de até 6,6m de argila plástica orgânica e solo residual até o fundo. Ou seja, a camada de argila de 2,5m de espessura diretamente sob o aterro, pode servir como uma barreira hidráulica e resultando numa condição local de aquífero suspenso, condição essa que pode estar provocando uma manutenção do nível de água em cotas mais elevadas por mais tempo, diminuindo, assim o tempo de resposta das frentes de infiltração, além disso o tipo de aterro existente no local, tende a ser bastante poroso, facilitando a infiltração.

No local do PM6, sabe-se que o saprolito, embora se apresente com textura arenosa quando manuseado, as argilas presentes como produtos de alteração do gnaiss, diminui a permeabilidade do meio.

Os perfis texturais de ambos poços são também muito semelhantes, constituídos de uma espessa camada de argila orgânica plástica, contínua, nos primeiros 6m no PM10 e nos primeiros 8 metros no PM8. Abaixo dessa camada argilosa, ocorrem intercalações de argila e areia a até 22m (P8) e 24m (PM8), em proporções semelhantes em cada perfil. Isto posto, os 2m de argila encontrados a mais no topo do solo onde se situa o P8 pode ser responsável pela diferença de resposta da recarga direta entre os dois locais: 19 dias a mais na localidade do P8 (69 dias) em relação ao P10 (50 dias).

Comparando-se os resultados por FCC por aquífero, ou seja, 45-70 dias no aquífero granular e 50-69 dias no aquífero fissural, constata-se que não há diferenças discrepantes de tempo de resposta de cada aquífero poroso e fissural à precipitação, apontando para uma forte conexão hidráulica entre os dois meios.

Alguns autores como Ferrari & Karmann (2007) e Lee & Lee (2000) identificam a Função de Autocorrelação como determinante da “memória” do aquífero, avaliando, por exemplo, o tempo em que o aquífero leva para se “esquecer” de um evento que o influencie, neste caso, a entrada de água, por meio de infiltração efetiva. Assim a FAC auxilia na compreensão dos valores da correlação cruzada, já que os valores da FAC representam o tempo em que o aquífero “esquece-se” de um *in put* enquanto os valores de correlação cruzada mostram o tempo que leva para esse *in put* atingir de fato o aquífero. Os valores calculados da FAC para o aquífero granular foram de 45 e 25 dias, nos poços PM6 e PM8, respectivamente, e para o aquífero fissural, de 60 dias nos dois poços profundos P8 e P10 (Tab. 2 e Fig. 10). O maior tempo gasto para se desfazer da memória do PM6 em relação ao PM8 deve-se à maior quantidade de água infiltrada que esse aquífero recebe.

A menor FAC observada nos aquíferos granulares se deve à sua maior condutividade hidráulica, fazendo com que as saídas de água neste aquífero sejam mais rápidas. Em razão dos aquíferos fissurais serem fortemente anisotrópicos e terem mais baixa condutividade hidráulica, requerem maior tempo para que o aquífero “se desfaça” de um evento de recarga, resultando num maior tempo de memória do aquífero.

Tabela 2. Valores da Função de Autocorrelação (FAC) para poço de monitoramentos (PM) e poços profundos (PP), em dias.

