

DETERMINAÇÃO DA VELOCIDADE E SENTIDO DO FLUXO DE ÁGUAS SUBTERRÂNEAS UTILIZANDO RADIOISÓTOPOS PELA TÉCNICA DO POÇO ÚNICO

José Reinaldo Cardoso NERY ¹, Leopoldino dos Santos FERREIRA ²,
Helyelson Paredes MOURA ¹

(1) Laboratório de Física Aplicada, Universidade Federal do Amapá (UNIFAP). Rodovia Juscelino Kubitschek, km 02, Marco Zero. CEP 68902-280. Macapá, AP. Endereços eletrônicos: jrny@unifap.br; helyelson@unifap.br.

(2) Laboratório de Radiações, Universidade Federal do Pará (UFPA). Avenida Augusto Corrêa, s/n – Guamá. CEP 66.000-000. Belém, PA. Endereço eletrônico: leopold@amazon.com.br.

Introdução
Fundamentação Teórica
Velocidade de Filtração
Direção e Sentido do Fluxo
Considerações Sobre Traçadores
Materiais e Métodos
Determinação da Velocidade
Determinação da Direção e Sentido do Fluxo
Discussão
Conclusões e Recomendações
Agradecimentos
Referências Bibliográficas

RESUMO – Metodologia radioisotópica, através da técnica do poço único, foi empregada com o objetivo de determinar a velocidade e o sentido de deslocamento do fluxo de águas subterrâneas, utilizando traçadores radioativos, em poços piezométricos situados no campus da Universidade Federal do Pará (UFPA), em Belém-PA, às margens do Rio Guamá. Foi utilizado o iodo-131 como radiotraçador e a aquisição dos dados foi feita através de sistema espectrométrico, utilizando detectores de radiação. A aplicação dessa técnica na determinação conjunta da velocidade e sentido do fluxo, embora não seja usual, permitiu concluir que se trata de uma alternativa promissora que pode ser aplicada rotineiramente, proporcionando clareza e segurança nos resultados.

Palavras-chave: Traçadores radioativos, águas subterrâneas, iodo-131, hidrogeologia isotópica, poço único.

ABSTRACT – *J.R.C. Nery, L. dos S. Ferreira, H.P. Moura - Determination of the velocity and the direction of groundwater flow by using radioisotopes.* Radioisotope methodology through the single-well technique have been used with the objective of determining velocity and direction of groundwater flow with radioactive tracers in boreholes located at Universidade Federal do Pará (UFPA), Belém-PA, Brazil, next to Guamá river. We used radiotracer iodine-131 and data was acquired by means of spectrometric system with radiation detectors. The application of this technique to determine jointly velocity and direction of flow, despite not usual, appeared to be a good alternative for further practical applications.

Keywords: Radioactive tracers, groundwater, iodine-131, isotope hydrology, single-well.

INTRODUÇÃO

O conhecimento das características de movimento das águas subterrâneas na zona saturada do solo, como a velocidade de filtração e a direção do fluxo, encontra sua aplicação prática no estudo da dispersão de poluentes no subsolo próximo a indústrias químicas, centrais nucleares e grandes depósitos de lixo dos centros urbanos, possuindo também grande importância para a engenharia civil, sanitária e ambiental. A determinação dessas características depende diretamente da formação geológica local e suas características como a permeabilidade e porosidade. O gradiente hidráulico também é um fator fundamental e com influência direta nos resultados (Halevy et al., 1967; Sanchez, 1975; Ferreira, 1976).

