



## Potenciometria e dinâmica sazonal do nível freático nas nascentes da microbacia do rio Capitão Pocinho (PA)

Paulo Pontes Araújo<sup>1</sup>; Francisco de Assis Oliveira<sup>2</sup>; Antonio Carlos Felice Nicola Savério Tancredi<sup>3</sup>; César Lisboa Chaves<sup>4</sup>; Itabaraci Nazareno Cavalcante<sup>5</sup> & Francisco de Assis Matos de Abreu<sup>6</sup>

*Recebido em 06 de junho de 2011, aceito em 22 de novembro de 2012*

### Resumo

As nascentes da Microbacia Hidrográfica do rio Capitão Pocinho estão localizadas no município de Capitão Poço, nordeste do estado do Pará. Esta pesquisa teve como objetivo a análise da oscilação do nível estático e a identificação do sentido de fluxo das águas subterrâneas rasas (freáticas) do Aquífero Livre Barreiras, durante os meses de Janeiro, Março, Maio, Julho, Setembro e Novembro de 2009. Nos mapas potenciométricos foi identificado o tipo de recarga das águas subterrâneas que, neste caso, se processa de forma indireta. Cerca de 90% do fluxo das águas subterrâneas rasas encontram-se no sentido do vale do rio Capitão Pocinho, tanto no período chuvoso (Janeiro a Julho) como no de *déficit* hídrico (Agosto a Dezembro). Neste vale residem 2000 pessoas que fazem uso destas águas para consumo doméstico. Os valores de condutividade hidráulica (K) da zona saturada do aquífero livre situam-se entre  $1,01 \times 10^{-4}$  cm/s e  $8,0 \times 10^{-3}$  cm/s. As águas subterrâneas rasas podem atingir a velocidade de 0,0022 m/dia ou 0,80 m/ano. Foram constatadas evidências de que o processo de recuperação da superfície potenciométrica ocorre logo após o término do período chuvoso, no máximo dentro de 60 dias. A correlação estatística positiva direta do índice pluviométrico com a superfície potenciométrica ocorreu quase na totalidade dos poços analisados, com exceções aos poços PM6 ( $r_{PM6} = -0,08$ ;  $p < 0,01$ ) e PM8 ( $r_{PM8} = -0,26$ ;  $p < 0,05$ ). O nível da água nos poços de monitoramento sofreu oscilação sazonal de 1,60 a 4,90 metros, sendo os menores valores observados nos poços situados nas cotas mais baixas (PM6, PM7 e PM8). Estes resultados indicam que a descarga de águas subterrâneas rasas desempenha um importante papel no abastecimento hídrico da vila e na manutenção do escoamento do rio Capitão Pocinho no período de *déficit* hídrico.

Palavras-chave: potenciometria, água subterrânea, microbacia hidrográfica, contaminação

### Abstract

*The headwaters of the Catchment of the River Capitão Pocinho are located in the municipality of Capitão Poço, northeastern state of Para. This study aimed to analyze the fluctuation of the static level and the identification of the direction of flow of shallow groundwater (phreatic) Aquifer Barreiras free during the months of January, March, May, July, September and November 2009. In these maps potentiometric yet been identified the type of groundwater recharge of the Aquifer Free Barreiras, which in this case takes place in a roundabout way. About 90% of shallow groundwater flow direction can be found in the river valley Capitão Pocinho, both in the rainy season (January to July) as in the drought (August to December). 2000 People reside in this valley, which make use of that water for domestic consumption. The values of hydraulic conductivity (K) of the saturated zone of unconfined aquifers are between the minimum of  $1.01 \times 10^{-4}$  cm/s and a maximum of  $8.0 \times 10^{-3}$  cm/s. The shallow*

groundwater can reach a speed of 0.0022 m/day or 0.80 m/year. We found evidence that the recovery process of the potentiometric surface occurs soon after (60 days) the rainy season. The positive statistical correlation with rainfall direct potentiometric surface was almost entirely from wells tested, with exceptions to the wells PM6 ( $r_{PM6} = -0.08$ ,  $p < 0.01$ ) and PM8 ( $r_{PM8} = -0.26$ ,  $p < 0.05$ ). The water level in the monitoring wells has oscillated seasonally from 1.60 to 4.90 meters, the lowest values observed in wells located in the lower elevations (PM6, PM7 and PM8). These results indicate that the discharge of shallow groundwater plays an important role in the village water supply and maintenance of river flow Pocinho Capitão during the drought.

**Keywords:** Potentiometry, groundwater, watershed, contamination

---

<sup>1</sup>UFRA/EMBRAPA/CPRM Doutorado no Programa de Pós-graduação em Ciências Agrárias, Av. Presidente Tancredo Neves, 2501, Belém/PA. CEP: 66.077-530. Fones: (91) 3182-1331; 8111-2777. E-mail: [paulo.pontes@hotmail.com](mailto:paulo.pontes@hotmail.com); <sup>2</sup>UFRA/EMBRAPA Professor Titular de Manejo de Bacia Hidrográfica, Av. Presidente Tancredo Neves, 2501, Belém/PA, Cep: 66.077-530, Fone: (91) 3210-5186. E-mail: [fdeassis@gmail.com](mailto:fdeassis@gmail.com); <sup>3</sup>UFPA/CG Professor Convidado, Doutor em Hidroquímica, Av. Presidente Tancredo Neves, 2501, Belém/PA, CEP: 66.077-530. Fone: (91) 8808-0983. E-mail: [actancredi@gmail.com](mailto:actancredi@gmail.com); <sup>4</sup>CPRM/SUREG BE, Pesquisador em Geociências, Av. Dr. Freitas, 3645, Belém/PA. CEP: 66.0095-110. Fone: (91) 3182-1327. E-mail: [cesar.chaves@cprm.gov.br](mailto:cesar.chaves@cprm.gov.br); <sup>5</sup>UFC/CC/DEGEO Professor Pesquisador, Associado do Departamento de Geologia/CC/UFC, Campus Universitário do Pici 913, Fortaleza – CE. Fones: (85) 33669869 e (85) 99733996. E-mail: [ita@fortalnet.com.br](mailto:ita@fortalnet.com.br); <sup>6</sup>UFPA/IG/FG. Professor Associado. Campus do Guamá. Belém – PA. Fone (091) 99020851. E-mail: [famatos@ufpa.br](mailto:famatos@ufpa.br)

## 1. Introdução

A concentração populacional em áreas de plantio agrícola tem ocasionado o agravamento de diversos problemas de saúde humana em quase todas as localidades que se encontram neste contexto. Um destes problemas diz respeito à preservação e manutenção da qualidade dos recursos hídricos.

De modo geral, a qualidade destas águas nestas regiões apresenta índices de potabilidade inferiores aos adequados ao consumo humano. Nestas condições, as soluções mais comuns são a adoção de medidas de gestão dos recursos hídricos subterrâneos. Para tal, torna-se necessário se conhecer, além da qualidade, também, o sentido de fluxo das águas subterrâneas rasas e suas variações sazonais.

Nesta pesquisa foram analisadas as variações potenciométricas durante o ciclo hidrológico de 2009, nas nascentes da Microbacia Hidrográfica do rio Capitão Pocinho, visando avaliar as possíveis mudanças sazonais de sentido do fluxo das águas subterrâneas rasas do Aquífero Livre Barreiras. Eventuais mudanças no sentido de fluxo das águas subterrâneas podem ocasionar problemas potenciais de riscos ambientais.

Para a realização desta análise foram coletados dados de profundidade do nível da água nos meses de Janeiro, Março, Maio, Julho, Setembro e Novembro de 2009, nos quinze (15) poços de monitoramento construídos na área de pesquisa. Utilizou-se o programa *Surfer 8* para a elaboração dos mapas de potenciometria.