PP/PM	FAC
PM6	45
PM8	25
P10	60
P8	60

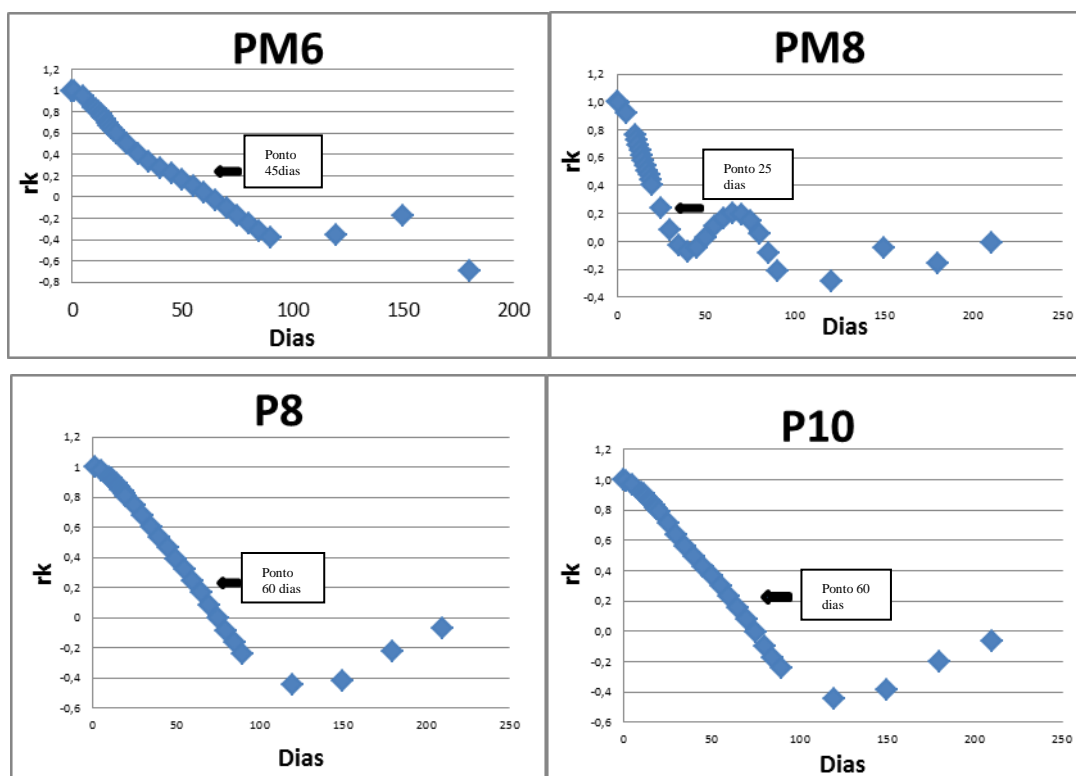


Figura 10: Correlogramas da FAC para os PM e P.

Segue um resumo das correlações realizadas FCC e FAC (Tab. 3), de onde se extrai as seguintes constatações e hipóteses sobre as características hidrogeológicas observadas pontualmente, para explicar os valores encontrados:

Quanto ao aquífero granular, a resposta se dá no PM6 (solo residual arenoso e siltoso) de forma bastante demorada, 70 dias, refletindo o elevado volume de água infiltrado; o maior tempo obtido na FAC (45 dias) corrobora essa informação, pois levará mais tempo para que o aquífero se desfaça dos eventos de grande recarga observada. No PM8, a resposta final à recarga é mais rápida,

assim como o tempo para se desfazer dos eventos de infiltração, uma vez que a barreira impermeável sotoposta argilosa, deve provocar fluxos horizontais, além de um menor volume infiltrado nesse local.

As condições hidrogeológicas do aquífero fissural, como esperado, são muito semelhantes entre os dois poços profundos analisados, conforme pode ser atestado pelo mesmo e elevado tempo obtido na FAC (60 dias). Porém o tempo inicial de resposta à infiltração no P8 é 8 dias mais cedo do que em P10, mesmo possuindo 2 metros a mais da uma camada argilosa orgânica no topo da zona não saturada.

Tabela 3. Valores encontrados de *lag* (em dias) por meio da Função de Correlação Cruzada (FCC), Spearman e Função de Auto correlação (FAC).

	FCC	FAC
PM6	70	45
PM8	45	25
P8	69	60
P10	50	60

4.2 Conexão hidráulica entre os aquíferos poroso e fissural

Utilizaram-se os dois pares de poços (PM - P) com divers e que se encontravam sob condições naturais de variação do NA para a investigação da conexão hidráulica entre os aquíferos, poroso e fissural: PM6/P10 distantes 230 metros um do outro e PM8/P8 distantes 231 metros um do outro, usando valores de 15 em 15 min durante todo o período monitorado. O par PM1/P3 não pode ser usado devido à operação do P3, que influencia diretamente o PM1.

Os resultados dos dois pares de poços confirmam os resultados obtidos na primeira etapa, mostrando uma forte conexão hidráulica entre os aquíferos (Tab. 6). Mesmo na porção ao norte da área de estudo, onde ocorre uma lente de argila selante, que dificultaria esta conexão, os resultados mostraram boa correlação.

Tabela 6. Correlação entre os pares de poço de monitoramentos e poços de monitoramento.

PM6/P10	PM8/P8
0,783	0,772

Para se caracterizar a conexão entre os aquíferos, foram aplicadas correlações cruzadas do nível d'água entre os dois aquíferos, de modo a se obter o tempo que a água do aquífero granular leva para iniciar o processo de recarga (indireta) ao meio fissural. A FCC aplicada aos pares de poços PM6/P10 e PM8/P8 resultou em um período de um dia para a recarga começar a ocorrer (Tab. 7; Fig. 11 e 12).