As técnicas tradicionais que utilizam traçadores para a determinação de parâmetros hidrogeológicos geralmente necessitam da aplicação de grandes quantidades do material utilizado, alterando significativamente, por efeito de densidade, a natureza do fluxo e provocando contaminações duradouras no aquífero ou, ainda, os efeitos de adsorção e absorção produzem resultados muitas vezes insatisfatórios (Halevy et al., 1967; Ferreira, 1976). O desenvolvimento das técnicas baseadas no emprego de traçadores radioativos, largamente utilizadas nos países desenvolvidos (Borowczik et al., 1965, 1967; Halevy et al., 1967; Drost, 1983; Hall, 1993; Leap & Kaplan, 1988; Divine & McDonnell, 2005), mas ainda pouco aplicadas por técnicos nacio-

nais, oferece uma alternativa segura de aplicação em hidrogeologia, permitindo que o traçador seja utilizado em formas químicas apropriadas, reduzindo os efeitos de adsorção ao meio poroso e apresentando maior precisão na obtenção dos resultados. Por outro lado, a complexidade intrínseca que caracteriza a maioria dos sistemas hidrogeológicos dificulta o estabelecimento de modelos matemáticos que expliquem adequadamente o comportamento do sistema considerado. Como existe uma grande variedade de técnicas utilizadas na investigação hidrogeológica (Sanchez, 1975; Leap & Kaplan, 1988; Hall, 1993; Scanlon et al., 2002), torna-se, então, importante a comparação de resultados obtidos por diferentes processos, principalmente porque os erros cometidos

em cada um geralmente provêm de fatores distintos.

Neste trabalho utilizamos a técnica do poço único como forma alternativa de determinação da velocidade e direção do fluxo de águas subterrâneas, através de aplicações nucleares, com o uso de traçadores radioativos. Essa técnica é especialmente promissora pela simplicidade na sua aplicação, baixo custo operacional e possibilita caracterizar variações locais e espaciais de importantes propriedades hidrogeológicas, como a velocidade e o sentido do fluxo de águas (Hall, 1993; Divine & McDonnell, 2005). A maioria dos equipamentos utilizados nos ensaios experimentais foi projetada e construída no Laboratório de Radiações da Universidade Federal do Pará (UFPA).

FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Entre os métodos mais diretos para se determinar a velocidade de filtração horizontal estão aqueles baseados no emprego de traçadores radioativos adicionados ao fluxo natural do aquífero (Halevy et al., 1967). Fundamentalmente, esses métodos baseiam-se na injeção de um traçador radioativo ao fluxo natural do aquífero, que é deslocado naturalmente pela ação deste, possibilitando a análise de seu comportamento e a determinação da velocidade do fluxo.

Para estabelecer a direção e o sentido do fluxo subterrâneo, as técnicas baseadas no emprego de traçadores radioativos oferecem a possibilidade de determinação direta daqueles parâmetros. A sua principal limitação é a existência de correntes verticais que podem deslocar o traçador, verticalmente, dentro do poço.

VELOCIDADE DE FILTRAÇÃO

O método utilizado para a determinação da velocidade horizontal de filtração foi proposto inicialmente por O. J. Kocherin, em 1916 (Halevy et al., 1967). O objetivo do método é obter medidas diretas de parâmetros característicos de um aquífero, principalmente a velocidade de filtração, em uma determinada formação geológica onde a água subterrânea flui sob a ação de um gradiente hidráulico. A obtenção desses parâmetros é feita mediante a utilização de traçadores radioativos líquidos, especialmente preparados para aplicações ambientais, observando as normas que estabelecem limites para essas atividades.

O princípio básico deste método consiste na utilização de um único piezômetro através do qual se injeta no aquífero uma certa quantidade de traçador radioativo com uma concentração C_0 . A injeção é feita em uma coluna de água de altura h , em um piezômetro

revestido por tubo de pvc, cujo diâmetro interno é igual a d , conforme ilustrado na Figura 1. Os fluxos existentes no aquífero transportam a solução radioativa para fora da perfuração, ocasionando um decréscimo na sua concentração, observado através do decaimento da atividade da amostra, por intermédio de um sistema de detecção nuclear.

A velocidade aparente, v_a , da água no interior do piezômetro é dada por (Halevy et al., 1967; Riemann et al., 2002):

$$v_a = -\frac{V}{S\Delta t} \ln \frac{C}{C_0} \quad (1)$$

onde Δt representa o intervalo de tempo entre duas medidas consecutivas de concentração do traçador, C_0 e C ; V é o volume da região de injeção e S , sua área transversal.