## 2. Área de estudo

A área de pesquisa, com 1,2 km<sup>2</sup>, está localizada no município de Capitão Poço (PA), nas nascentes da Microbacia do rio Capitão Pocinho, entre 01° 49' 58,9" e 1° 49' 22,4" de Latitude Sul e 53° 12' 07" e 53° 11' 27" de Longitude Oeste de Greenwich. O acesso é realizado a partir de Belém, percorrendo-se 160 km pelas BR-316, BR-010, PA-253 e vicinal não pavimentada.

A área possui um cenário urbano-rural devido à presença da vila Capitão Pocinho situada nas cotas topográficas de menor expressão em meio à paisagem agrária de plantio de citros (Fig.1). Na vila, desprovida de saneamento básico, residem cerca de 2.000 habitantes (IBGE, 2000), os quais fazem uso das águas superficiais e subterrâneas rasas, para consumo doméstico.

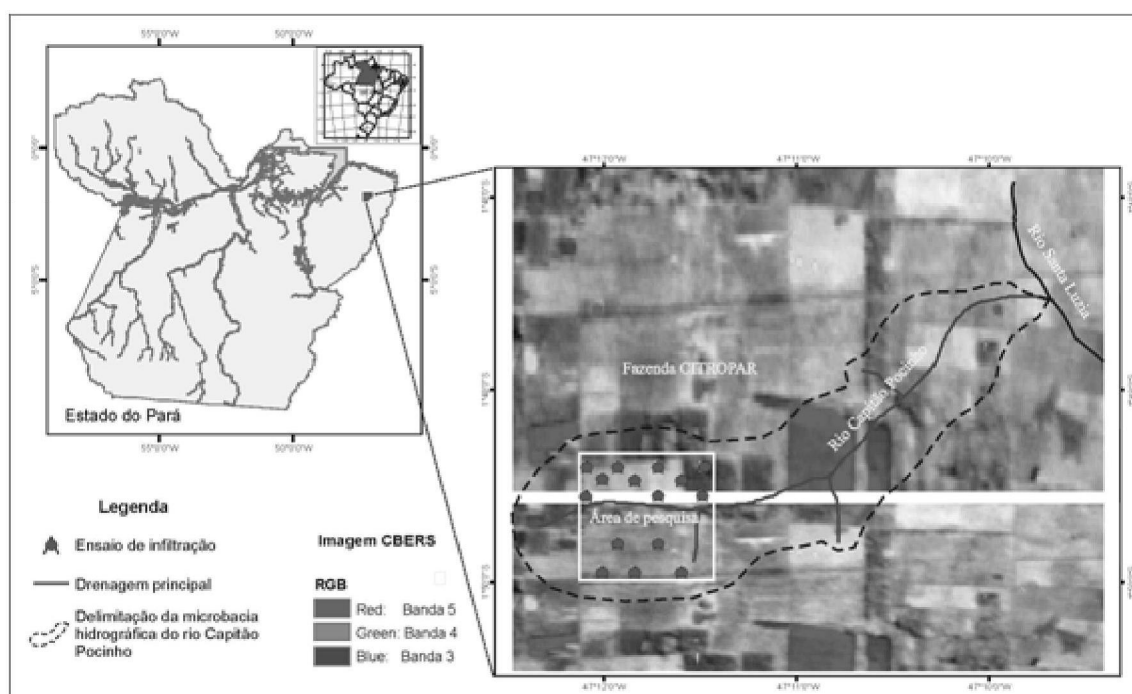


Fig. 1A – Posição do município de Capitão Poço no contexto do Estado do Pará, onde está inserida a Microbacia Hidrográfica do rio Capitão Pocinho. B - Localização da área de pesquisa delimitada pelo contorno retangular, parte inferior esquerda da figura. No interior desta figura (identificados por círculos pretos), está à localização dos poços de monitoramento construídos nas margens direita (PM04, PM05, PM06, PM07 e PM15) e esquerda (PM01, PM02, PM03, PM08, PM09, PM10, PM11, PM12, PM13 e PM14), nas nascentes do rio Capitão Pocinho

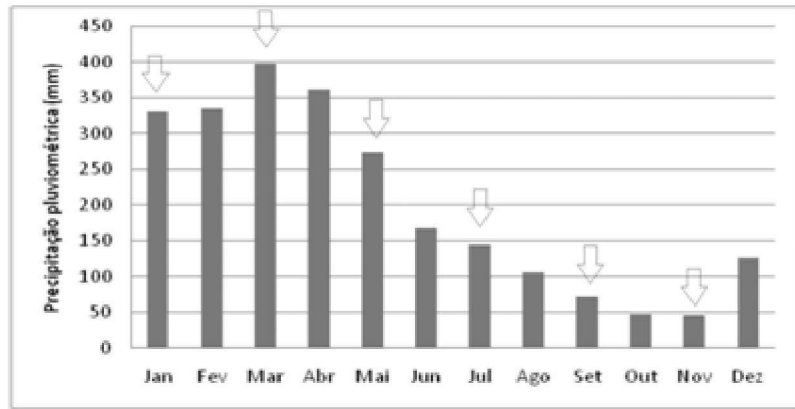
Para o levantamento dos parâmetros climáticos foram utilizados dados diários de precipitação pluviométrica e temperatura, referentes ao período de 1980 a 2001, obtidos da Estação Climatológica da Embrapa Amazônia Oriental (Latitude Sul  $01^{\circ} 46'$  e Longitude Oeste de Greenwich  $47^{\circ} 04'$ ), situada em Capitão Poço (PA). Para a coleta destes dados foram utilizados instrumentos meteorológicos de leitura direta e registradores mecânicos (Fig. 2).

Na paisagem da área de estudo são observadas nascentes normalmente desprovidas de vegetação natural e apresentando sinais de degradação pela erosão. As feições geomorfológicas da área de estudo exercem grande influência nas condições hidrogeológicas dos aquíferos. Tanto na parte norte como sul situam-se as regiões mais elevadas da área, com altitudes que atingem 75,20m (PM2), estando o nível hidrostático das águas subterrâneas rasas situadas a partir de 3,80m (PM7). Estas áreas da citricultura, com cotas topográficas mais elevadas, constituem-se em zonas de recarga do aquífero.

Na parte central, situada geomorfologicamente na superfície de aplainamento, onde a erosão foi mais intensa e removeu parte dos estratos superiores, o litotipo é representado essencialmente por areias. A topografia, nestas zonas, é mais irregular, com altitudes decrescentes até a planície aluvionar do rio Capitão Pocinho com altitude em torno de 60m. Nesta área, restrita à planície aluvionar, situa-se a principal área de descarga das águas subterrâneas rasas, nas nascentes da Microbacia do rio Capitão Pocinho.

A área é predominante coberta por sedimentos Terciários do Grupo Barreiras e Pós-Barreiras, secundados por Sedimentos Recentes do Quaternário. Diversos autores têm descrito a seqüência que compõe os Sedimentos Pós-Barreiras como constituindo o topo do Grupo Barreiras (Horizontes Ferruginosos, Mosqueados e Pálidos) (Góes, 1981; Ferreira, 1982; Borges e Angélica, 1986; Igreja *et al*, 1990; Costa, 1991; Farias *et al*, 1992 e SEICOM, 1995, dentre outros). Alguns autores consideram esses sedimentos como uma unidade diferenciada, adotando-se neste trabalho esta última concepção.

Fig. 2 - Distribuição média mensal de precipitação pluviométrica (mm) na Microbacia Hidrográfica do rio Capitão Pocinho. Período: 1980 a 2001. Fonte: Laboratório de Climatologia/Embrapa Amazônia Oriental. As setas representam os meses de medidas da profundidade do nível estático das águas subterrâneas rasas, ano 2009.