Tabela 7. Tempo de início de resposta de escoamento da água do aquífero poroso para o fissural, calculado por FCC em dias.

Par de poços	Lag (dia)
PM8/P8	1
PM6/P10	1

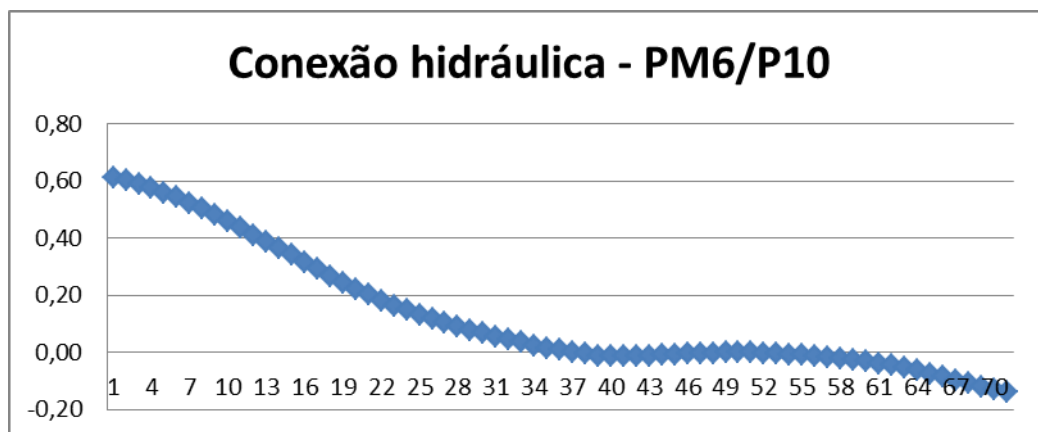


Figura 11. Correlograma FCC entre NA de poço e poço de monitoramento – PM6 e P10 (r_{xy} ($k= 1$ dia)).

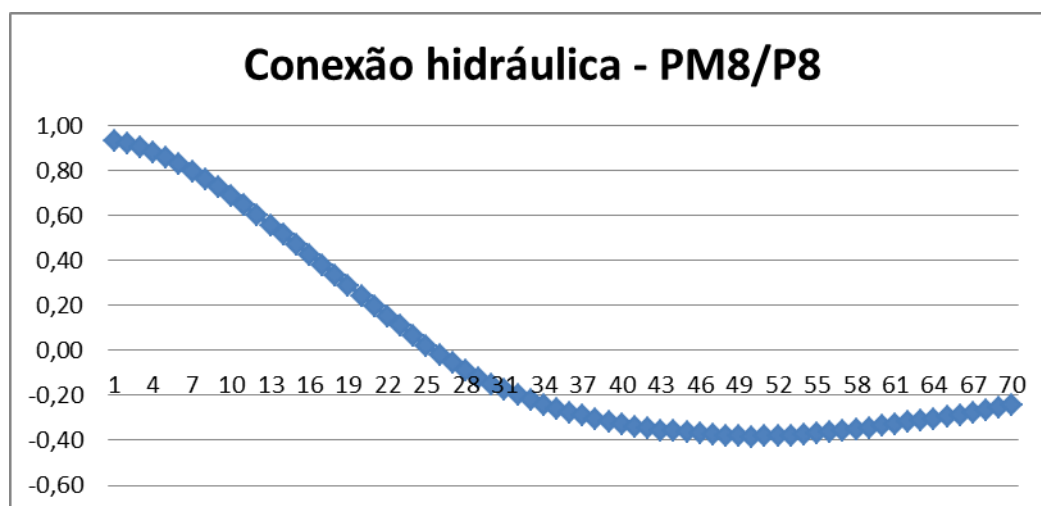


Figura 12: Correlograma FCC entre NA de poço e poço de monitoramento – PM8 e P8 (r_{xy} ($k= 1$ dia)).

4.3 Parâmetros físicos dos aquíferos - Condutividade hidráulica (K), Transmissividade (T) e Armazenamento específico (Sy).

Foram realizados dois ensaios de condutividade hidráulica (K) do aquífero poroso intergranular por slug tests em 4 poço de monitoramentos, um no final da estiagem (outubro/novembro), e outro no período de chuvoso (fevereiro).