A velocidade é dita aparente porque desconsidera o efeito do decaimento radioativo no decréscimo da concentração do traçador, além da perturbação hidrodinâmica no fluxo d'água, causada pela perfuração no aquífero (Halevy et al., 1967; Lamontagne et al., 2002).

Como desejamos medir a redução da concentração ocasionada apenas pelo transporte do traçador para fora do volume de diluição, o efeito do decaimento radioativo do traçador deverá ser compensado de modo que o decréscimo da concentração do traçador, medido no interior da perfuração, seja apenas em virtude de seu deslocamento pelo fluxo natural da água, sem a influência de sua desintegração radioativa. Podemos, também, substituir a concentração do traçador pela sua atividade radioativa, A , pois $C = A/V$. Com isso, a velocidade real de filtração, v_f , pode ser expressa por:

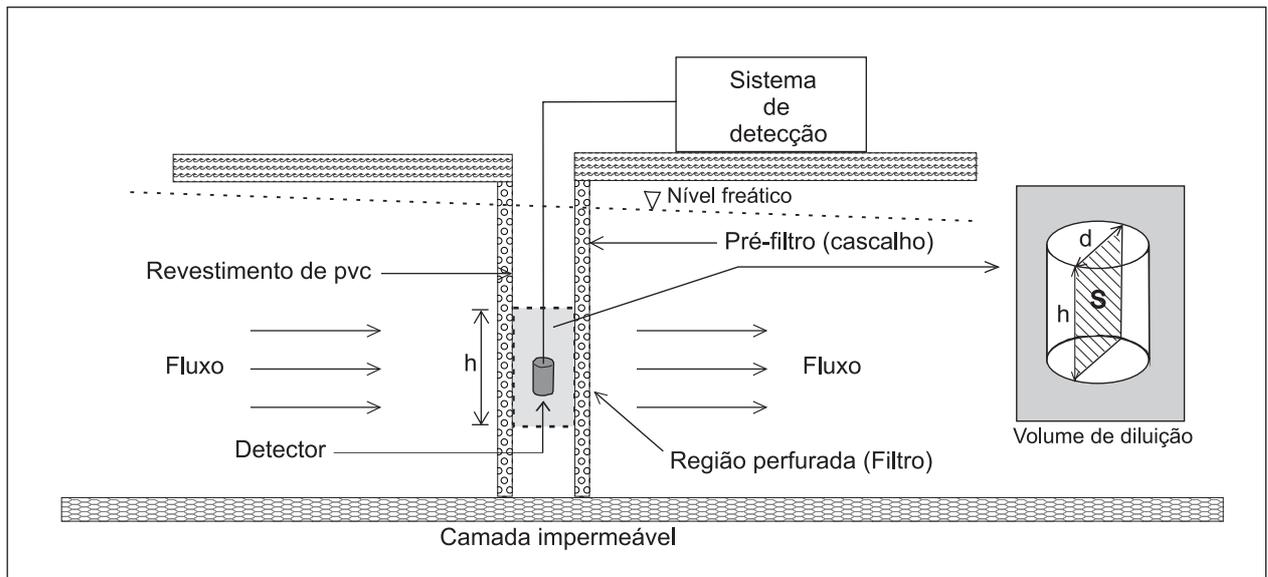


FIGURA 1. Modelo de perfuração para a determinação da velocidade e sentido do fluxo de águas subterrâneas mostrando em destaque a geometria do volume de diluição (adaptado de Plata, 1972).

$$v_f = -\frac{V}{\alpha S \Delta t} \ln \left(\frac{Ae^{\frac{0,693\Delta t}{T_{1/2}}}}{A_0} \right) \quad (2)$$

onde α é um fator que corrige as distorções ocasionadas nas linhas de fluxo em virtude da perturbação hidrodinâmica devido à presença do piezômetro. O fator $e^{\frac{0,693\Delta t}{T_{1/2}}}$ compensa o efeito do decaimento radioativo, onde $T_{1/2}$ é a meia-vida do elemento traçador (Halevy et al., 1967; Ferreira, 1976).