O Grupo Barreiras ocorre na área em afloramentos ou em profundidades que variam de 10m até 60m. Têm-se em média 15m para a espessura da unidade. Na composição litológica têm sido identificados arenitos amarelo-avermelhados de granulometria média a grossa, com seixos mal selecionados, friáveis, ferruginizados; arenitos creme-amarelados de granulometria fina a média, bem selecionados, maciços, com níveis de argilito branco apresentando manchas de óxido de ferro; argilito cinza negro, quase maciço a ligeiramente estratificado ressaltando-se que estes litotipos não formam todo o pacote sedimentar do Grupo Barreiras, representando apenas sua expressão mais próxima à superfície. Os Sedimentos Pós-Barreiras são divididos em três horizontes principais: Solo,

Mosqueado e Pálido. Segundo Costa (1991), os Sedimentos Pós-Barreiras tiveram sua origem a partir dos sedimentos do Grupo Barreiras, no início do Quaternário, quando a região foi submetida a condições úmidas (Pleistoceno Inferior) coincidente com a emersão do pacote sedimentar, em resposta a movimentações tectônicas na fossa do Marajó. Esse processo teria favorecido o início da laterização, permitindo a percolação e precipitação de óxidos e hidróxidos de ferro. Para Costa (op. Cit.), o perfil imaturo deve ter estabelecido seu encouraçamento parcial no Pleistoceno Médio/Superior quando o clima foi semi-árido. Do Pleistoceno superior até o Holoceno, quando a região apresentou clima úmido, com cobertura de floresta, o clima deve ter tido ciclos alternados de curta aridez e umidade.

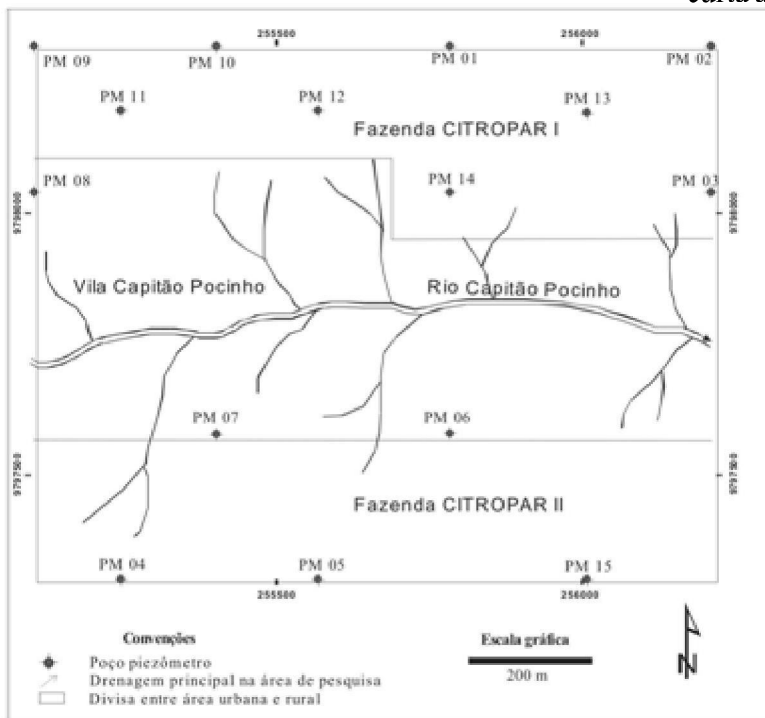


Fig. 3 - Localização dos poços de monitoramento construídos durante as atividades de campo, onde foram realizados os "Slug-tests", objetivando a determinação da condutividade hidráulica da zona saturada do Aquífero Barreiras, na área de estudo.

Os Sedimentos Recentes são representados por mangues e terraços aluvionares. São compostos por areias, siltes e argilas intercaladas, de espessura variada. É comum encontrarem-se argilas orgânicas, com restos vegetais, bioturbadas e intercaladas a siltes e areias finas, com espessuras milimétricas a centimétricas. Podem apresentar espessuras da ordem de, no máximo, 10m (Costa, 1991).

Em subsuperfície encontram-se solos classificados como argissolo de coloração amarelo, cor  $\geq 7,5YR$ , os quais se caracterizam também por apresentar concentrações ferruginosas do tipo calhau (2 a 20cm), delimitam o contato geológico entre o Grupo Barreiras, sotoposto, e a Formação Pós-Barreiras. Os argissolos amarelos são aflorantes fora da área de estudo.

O contexto hidrogeológico local é composto por dois (2) aquíferos, sendo um constituído pelos Sedimentos Recentes e outro pelos sedimentos do Grupo Barreiras, ambos livres e/ou livres com cobertura. Os aquíferos representados pelos Sedimentos Recentes localizam-se em planícies do rio Capitão Pocinho e de seus tributários. São constituídos por areias aluvionares, bem como por areias finas a médias e, material argilo-arenoso por vezes contendo níveis de concreções ferruginosas. Estima-se que suas espessuras atinjam em torno de 10m. No restante da área encontra-se o aquífero Barreiras, com espessura entre 15-20m, principal foco deste estudo.

### 3. Material e método

#### · *Construção e instalação da rede de poços de monitoramento*

Na área de estudo foram construídos 15 poços de monitoramento, a fim de ser efetuada a coleta do material do aquífero e das águas subterrâneas rasas, utilizando-se Sonda Trado Mecânico Motorizado MB1 (motor Honda de 01 HP), acoplada a um trado escavadeira com diâmetro de quatro (4) polegadas. Estes poços foram utilizados para a estimativa dos parâmetros hidrodinâmicas do Aquífero Livre Barreiras e, também, para avaliar as características físico-químicas das águas subterrâneas rasas (Fig. 3).

#### · *Determinação da condutividade hidráulica na zona saturada do aquífero*

A determinação da condutividade hidráulica do aquífero estudado foi realizada por Slug test, nos quinze (15) poços de monitoramento, conforme recomendado por Domenico & Schwartz (1990).

Neste trabalho, em todos os poços de monitoramento, o filtro ocupa toda a extensão da zona saturada e próxima a base do aquífero livre. Os valores dos parâmetros hidráulicos obtidos através do *slug-test*, quando comparados com aqueles obtidos em testes de bombeamento no Aquífero Livre Barreiras, realizados fora da área de estudo, apresentam valores compatíveis entre si.

O valor do gradiente hidráulico foi obtido a partir da diferença entre cargas hidráulicas dos poços plotados no mapa potenciométrico, enquanto a porosidade foi calculada através de ensaios de laboratório, realizados no Laboratório de Solos da Universidade Federal Rural do Pará – UFRA em amostras indeformadas coletadas na zona não saturada do aquífero livre.

#### · *Monitoramento da oscilação do nível da água e a definição do sentido de fluxo das águas subterrâneas rasas*

Para o monitoramento da oscilação do nível estático mediu-se a profundidade da água nos 15 poços construídos na área de pesquisa, durante os meses de Janeiro, Março, Maio, Julho, Setembro e Novembro de 2009. Estes dados foram coletados com o auxílio de um medidor de nível de água sonoro tipo Solinst, com cabo de extensão de 20m, escala em milímetros.

A avaliação da oscilação sazonal do nível estático permitiu a identificação das zonas de recarga e descarga do Aquífero Livre Barreiras. Para a definição do sentido de fluxo das águas subterrâneas rasas foram utilizadas as cotas topográficas do local de construção dos poços de monitoramento e as medidas do nível das águas realizadas nos quinze (15) poços.