Os resultados mostraram uma boa homogeneidade de valores de K, com média geral das duas campanhas de $3,9E-05$ cm/s. O único valor discrepante ocorreu PM1 (CDTN) com duas ordens de grandeza abaixo do que os demais locais – $1,9E-07$ a $2,9E-07$ cm/s. Desse modo, a condutividade

hidráulica média dos demais pontos é de $5,2E-05$ cm/s, representativo de materiais argilosos a silto-argilosos (FETTER, 2011).

Tabela 8. Valores de K obtidos em slug test.

1° - Out. e Nov. 2012			2° Fev. /2013		
Poço	m/seg	cm/seg	Poço	m/seg	cm/seg
PM1	2,89E-09	2,89E-07	PM1	1,87E-09	1,8718E-07
PM2	1,05E-07	1,05E-05	PM2	3,7E-07	3,70E-05
PM6	3,98E-07	3,97E-05	PM6	7,69E-07	7,69E-05
PM8	4,46E-07	4,46E-05	PM8	7,14E-07	7,137E-05

Os parâmetros K, T, S do aquífero fissural foram determinados em testes de bombeamento realizados a partir dos dados de variação do NA obtidos no diver instalado no poço ativo P3 do CDTN. Os dados foram analisados no software Aquifer Test, no qual optou-se pelas soluções de Neuman e sua simplificação proposta por Cooper-Jacob e de Theis (Tab. 9), sendo todas estas soluções para aquífero livre.

Também foi feito um teste de bombeamento pela empresa Hidropoços neste mesmo poço, no mesmo período, sob demanda do CDTN.

Tabela 9. Média dos resultados do teste de bombeamento pela solução de Neuman, com dados do diver e os resultados da empresa Hidropoços.

	Neuman	Teste Hidropoços
T (cm ² /s)	0,05	1,3
S	5,12E-3	
Sy	0,1	

4.4 Recarga

Para o cálculo da recarga anual direta (Equação 1) utilizou-se o valor de $Sy = 0,1$, determinado em testes de bombeamento com dados do P3 que esteve em operação ao longo do monitoramento (Tab. 10).

Os resultados dos testes de bombeamento apontam para variações nos valores da transmissividade (T) e de S, porém os valores de rendimento específico (Sy) foram absolutamente iguais em todos os testes.

Tabela 10. Valores de teste de bombeamento com dados retirados do *diver* instalado no P3.

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	Média
T	0,06	0,02	0,06	0,03	0,04	0,05	0,05	0,04	0,08	0,07	0,05
S	1,42E-03	5,94E-03	4,86E-03	1,02E-02	2,45E-03	4,01E-03	6,90E-03	3,47E-03	6,90E-06	5,94E-03	5,12E-03
Sy	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1

Os valores da somatória de todas as elevações do nível potenciométrico ($\Sigma\Delta h$) foram os obtidos na escala de tempo semanal, somando-se todas as elevações do NA.

Apesar de o período monitorado ter sido de oito meses e meio meses salienta-se que a recarga calculada é representativa do ano hidrológico 2012/2013, uma vez que no período não monitorado (maio, junho, julho e agosto) a precipitação é ínfima e a variação do nível potenciométrico (Δh) é predominantemente negativo entre uma medição e outra. A chuva que ocorreu no intervalo não monitorado (02/05/2013 a 16/08/2013) foi de apenas 59 mm e não teria trazido elevações significativas de Δh , tendo por isso sido descartada tal precipitação.

Os valores pontuais de recarga (Tab. 11) foram bastante semelhantes no PM2 e PM8, de 264 mm (28% de P) e 279 mm (29% de P), ambos localizados sob vegetação arbórea, enquanto o maior valor ocorreu no PM6 com 390 mm (41% de P), localizado em área com ocupação predominantemente gramínea e de textura de solos residuais.

Tabela 11. Valores de Recarga expressos em mm, calculados pelo método VNA para 8,5 meses de monitoramento.

Piez.	Sy^(a)	$\Sigma\Delta h$ (mm)	Recarga (mm/ano)	% P	Precipitação 2012/2013 (mm)
PM2	0,1	2.640	264	28	956
PM6	0,1	3.900	390	41	956
PM8	0,1	2.790	279	29	956

(a) obtido por dados do dīver do P3(CDTN) em operação durante monitoramento ago/2012 a mai/2013.