O coeficiente α , chamado de constante de Ogilvi, é definido por $\alpha = Q/Q_0$, onde Q é a vazão através da seção S , no interior do piezômetro, e Q_0 é a vazão, através da mesma seção, na ausência da perfuração, ou seja, na formação geológica natural do aquífero. Na prática, o fator α pode ser calculado por (Halevy et al., 1967; Drost, 1983):

$$\alpha = \frac{4}{1 + \left(\frac{r_1}{r_2}\right)^2 + \frac{k_2}{k_1} \left[1 - \left(\frac{r_1}{r_2}\right)^2\right]} \quad (3)$$

onde r_1 e r_2 representam, respectivamente, os raios interno e externo da tubulação que reveste a perfuração e k_1 e k_2 correspondem às permeabilidades da região perfurada na tubulação (filtro) e da formação geológica natural, respectivamente.

Considerando r_0 o raio da sonda detectora, e r_1 o raio interno da tubulação de revestimento, temos que o

volume V será, portanto, igual a $\pi h(r_1^2 - r_0^2)$, e a seção S igual a $2h(r_1 - r_0)$, onde h é a altura da região cilíndrica ocupada pela solução radiotraçadora.

DIREÇÃO E SENTIDO DO FLUXO

O método utilizado foi introduzido por J. Mairhofer, em 1963, que fez uma descrição básica da construção dos equipamentos utilizados e mostrou os primeiros resultados de medidas e, posteriormente, foi adotado por outros pesquisadores que contribuíram de maneira relevante para o seu desenvolvimento (Borowczik et al., 1965, 1967; Halevy et al., 1967; Mairhofer, 1967).

Diversas técnicas experimentais são aplicadas na determinação da direção e sentido do fluxo de águas subterrâneas, utilizando traçadores radioativos. Entretanto, todas se baseiam no mesmo princípio: o traçador é injetado em um segmento do piezômetro e transportado na direção correspondente ao fluxo natural, exclusivamente por ação deste; após certo tempo, a atividade da solução radioativa é medida por um detector acoplado a uma sonda provida de uma “janela”, indicando que o sentido de máxima intensidade radioativa coincide com o sentido do fluxo natural da água subterrânea. Em geral, deseja-se que o radioisótopo seja adsorvido nas paredes do piezômetro, ou pelo material sólido em suas proximidades, para que o processo de detecção radioativa permita uma boa definição da direção do fluxo. Caso não haja a adsorção, o traçador poderá se distanciar bastante do detector, principalmente em fluxos com velocidades relativamente elevadas, dificultando sua detecção.

Após a injeção, aguarda-se o tempo necessário para que o traçador seja transportado para a vizinhança da perfuração. Adota-se, em geral, o tempo necessário para que 99% do traçador seja transportado pelo fluxo natural do aquífero e, na prática, pode ser calculado por (Sanchez, 1975):

$$t_{99\%} = \frac{3,62 d}{\alpha v_f} \quad (4)$$

onde d é o diâmetro externo da tubulação que reveste a perfuração.

Após o tempo de espera, inicia-se o processo de detecção com a sonda colimada mantida suspensa por uma haste rígida, como mostrado na Figura 2. A sonda é rigidamente fixada a uma mesa graduada, na superfície, permitindo ser girada, realizando uma varredura de 360° com a janela do detector.