- *Análise de correlação linear entre as variáveis estudadas*

Nesse estudo é analisada a correlação entre a variável  $y$  (oscilação da potenciometria no tempo e no espaço) com relação à variável  $x_1$  (precipitação pluviométrica). Esta análise estatística teve por objetivo verificar e mensurar o grau de associação linear entre essas variáveis. As correlações foram determinadas por meio do coeficiente produto-momento (product moment correlation coefficient) de Karl Pearson, conhecido como “ $r$ ” (Sokal & Rohlf, 1981).

#### 4. Resultados e discussões

No período chuvoso (Janeiro a Junho), quando a precipitação pluviométrica atinge a média de 335,03 mm, o nível da superfície potenciométrica encontra-se, em média, a uma profundidade de 9,11m. No período de Julho a Dezembro a precipitação pluviométrica e a profundidade da superfície potenciométrica, em média, foram de 88,34 mm e 8,38m, respectivamente. Estes resultados demonstram que a água de recarga que chega ao aquífero livre é de origem pluvial. Resultados semelhantes foram obtidos também em trabalho desenvolvido por Healy & Cook (2002).

- *Oscilação do nível da água nos poços de monitoramento*

A oscilação do nível das águas subterrâneas rasas foi monitorada durante o ciclo hidrológico do ano de 2009, nos meses de Janeiro, Março, Maio, Julho, Setembro e Novembro.

Na tabela 1 são apresentados os dados que foram coletados, durante o ano de 2009, nos 15 poços de monitoramento perfurados na área de pesquisa. Os valores de profundidade mínima, máxima, média e do desvio padrão comprovam a ocorrência de flutuações do nível das águas subterrâneas rasas, durante o ciclo hidrológico.

O nível da água esteve mais próximo da superfície do terreno na estação de *déficit* hídrico, quando atingiu 3,78m no poço PM7. Enquanto que a maior profundidade do nível da água do período monitorado, foi registrada em Janeiro de 2009,

quando o nível da água foi de 15,34m no poço PM1. Os poços PM7 e PM15 apresentaram as menores profundidades de nível durante os meses de monitoramento, sendo verificados os maiores valores de nível nos poços PM1 e PM2.

A menor variação do nível da água ocorreu no poço PM07, localizado em área de descarga as proximidades da área aluvionar, onde a diferença entre a máxima e a mínima foi de 1,63m. Nos poços PM1 e PM15, onde se verificou a maior variação do nível da água no aquífero livre, durante o período de monitoramento, a diferença entre a máxima e a mínima foi de 4,90 m. Os poços PM1 e PM15 situam-se em área de recarga do Aquífero Livre do Grupo Barreiras.

Na área de plantio de citros, onde predominam cotas topográficas mais elevadas, o nível da água encontra-se em média a 8,79 m de profundidade. Para a área de cotas menores, onde encontra-se a vila de Capitão Pocinho, a profundidade média do nível da água é de 5,48m, variando de 3,78m (mínimo) no PM7 a 7,83m (máximo) no PM8. Observa-se que em locais onde a distância entre a superfície potenciométrica e o fundo das fossas é inferior a 2-3 m, o funcionamento inadequado dos sistemas sépticos é potencialmente susceptível (Finnemore e Hantzche, 1983), e tal profundidade é observada na área de estudo e, portanto, com potencial risco de poluição das águas subterrâneas por efluentes sépticos oriundos de fossas.

Na figura 4 observa-se que as medidas de nível da água nos piezômetros possuem um comportamento similar, crescendo ou diminuindo em termos de profundidade. Este fato pode ser correlacionado diretamente aos períodos chuvoso e de seca onde existem as contribuições de recarga e de evapotranspiração e que modificam profundidades de nível estático. A composição das águas subterrâneas é normalmente resultante dos processos físicos, químicos e/ou biológicos que se desenvolvem principalmente na zona insaturada e o comportamento oscilatório do nível d'água contribui para a migrações dos componentes iônicos.

Essa relação, entre precipitação pluviométrica e profundidade do nível estático, sugere que os poços estão situados num contexto hidrogeológico

com continuidade lateral e vertical, ou seja, na unidade aquífera do Grupo Barreiras. Estes resultados são também compatíveis com os perfis descritivos dos poços de monitoramento. Estes

perfis foram elaborados com base nas descrições de campo, em associação com a classificação granulométrica dos sedimentos da zona não saturada (Laboratório de Solos da Universidade Federal rural da Amazônia – UFRA).

Tab. 1 Intervalos de profundidades do nível da água no aquífero livre Barreiras, medidos nos 15 poços de monitoramento perfurados na área de pesquisa, durante o ano de 2009. Medidas efetuadas no período chuvoso (Janeiro a Maio) e no período com déficit hídrico (Julho a Novembro)

Poço de monitoramento	Profundidade do nível estático mensal (m)						Oscilação anual (m)				Oscilação média no período	
	Jan	Mar	Mai	Jul	Set	Nov	Máx	Mín	Variação	Média	Jan-Mai	Jul-Nov
PM1	15,34	15,19	11,04	10,44	12,89	13,56	15,34	10,44	04,90	13,08	13,08	13,0
PM2	15,28	14,45	10,78	10,60	12,67	12,70	15,28	10,60	04,68	12,75	13,50	11,9
PM3	09,77	09,11	07,15	07,27	08,62	09,35	09,77	07,15	02,62	08,55	08,68	08,41
PM4	08,53	07,90	04,51	04,83	06,60	07,45	08,53	04,51	04,02	06,64	06,98	06,29
PM5	09,60	08,87	06,70	06,61	08,11	08,07	09,60	06,61	02,99	07,99	08,39	07,60
PM6	06,51	05,37	04,53	05,04	05,60	06,06	06,51	04,53	01,98	05,52	05,47	05,57
PM7	05,41	04,43	03,78	03,96	04,48	04,98	05,41	03,78	01,63	04,51	04,54	04,47
PM8	06,83	06,53	05,37	05,69	06,71	07,33	07,33	05,37	01,96	06,41	06,24	06,58
PM9	08,34	08,04	05,87	04,74	06,81	08,03	08,34	4,74	03,60	06,97	07,42	06,53
PM10	13,99	13,90	09,91	09,13	11,35	12,96	13,99	9,13	04,86	11,87	12,60	11,10
PM11	09,55	09,47	06,85	06,92	08,59	09,44	09,55	6,85	02,70	08,47	08,62	08,32
PM12	13,00	12,55	08,83	08,71	10,80	12,23	13,00	8,71	04,29	11,02	11,46	10,50
PM13	13,32	12,96	08,88	09,35	11,45	12,60	13,32	8,88	04,44	11,43	11,72	11,10
PM14	11,28	10,43	07,67	08,01	09,73	10,71	11,28	7,67	03,61	09,64	09,79	09,48
PM15	09,10	08,79	04,20	04,64	04,65	06,43	09,10	4,20	04,90	06,30	07,36	05,24
PR	14,35	12,37	05,76	06,61	6,84	11,37	14,35	5,76	08,59	09,55	10,83	08,27
Precipitação (mm)	331,2	399,3	274,6	145,6	73,20	46,30	399,3	46,30	353,00	211,7	335,03	88,30
Mínimo NE (m)	05,41	04,43	03,78	03,96	04,48	04,98	05,41	03,78	01,63	04,51	04,54	04,47
Máximo NE (m)	15,34	15,19	11,04	10,60	12,89	13,56	15,34	10,60	04,9	13,08	13,50	13,00
Média NE (m)	10,39	09,87	07,07	07,06	8,60	9,46	10,42	6,88	03,55	08,74	09,06	08,43

PR = poço de referência; PM = poço de monitoramento e NE = nível da água do aquífero livre