Foi determinado o volume de água que entrou por meio de recarga no aquífero granular a partir da média de $\Sigma\Delta h$ dos poços e da área do campus (Equação 1).

$$(\text{Valor médio de } \Delta h \times S_y) \times A \text{ - Equação 1}$$

Para se calcular o volume de água que atingiu o aquífero fissural foi utilizado um valor de S_y teórico médio, Maréchal et al. (2009) e Healy & Cook (2002), que calculam valores de S_y para aquíferos fissurais de 0,003, 0,09 e 0,015. Como o aquífero fissural estudado é formado por granitos e gnaisses do Complexo Belo Horizonte, localizado em uma região de pluviosidade semelhante ao da área estudada por Maréchal et. al. (2009), optou-se por utilizar a média desses valores, S_y de 0,032.

O volume da recarga direta da chuva ao aquífero granular em 2012/2013 foi de 775.000 m³ (Tabela 12), enquanto no fissural foi de 90.000 m³. Considerando que a recarga do aquífero fissural é oriunda do aquífero granular, o volume líquido de água adicionado ao aquífero granular é na

verdade de 685.000m³/ano. Sendo assim 14% da água de recarga do aquífero granular recarrega o aquífero fissural.

Tabela 12. Cálculo do volume de água recarregado em cada aquífero anualmente.

Poço	$\Sigma\Delta h$ (m)	Sy	$\Delta h \times Sy$	Média $\Sigma\Delta h \times Sy$ (m)	Área (m ²)	Volume total de recarga m ³	Volume líquido de recarga m ³
PM2	2,64	0,1	0,26				
PM6	3,90	0,1	0,39	0,31	2.500.000	775.000	665.800
PM8	2,79	0,1	0,28				
P2	1,55	0,036	0,0558				
P4*	0,70	-	-				
P8	1,15	0,036	0,0414	0,04368	2.500.000	109.200	109.200
P10	0,94	0,036	0,0338				

P4 não contabilizado por conta da sua natureza locacional restrita na área, junto ao córrego aberto.*

Não existe na literatura específica um consenso de valor do volume seguro a ser explorado dos aquíferos. Porém a obtenção desses resultados consiste de uma importante fonte de referência a partir da qual o gerenciamento dos recursos hídricos subterrâneos do campus Pampulha pode se embasar.

5. CONCLUSÃO

O tempo necessário para que a chuva se constitua recarga aquífera, leva entre 45 a 70 dias no aquífero poroso e 50 a 69 dias no aquífero fissural, indicando que as constituições geológicas interferem na recarga. Este tempo de resposta aos *inputs* de chuva também é observado na correlação *Spearman* entre dados mensais de NA com dados mensais de precipitação, que tem resultados entre moderado a forte com dados espaçados mensalmente. Confirmou-se a existência da conexão hidráulica entre os aquíferos e identificou-se características desta conexão, que é rápida levando cerca de 24 h para que os *inputs* de recarga no aquífero granular atinja de forma significativa a alterar o comportamento do NA no aquífero fissural subjacente.

A recarga medida para o período apresentou valores pontuais de recarga semelhantes entre os poços de monitoramento localizados sob vegetação arbórea, entre 28 e 29 % da precipitação medida no período, no poço localizado em região pouco arborizada apresentou recarga de 41% da precipitação medida no período. A recarga do aquífero granular representa 14% da água que de fato recarrega o aquífero fissural.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

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, Belo Horizonte, 1997.

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.

COSTA, W. D. Caracterização das condições de uso e preservação das águas subterrâneas do município de Belo Horizonte - MG. Tese de doutoramento, Programa de pós-graduação em Hidrogeologia. Instituto de Geociências. USP. São Paulo, 2002.

FERRARI, J. A. & KARMANN, I. Comportamento Hidrodinâmico de Sistemas Cársticos na Bacia do Rio Betari Município de Iporanga, SP. Geol. USP Sér. Cient., São Paulo, v. 8, n. 1, p. 1-13, abril 2008.

FETTER, C. Applied hydrogeology. Prentice Hall, Londres, UK. 598 pp. 2001

HEALY, R. W. & COOK, P. G. Using Groundwater Levels To Estimate Recharge. Hydrogeology Journal, Vol. 10. p 91-109, 2002.

LEE, J. Y. & LEE, K. K. Use hydrologic time series data for identification os recharge mechanism in a fractured bedrock aquifer system. Journal of Hydrology, 229.2000. p190 -201.

MARÉCHAL, J. C.; VARMA, M.R.R.; RIOTTE, J.; VOUILLAMOZ, J.M.; KUMAR,M.S.; RUIZ,L.; SEKHAR,M. & BRAUN,J.J. Indirect and direct recharges in a tropical forested watershed: Mule Hole, India. Journal of Hydrology, Vol. 364, 2009, p. 272 – 284.