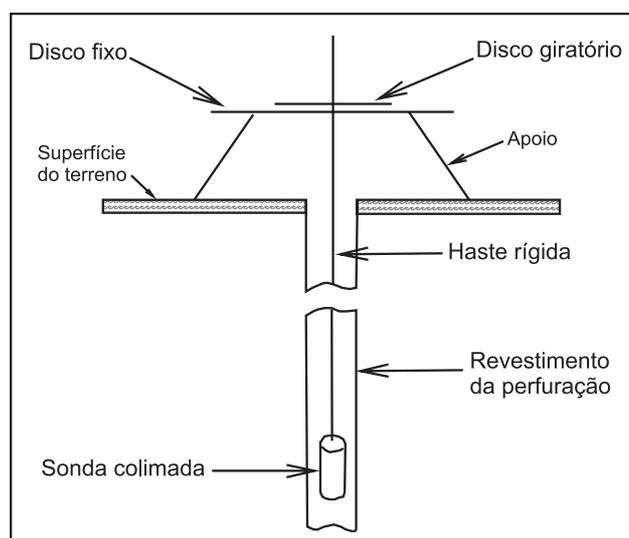


FIGURA 2. Esquema da montagem do sistema de determinação do sentido do fluxo (adaptado de Nery, 2000).

A resposta obtida através dessa varredura possibilitará a construção de um gráfico polar, onde a região de intensidade radioativa máxima indica o sentido do fluxo. Na prática, esta varredura poderá ser feita em saltos de até 30°, apresentando resultados confiáveis (Borowczyk et al., 1967). Sob condições favoráveis, como a escolha correta e a boa diluição do traçador, o instrumental adequado e a ausência de fluxos verticais, este método poderá fornecer informações valiosas, que não poderiam ser obtidas por outros métodos. Poderá, por exemplo, ser aplicado inclusive quando a perfuração atravessar mais de um aquífero, desde que a injeção seja feita em um trecho isolado do piezômetro (Halevy

et al., 1967). Esta é uma das principais vantagens deste método, frente aos métodos clássicos.

CONSIDERAÇÕES SOBRE TRAÇADORES

A concentração excessiva do traçador em um ponto da região de injeção poderá ocasionar a determinação de um valor maior para a velocidade de filtração, em função da ausência de diluição do traçador em todo o volume de água naquela região. Entretanto, Plata (1972, 1983) comprovou experimentalmente que, apesar de não se agitar o traçador na água da coluna piezométrica, a lei exponencial de diluição se cumpre de maneira satisfatória para velocidades inferiores a 5 m/dia. Uma escolha adequada do radiotraçador pode, praticamente, eliminar os efeitos de densidade devido à concentração.

Para a determinação da velocidade, recomenda-se a utilização de traçadores não adsorventes com meia-vida relativamente curta. A solução radioativa deverá ser feita com a água do próprio aquífero, utilizando um radioisótopo livre de carreador. A temperatura da solução deverá ser a mesma da água da formação. Traçadores radioativos como o ^{131}I (NaI), trítio, ^{82}Br (NH_4Br) são freqüentemente utilizados, apresentando resultados satisfatórios (Halevy et al., 1967; Tazioli & Tazioli, 2001).

No procedimento para a determinação da direção do fluxo, geralmente são empregados radiotraçadores que possuam as propriedades de serem adsorvidos pelos materiais sólidos do meio, de modo que as paredes do piezômetro, ou sua vizinhança, sejam marcadas por certo tempo, determinando a trajetória seguida pela solução radioativa. As principais composições usadas como traçadores adsorventes são: $^{198}\text{AuCl}_3$, $^{51}\text{CrCl}_3$, ^{131}IAg , ^{32}P na forma de fosfato e ^{131}I na forma de tetra iodo de fluoresceína (rosa de bengala). Como traçadores não adsorventes têm sido utilizados o $^{82}\text{BrNH}_4$ e o Na^{131}I (Plata, 1972; Sanchez, 1975; Tazioli & Tazioli, 2001).

Quando se emprega traçadores adsorventes na determinação do sentido do fluxo, deve-se utilizar um detector colimado e, no caso de traçadores não adsorventes, um arranjo de detectores ao redor do piezômetro poderá ser empregado em piezômetros de grande diâmetro. A injeção pontual, no centro do piezômetro, resulta em informações mais precisas do que no caso de se misturar homogênea a solução radioativa na água subterrânea no interior do aquífero.