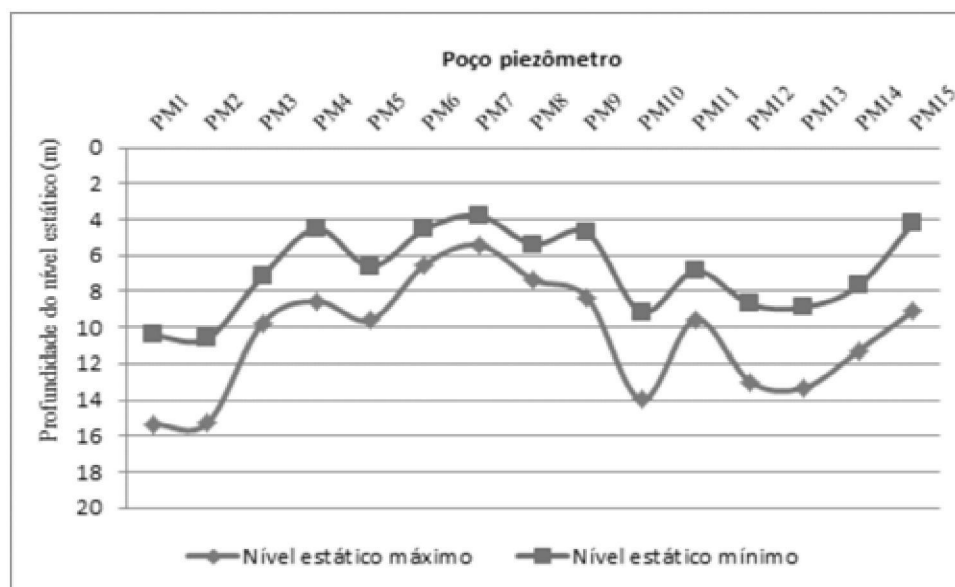


Fig. 4 - Oscilação temporal do nível da água nos 15 poços de monitoramento, no período de Janeiro a Novembro de 2009, nas nascentes do rio Capitão Pocinho.

- *Análise de correlação estatística linear entre as variáveis estudadas*

Para verificar o grau de associação entre as variáveis estudadas aplicou-se a *análise de correlação linear*. A tabela 2 apresenta os resultados da análise estatística de correlação entre os níveis

de profundidade das águas subterrâneas rasas nos poços de monitoramento e a precipitação pluviométrica média, calculada com base nos dados coletados entre 1980 e 2001, com níveis de significância  $p < 0,05$  e  $p < 0,01$ . Todos os testes foram realizados com auxílio do *software* estatístico SPSS® 13.0 for Windows (2004).

**Tab. 2** Coeficientes de correlação entre a variável precipitação pluviométrica média anual (Y) e a variável profundidade do nível estático. Os dados de variação do nível estático foram coletados nos 15 poços de monitoramento (X's) instalados nas nascentes da microbacia hidrográfica do rio Capitão Pocinho, durante o ciclo hidrológico de 2009

	Precipitação	PM1	PM2	PM3	PM4	PM5	PM6	PM7	PM8	PM9	PM10	PM11	PM12	PM13	PM14	PM15
Precipitação	1															
PM1	0,45	1														
PM2	0,48	0,98	1													
PM3	0,13	0,94	0,92	1												
PM4	0,27	0,97	0,96	0,99	1											
PM5	0,40	0,98	0,99	0,94	0,97	1										
PM6	-0,08	0,75	0,78	0,91	0,87	0,83	1									
PM7	0,02	0,80	0,82	0,94	0,90	0,86	0,99	1								
PM8	-0,26	0,74	0,69	0,91	0,85	0,74	0,88	0,86	1							
PM9	0,28	0,95	0,90	0,95	0,94	0,91	0,77	0,84	0,82	1						
PM10	0,39	0,99	0,95	0,95	0,97	0,94	0,76	0,82	0,78	0,98	1					
PM11	0,15	0,95	0,90	0,99	0,98	0,92	0,84	0,86	0,91	0,96	0,96	1				
PM12	0,27	0,98	0,94	0,98	0,99	0,95	0,84	0,88	0,86	0,97	0,99	0,99	1			
PM13	0,21	0,96	0,94	0,99	1,00	0,95	0,86	0,88	0,88	0,94	0,97	0,99	0,99	1		
PM14	0,13	0,93	0,92	1,00	0,99	0,94	0,92	0,94	0,92	0,94	0,95	0,99	0,98	0,99	1	
PM15	0,62	0,92	0,93	0,82	0,89	0,89	0,67	0,73	0,55	0,82	0,91	0,82	0,88	0,87	0,83	1

\* Correlação significativa a uma probabilidade de 5% de erro; \*\* Correlação e significativa a uma probabilidade de 1% de erro; ns Não significativa

A análise de correlação linear mostra que, de forma significativa estatisticamente, que a correlação positiva direta do índice pluviométrico ocorreu quase na totalidade dos poços analisados, com exceções aos poços PM6 ( $r_{PM6} = -0,08$ ;  $p < 0,01$ ) e PM8 ( $r_{PM8} = -0,26$ ;  $p < 0,05$ ). Nestes dois (2) poços ocorreu correlação negativa entre a precipitação e a profundidade dos níveis das águas subterrâneas rasas, durante todo o período monitorado. Uma correlação inversa indica que as duas variáveis movem-se em direções opostas. Nos meses com crescentes valores de precipitação pluviométrica, os valores de nível das águas subterrâneas rasas

diminuíram, indicando recarga direta do aquífero por meio das precipitações pluviométricas.

Como o método da flutuação do nível de água é baseado na premissa de que a elevação do nível de água subterrânea em aquíferos livres é devido a água de recarga que chega ao aquífero (Healy & Cook, 2002), a partir dos resultados obtidos pode-se considerar a área de estudo como uma zona de recarga do aquífero.

A análise de correlação da variação sazonal do nível estático entre os poços PM1, PM2, PM3, PM4, PM5, PM7, PM9, PM10, PM11, PM12, PM13, PM14 e PM15, mostra uma forte correlação



positiva direta dentre os poços analisados, indicando conexão hidráulica entre estes poços e uma possível continuidade lateral das camadas sedimentares, na área de estudo. Estes dados estão em

compatibilidade com aqueles obtidos quando da elaboração do perfil hidrogeológico esquemático (norte-sul), entre os poços PM1, PM6 e PM14 (Fig. 5).

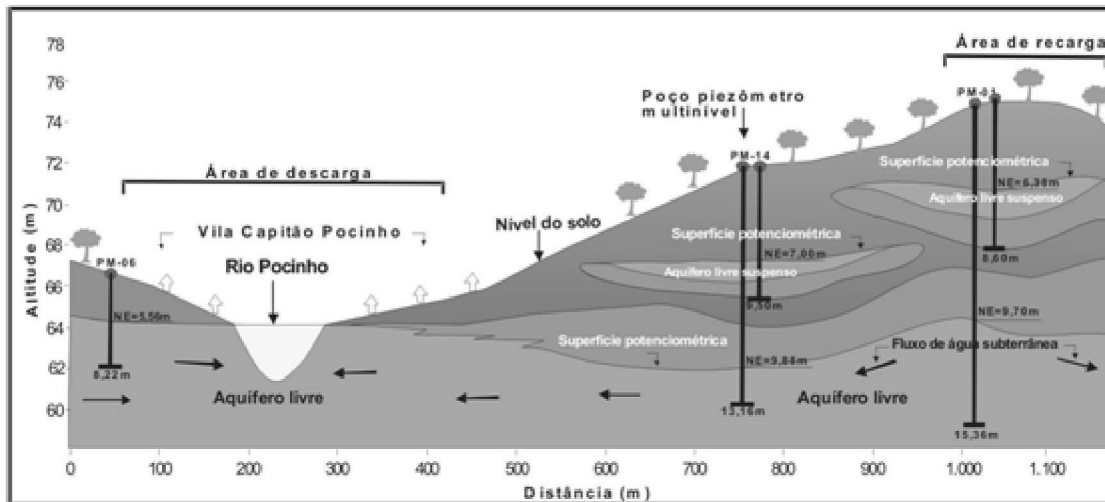


Fig. 5 - Perfil hidrogeológico esquemático norte-sul, entre os poços de monitoramento PM01, PM14 e PM06, mostrando o sentido de fluxo das águas subterrâneas rasas e o posicionamento dos aquíferos livre e/ou livre suspenso.