Borowczyk et al. (1965, 1967) utilizaram o ^{131}I na determinação da velocidade de filtração através do método da diluição pontual e, posteriormente, sem injeção adicional, determinaram o sentido do fluxo no aquífero, obtendo resultados bastante satisfatórios ao injetar 1 mCi de ^{131}I em um fluxo de velocidade igual a $1,6 \times 10^{-2}$ cm/s.

Correntes verticais poderão transportar o radio-traçador para fora da região perfurada de medição. No caso da presença de tais correntes, equipamentos

especiais deverão ser utilizados para eliminar, ou minimizar, seus efeitos (Borowczyk et al., 1965; Halevy et al., 1967).

MATERIAIS E MÉTODOS

O aquífero utilizado para os trabalhos de campo está situado na região do Campus Universitário da UFPA, às proximidades do rio Guamá e do igarapé Tucunduba, em Belém-PA. No local foram instalados dois piezômetros, P1 e P2 (Figura 3), exclusivamente para serem utilizados em trabalhos desta natureza. O piezômetro P1 foi utilizado para as injeções do traçador, enquanto que o P2 serviu para observação do comportamento do nível freático.

Os piezômetros foram separados por uma distância de 8,0 m, de modo que o nível freático observado

através de P2 apresente, aproximadamente, o mesmo comportamento de P1. Ambos foram perfurados com profundidade de 30 m, uma vez que, de acordo com o perfil geológico obtido através da sondagem (Figura 4), foi localizada uma região predominantemente arenosa entre as profundidades 24,5 m e 28,5 m, tendo permeabilidade estimada em 0,3 m/s (Ferreira & Gomes 1993; Nery, 2000). Os piezômetros foram revestidos com tubo PVC dotado de filtro perfurado entre 24 m e 30 m de profundidade, de tal modo a abranger a região de fluxo mencionada anteriormente.

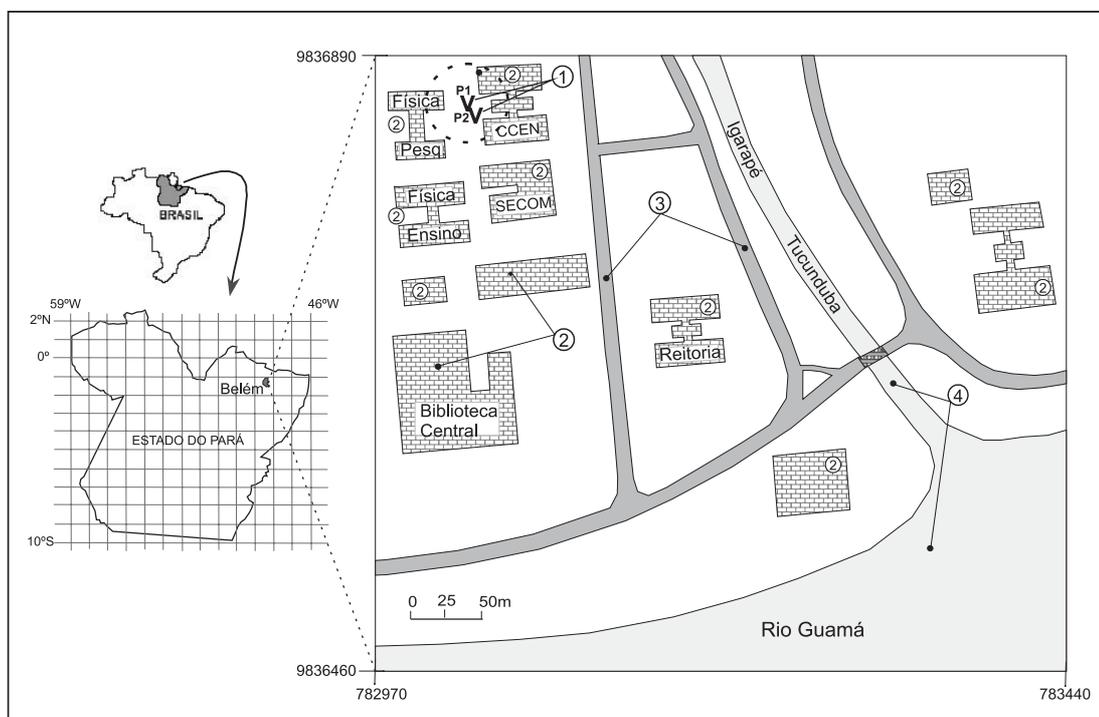


FIGURA 3. Localização dos piezômetros utilizados nas experiências de campo.

1: Poços piezométricos. 2: Edificações. 3: Ruas. 4: Rio/igarapé.

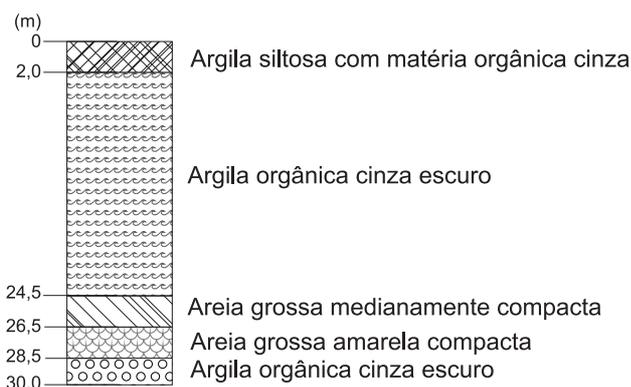


FIGURA 4. Perfil de sondagem dos poços piezométricos (Nery, 2000).

DETERMINAÇÃO DA VELOCIDADE

Utilizou-se como traçador o Iodo-131, com meia-vida de 8 dias, aproximadamente, e que, utilizado na composição química de iodeto de sódio, tem apresentado resultados bastante satisfatórios na determinação da velocidade de águas subterrâneas (Borowczyk et al., 1965, 1967; Sanchez, 1975; Tazioli & Tazioli, 2001). Além disso, a facilidade de aquisição, o custo relativamente baixo, a meia-vida compatível com a duração da experiência e a facilidade no manuseio contribuíram para essa escolha. A principal limitação deve-se ao tempo transcorrido entre a aquisição do traçador junto às instituições competentes e sua aplicação no campo de pesquisa, uma vez que, nesta situação, a curta meia-vida torna-se um inconveniente.

Uma sonda multidirecional foi introduzida no aquífero, através do piezômetro P1, na profundidade de 25,5m, ponto central da região que apresenta maior facilidade ao fluxo d'água, por ser composta por areia grossa medianamente compacta (Figura 4). A solução radiotraçadora foi preparada com 1 ml de NaI com atividade de 0,4 mCi, aproximadamente, sendo diluída em 600 ml de água previamente retirada do aquífero para possibilitar a maior semelhança possível entre as características da solução injetada e da própria água subterrânea. Após a injeção da solução radiotraçadora, um dispositivo de câmaras infláveis foi acionado para evitar a influência de possíveis fluxos verticais no interior da perfuração, vedando a tubulação superior e inferiormente, limitando a região de diluição em uma altura de, aproximadamente, 18,0 cm.

Iniciou-se, então, o processo de registro de dados através do sistema de detecção. Foram obtidos 142 registros da taxa de contagem, espaçados de 1 minuto, através de um sistema de espectrometria nuclear. O encerramento do processo de detecção ocorreu após observarmos que a taxa de contagem registrada reduziu-se abaixo de 10% de seu valor inicial.

Os dados foram corrigidos com o tempo de resolução do detector e radiação de *background*. A velocidade de filtração foi calculada utilizando a correção do efeito radioativo, através da equação 2. A permeabilidade do aquífero foi estimada por Ferreira & Gomes (1993), através da descrição do perfil geológico utilizando a tabela descrita por Halevy et al.(1967), que emprega os parâmetros formação geológica e gradiente hidráulico. A permeabilidade do filtro foi determinada através da Figura 5, para uma porcentagem de área perfurada de 2%. Os valores obtidos para a permeabilidade do aquífero e do filtro foram, respectivamente, $k_1 = 0,4$ cm/s e $k_2 = 0,3$ cm/s.