Considerando-se que na área de estudo não é utilizado o método de irrigação no plantio intensivo de citros, este comportamento sazonal da superfície potenciométrica sugere que a oscilação da profundidade do nível das águas subterrâneas rasas do aquífero livre Barreiras, nos poços de monitoramento, ocorre exclusivamente em função da lixiviação das águas pluviais.

A classificação textural e a taxa de infiltração, estimada em torno de 10 cm/dia (Araújo *et al.*, 2001), associadas à profundidade do nível da água medida nos poços de monitoramento, permitiram obter-se um indicativo de que entre 48 e 60 dias, as águas lixiviadas atingem a zona saturada do aquífero livre.

- Sentido sazonal do fluxo das águas subterrâneas rasas

O sentido do fluxo das águas subterrâneas rasas foi obtido através da superfície potenciométrica definida nos poços de monitoramento, de acordo com o método descrito acima. A identificação dos poços utilizados, as coordenadas em UTM, as cotas

topográficas, a profundidade do nível da água e o valor da carga hidráulica em cada poço de monitoramento são apresentados na tabela 3.

Utilizando-se os dados das médias mostrados na tabela 3 foram elaboradas representações das superfícies potenciométricas dos períodos chuvoso e de déficit hídrico (2009), respectivamente, figuras 6 e 7.

As figuras 6 e 7 mostram que o sentido de fluxo das águas subterrâneas rasas, tanto no período chuvoso como no de déficit hídrico, apresenta uma tendência às águas superficiais do rio Capitão Pocinho, o que explica a presença de fontes de águas surgentes nas nascentes da microbacia hidrográfica. Estes dados sugerem ainda que o referido rio é efluente, ou seja, é alimentado pelas águas subterrâneas rasas.

A maioria destas nascentes está completamente degradada, devido à ação antrópica. Neste contexto, localiza-se a vila homônima onde residem cerca de 2.000 pessoas, as quais fazem uso destas águas para consumo doméstico.

As medidas de potenciometria elevada obtidas nos poços PM11, PM12 e PM13, localizados na porção norte, como também, aquelas

Tab. 3 Oscilação média mensal da superfície potenciométrica, durante o período chuvoso e de déficit hídrico de 2009. Os dados foram coletados nos 15 poços de monitoramento perfurados na área de pesquisa, localizados nas nascentes da microbacia do rio Capitão Pocinho

Coordenadas		Poço	Carga hidráulica (m)						Média (mm)	
UTM-N	UTM-E		JAN	MAR	MAI	JUL	SET	NOV	Chuva	Déficit hídrico
255782,65	9798316,52	PM1	58,66	58,81	62,96	63,56	61,11	60,44	60,14	61,70
256212,93	9798317,00	PM2	59,92	60,75	64,42	64,60	62,53	62,50	61,70	63,21
256212,93	9798039,91	PM3	61,23	61,89	63,85	63,73	62,38	61,65	62,32	62,59
255244,54	9797302,53	PM4	59,47	60,10	63,49	63,17	61,40	60,55	61,02	61,71
255568,18	9797302,53	PM5	58,20	58,93	61,10	61,19	59,69	59,73	59,41	60,20
255782,65	9797579,33	PM6	55,99	57,13	57,97	57,46	56,90	56,44	57,03	56,93
255401,52	9797577,72	PM7	57,59	58,57	59,22	59,04	58,52	58,02	58,46	58,53
255103,52	9798039,91	PM8	64,67	64,97	66,13	65,81	64,79	64,17	65,26	64,92
255103,52	9798317,00	PM9	66,66	66,96	69,13	70,26	68,19	66,97	67,58	68,47
255401,52	9798316,52	PM10	60,01	60,10	64,09	64,87	62,65	61,04	61,40	62,85
255244,54	9798194,56	PM11	64,20	64,28	66,90	66,83	65,16	64,31	65,13	65,43
255568,18	9798194,56	PM12	60,50	60,95	64,67	64,79	62,70	61,27	62,04	62,92
256008,23	9798189,75	PM13	60,43	60,79	64,87	64,40	62,30	61,15	62,03	62,62
255782,65	9798039,91	PM14	60,72	61,57	64,33	63,99	62,27	61,29	62,21	62,52
256008,23	9797302,53	PM15	55,10	55,41	60,00	59,56	59,55	57,77	56,84	58,96
<b>Mínimo</b>			55,10	55,41	57,97	57,46	56,90	56,44	56,84	56,93
<b>Máximo</b>			66,66	66,96	69,13	70,26	68,19	66,97	67,58	68,47
<b>Média</b>			60,22	60,75	63,54	63,55	62,01	61,15	61,50	62,24
<b>Oscilação</b>			11,56	11,55	11,16	12,80	11,29	10,53	10,75	11,54

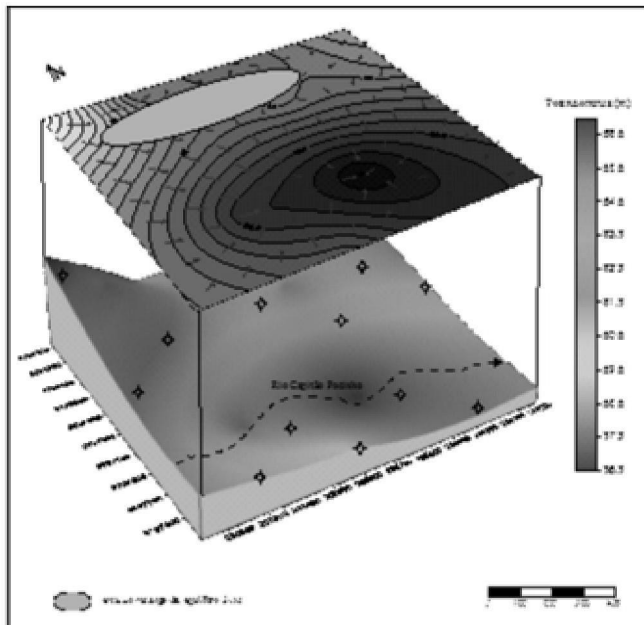


Fig. 6 - Bloco diagrama tridimensional mostrando a superfície potenciométrica e o sentido do fluxo das águas subterrâneas rasas, período chuvoso de 2009, nas nascentes da Microbacia do rio Capitão Pocinho

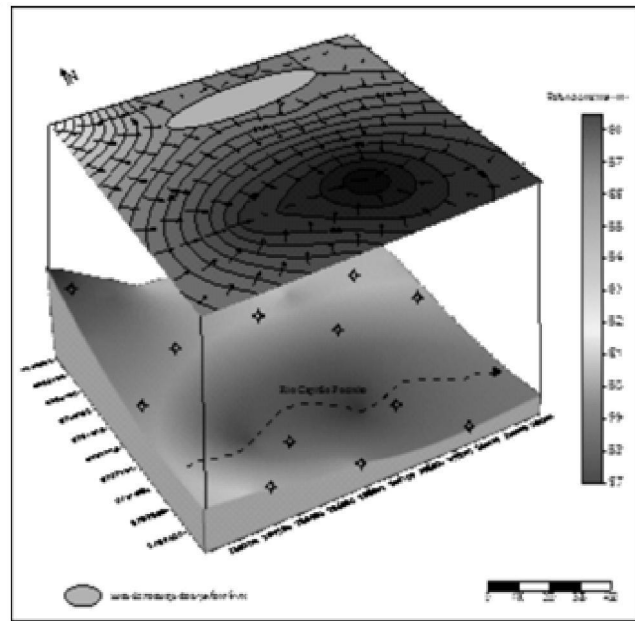


Fig. 7 - Bloco diagrama tridimensional mostrando a superfície potenciométrica e o sentido de fluxo das águas subterrâneas rasas, período de déficit hídrico de 2009, nas nascentes da Microbacia do rio Capitão Pocinho

adquiridas nos poços PM4, PM6 e PM15, no extremo sul da área de estudo, associado aos dados obtidos nos demais poços de monitoramento, definem o gradiente hidráulico e conseqüentemente a delimitação das zonas de recargas e descarga das águas subterrâneas rasas. Nos poços PM6 e PM8, situados em terrenos planos, foram registrados os menores valores de potenciometria.

A espessura dos aquíferos é maior na margem esquerda do que na margem direita do rio Capitão Pocinho, o que contribui para explicar as variações da superfície potenciométrica entre os períodos analisados.

Na zona de recarga do extremo norte, o sentido de fluxo está direcionado para N-NE e S-SE, enquanto que na zona de recarga sul o fluxo tende para NE-SW. Na porção norte esta configuração contribui para que parte dos agroquímicos aplicados ao solo, na citricultura intensiva, não seja transportado em direção a vila de Capitão Pocinho.

- *Comparação entre os dois mapas potenciométricos elaborados para o período chuvoso e de déficit hídrico*

Os mapas de potenciometria do período chuvoso (Fig. 6) e de déficit hídrico (Fig. 7) foram elaborados com base nos dados de cota do topo do Aquífero Livre Barreiras e de nível da água obtidos nos poços construídos na área de pesquisa. A partir das curvas de equipotenciais foi possível definir-se o sentido do fluxo das águas subterrâneas rasas (freática) do Aquífero Livre Barreiras.

Nestes mapas observa-se que a crista da superfície potenciométrica, no extremo norte da área de estudo, caracteriza-se como uma zona de recarga local do Aquífero Livre Barreiras. No extremo sul e na porção oeste a zona de recarga encontra-se fora da área de pesquisa.

Neste contexto, o Aquífero Livre Barreiras condiciona um regime influente no ciclo hidrológico local, demonstrando uma relação direta entre as águas de infiltração e aquelas de superfície de drenagem principal, durante o período de déficit hídrico. Para os dois períodos analisados, o sentido de fluxo das águas subterrâneas rasas apresentou

incipientes alterações. Ressalte-se que todas as linhas de fluxos principais aparecem no sentido do rio Capitão Pocinho.

O gradiente hidráulico, no extremo norte, apresenta uma configuração convexa na área de recarga, durante o período chuvoso e um alongamento desta forma no período de déficit hídrico. Esta mudança geométrica da área de recarga é atribuída à diminuição da profundidade do nível potenciométrico neste último período, em decorrência do processo final de lixiviação das águas pluviométricas. Nesta área o sentido de fluxo das águas subterrâneas rasas é discordante com a morfologia da superfície topográfica do terreno.

A espessura média da superfície potenciométrica no período chuvoso, em relação à média no período de déficit hídrico, foi de 56,84 m no poço PM15 a 68,47m no poço PM9. O poço PM9 também apresentou o máximo valor potenciométrico (67,58 m), no período chuvoso. A oscilação da carga hidráulica difere, em média, apenas 0,79 m de um período para outro. Durante o ciclo hidrológico do período analisado ocorreu uma diminuição incipiente no valor do gradiente hidráulico e significativa modificação na inclinação da superfície potenciométrica na porção centro-norte.

Considerando-se o sentido de fluxo das águas subterrâneas rasas recomenda-se o adensamento da rede de poços de monitoramento, entre os poços PM8 e PM14, assim como entre os poços PM6 e PM7 com o objetivo de detectar a pluma poluente com maior precisão. Esta avaliação evidencia que a pluma de contaminação, de origem difusa, tende em direção à região urbana da vila de Capitão Pocinho.

#### *Estimativa da velocidade do fluxo das águas subterrâneas rasas*

O objetivo da determinação da velocidade do fluxo das águas subterrâneas rasas foi estabelecer o provável tempo de percolação da pluma de contaminante, até atingir os poços caseiros (manuais) na vila de Capitão Pocinho. A água destes poços é utilizada pela população residente para consumo doméstico. A velocidade do fluxo foi determinada através da lei de Darcy.

A condutividade hidráulica da zona saturada do aquífero livre foi resultante dos dados obtidos nos quinze “*Slug-tests*”, realizados na rede de poços de monitoramento, de acordo com o teste desenvolvido por Hvorslev. O ensaio foi interpretado utilizando-se o programa *Aquifer Test*, da empresa *Waterloo Hydrogeologic Inc.*

Para o cálculo da velocidade de deslocamento do fluxo das águas subterrâneas rasas foi adotado o mesmo valor de porosidade calculado para a zona insaturada do aquífero livre. O valor da porosidade foi de 39 % (Araújo et al. 2011).

O gradiente hidráulico (i) foi determinado a partir do mapa potenciométrico, através da seguinte equação matemática:  $i = (dh/dL)$ . A oscilação do potencial hidráulico (dh) e a distância entre os poços de monitoramento PM1 e PM14 (dL) foram de

1,37 m e de 286 m, respectivamente. Deste modo, obteve-se o valor do  $i = 0,0022$ .

De acordo com os resultados obtidos nas quinze (15) determinações, através do *slug test*, os valores de condutividade hidráulica (K) da zona saturada do aquífero livre, situam-se entre o mínimo de  $1,01 \times 10^{-4}$  cm/s e o máximo de  $8,0 \times 10^{-3}$  cm/s. Tendo-se como base valores de condutividade hidráulica apresentados na literatura para diferentes materiais geológicos (Tab. 4), constatou-se que os sedimentos da zona saturada classificam-se como silte arenoso e areia fina (Fetter, 1988). Essa classificação difere pouco daquela obtida através das análises granulométricas para a zona não saturada do aquífero livre, embora os poços de monitoramento estudados não revelem diferenças significativas na descrição do perfil litológico.

Tab. 4 Valores de condutividade hidráulica (K) em cm/s para alguns materiais geológicos (modificado de Fetter, 1980).

<b>Materiais</b>	<b>K (cm / s)</b>
Cascalho bem selecionado	$1 - 10^{-2}$
Areia bem selecionada	$10^{-1} - 10^{-3}$
Silte arenoso, areia fina	$10^{-3} - 10^{-5}$
Silte, areia siltica, argila arenosa	$10^{-4} - 10^{-6}$

Substituindo-se os valores de K,  $\eta$ , dh e dL na equação matemática  $v = (K/\eta) \times (dh/dL)$ , pelos seus respectivos valores, tem-se que a velocidade linear média (v) do fluxo das águas subterrâneas rasas, na zona saturada do aquífero livre, em condições naturais, é a seguinte:

$$v = (0,17/0,39) \times (0,005) = 0,0022 \text{ m/dia}$$

ou  $v = 0,80 \text{ m/ano}$

Ressalte-se que o movimento da água através do aquífero livre não está limitado à zona abaixo da superfície potenciométrica ou à zona saturada, mas também à franja capilar. A água na franja capilar está sujeita ao mesmo gradiente hidráulico que existe na superfície potenciométrica. Assim, a água na franja capilar move-se, no mesmo sentido que as águas subterrâneas rasas. A velocidade do movimento lateral na franja capilar decresce no sentido vertical ascendente e torna-se zero no topo da franja.

Considerando-se os tempos de trânsito que são eficientes na degradação dos agroquímicos, o

afastamento seguro entre a fonte contaminante e qualquer tipo de captação de água potável deve ser pelo menos, a equivalente à distância percorrida pelas águas subterrâneas rasas num período de duzentos e dez dias, como recomenda a legislação americana (Cavalcanti, 1996).

## 5. Conclusões

A análise da correlação entre a precipitação pluviométrica (399,30 e 49,30 mm/anuais) e a oscilação da profundidade do nível estático sugere uma continuidade lateral e vertical da unidade de armazenamento e transmissão de águas subterrâneas rasas locais, na parte superior do terreno. A superfície potenciométrica apresentou localmente oscilações sazonais entre 11,16m e 12,80m. Neste ambiente hidrogeológico foram constatadas evidências de que o processo de recuperação da superfície potenciométrica ocorre logo após o término do período chuvoso.

A correlação estatística positiva direta do índice pluviométrico com a superfície potenciométrica ocorreu quase na totalidade dos poços analisados, com exceções aos poços PM6 ( $r_{PM6} = -0,08$ ;  $p < 0,01$ ) e PM8 ( $r_{PM8} = -0,26$ ;  $p < 0,05$ ). Uma correlação positiva indica que as duas variáveis movem-se na mesma direção em 97% dos poços analisados.

O fluxo da água subterrânea desenvolve-se a partir dos limites da área de estudo, região compreendida entre os poços PM1, PM2, PM9, PM10 ao norte, poços PM3 e PM6 a leste e oeste, respectivamente e poços PM4, PM5 e PM15, fluindo com equipotenciais situadas entre os níveis 70,20 e 55,10 metros no sentido do rio Capitão Pocinho e seus afluentes menores, onde atinge o nível potenciométrico menor do que 30m.

O perfil longitudinal da superfície potenciométrica está localizado nos extremo norte, sul e oeste da área de estudo. No extremo norte esta crista configura-se como uma zona de recarga local do Aquífero Livre Barreiras.

A profundidade da superfície potenciométrica é de forma geral pequena, com valores entre os limites 56,84m a 68,47m, como medidos nos poços PM9 e PM15, respectivamente. Sua oscilação ocorre a partir das margens do rio Capitão Pocinho, de forma crescente na direção dos limites da área de pesquisa. A posição da base do aquífero livre situa-se em torno de 16m.

O nível da água nos poços de monitoramento sofreu oscilação de 1,60m a 4,90m, sendo os menores valores observados nos poços situados nas cotas mais baixas (PM6, PM7 e PM8). Conforme demonstrado nas figuras 6 e 7, no final do processo de lixiviação das águas pluviais (período de déficit hídrico), a profundidade mínima da água subterrânea rasa, nas áreas onde estão situados os dois conjuntos de poços de monitoramento, é de 4,20m (PM15).

Estima-se que a velocidade linear média ( $v$ ) do fluxo das águas subterrâneas rasas, na zona saturada do aquífero livre, em condições naturais, é de aproximadamente 0,80 m/ano.

De acordo com a velocidade de deslocamento das águas subterrâneas rasas (0,80 m/ano) e considerando-se que: 1) as águas subterrâneas rasas fluem no sentido da vila de Capitão Pocinho; 2) o

tempo do plantio intensivo de citros por um longo período (cerca de 20 anos) e a proximidade da zona urbana da vila de Capitão Pocinho com a zona rural, conclui-se que a frente da pluma dos contaminantes utilizados na citricultura intensiva, embora incipiente, já atingiu alguns poços de captação de água para consumo humano, no ano de 2009. Contudo, tratando-se de defensivos agrícolas devem ser realizadas análises mais detalhadas de modo a proteger a saúde pública.

## Referências Bibliográficas

- Arai, M. 2006. *A grande elevação eustática do Mioceno e sua influência na origem do Grupo Barreiras*. Geologia USP: Série Científica, v. 6, n. 2, p. 1-6
- Araújo, P. P.; Francisco A. Oliveira; Herdjanía V. Lima; Joaquim C. B. Queiroz & Itabaraci N. Cavalcante 2011. Propriedades físicas e dinâmicas da infiltração em agroecossistema de *citrus sinensis* L (laranja), nordeste Pará. Submetido, em abril de 2011, à Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental
- Borges, M. S. & Angélica, R. S. 1986. Levantamento geológico da Ilha do Mosqueiro - Estado do Pará. Belém: Universidade Federal do Pará, Projeto Fosfatos na Amazônia, 34 p.
- Cavalcanti, M. A. M. P. 1996. Impacto dos Sistemas de Saneamento "in situ" nas Águas Subterrâneas no bairro de Piratininga - Município de Niterói (RJ). Dissertação de Mestrado apresentada ao Instituto de Geociências da Universidade de São Paulo - São Paulo. 95 p.
- Costa M. L. da 1991. Aspectos geológicos dos lateritos da Amazônia. Rev. Bras. Geoc. São Paulo, 21 (2): 146-160
- Domenico, P. A. & Schwartz W. 1990. Physical and chemical hydrogeology. John Wiley & Sons, Inc., 842 p.
- ESRI ArcGIS 9.2. 2006. Environmental Systems Research Institute, Redlands, CA
- Farias, E. S; Nascimento, F. S; Ferreira, M. A. A. 1992. Área de Belém / Outeiro: Relatório Final. Belém, Centro de Geociências - Universidade Federal do Pará, 247 p.

Freeze, R. A. & Cherry, J. A. 1979. Groundwater. Prentice-Hall, Inc., Englewood Cliffs, Nova Jersey, EUA, 604 p.

Ferreira, C. S. 1982. Notas estratigráficas sobre o Cenozóico do Estado do Pará. In: SIMPÓSIO DE GEOLOGIA DA AMAZÔNIA, 1, Belém, 1982. Anais do... Belém: SBG, 1982. v. 1, p. 84-88.

Góes, A. M. 1981. Estudos sedimentológicos dos sedimentos Barreiras, Ipixuna e Itapecuru, no nordeste do Pará e Noroeste do Maranhão. Belém., 1981. 55 p. (Dissertação de Mestrado) - Universidade Federal do Pará

Healy, R.W.; Cook, P.G. 2002. Using groundwater levels to estimate recharge. *Hydrogeology Journal*, v. 10: DOI 10.1007/s10040-001-0178-0

Hubbert M.K., 1940. The Theory of Ground-Water Motion. *The Journal of Geology*, Vol. 48, #8, Part I, Nov.-Dec. 1940, p. 785-944 (reprinted in M.King Hubbert, 1969. *The Theory of Ground-Water Motion and Related Papers*. Hafner Publishing Company, New York and London, 1969; with corrections)

Igreja, H. L. S.; Borges, M. S.; Alves, R. L.; Costa Júnior, P. S. C.; Costa, J. B. S. 1990. Estudos neotectônicos nas ilhas do Outeiro e Mosqueiro, NE do Estado do Pará. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA, 36. Natal. Anais... Natal: Sociedade Brasileira de Geologia, 1990, v.5, p. 2110-2123

SEICOM. Secretaria de Estado de Indústria, Comércio e Mineração, IBGE. 1995. Plano Diretor de Mineração em Áreas Urbana Região Metropolitana de Belém e Adjacências: projeto de estudo do meio ambiente em sítios de extração de materiais de construção na região de Belém - Benevides, Estado do Pará, Relatório Final. Pará- Secretaria de Estado de Indústria, Comércio e Mineração - e IBGE – Fundação Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística, Belém, 157p – 2v.

Sokal R R & Robli F I. *Biomeiry: the principles and practice 0/statistics in biological research*. San Francisco: W.H. Freeman, 1981. 859 p.

SURFER. Contouring and 3D surface mapping for scientists and engineers. 2004. User's Guide. Golden Software Inc.. Versão 8. Colorado - U.S.A