A tubulação de revestimento da perfuração possui diâmetros interno e externo, respectivamente, dados por $d_1 = (7,77 \pm 0,02)$ cm e $d_2 = (8,79 \pm 0,04)$ cm. Com

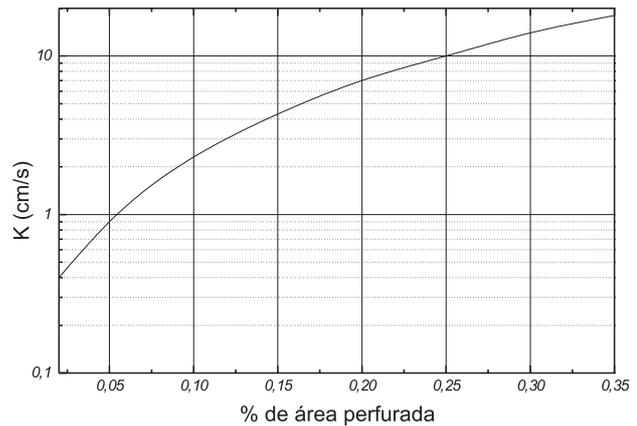


FIGURA 5. Permeabilidade do filtro em função da porcentagem de área perfurada (Ferreira, 1976).

isso, encontrou-se $a = 2,1 \pm 0,1$. Uma vez que a altura da região ocupada pela solução radiotraçadora é $h = (18,64 \pm 0,05)$ cm e o diâmetro da sonda é $d_o = (2,530 \pm 0,007)$ cm, foi determinada a velocidade horizontal do fluxo, no aquífero, resultando $v_f = (1,540 \pm 0,008) \times 10^{-3}$ cm/s.

Uma outra forma de se determinar o valor dessa velocidade é através da representação gráfica da equação 2, ou seja, plotando a concentração relativa do traçador, em função do tempo, em um gráfico semilogarítmico. Com os dados obtidos experimentalmente, foi construído o gráfico apresentado na Figura 6, que representa a expressão $C/C_o = \exp(-2,3 \times 10^{-2} t)$. O coeficiente angular da reta possibilita a determinação de v_f , uma vez conhecidos os demais parâmetros envolvidos na equação.

Alternativamente, podemos determinar a velocidade através da equação 4, utilizando este mesmo gráfico.

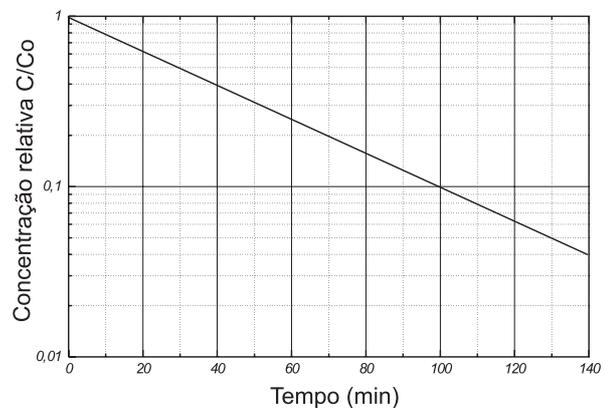


FIGURA 6. Curva de diluição para determinação da velocidade de filtração.

DETERMINAÇÃO DA DIREÇÃO E SENTIDO DO FLUXO

Após a obtenção dos dados para a determinação da velocidade, o tempo necessário para que o traçador se deslocasse para a vizinhança da perfuração já havia sido transcorrido. Então, procedeu-se à retirada do sistema multidirecional de determinação da velocidade e foi introduzido o sistema direcional para a determinação da direção e sentido do fluxo d'água no aquífero, composto por uma sonda colimada excentricamente, contendo um detector Geiger-Müller, fixo rigidamente a uma mesa direcional circular graduada, podendo girar a "janela" do detector através de hastes metálicas, a partir da superfície do terreno (Figura 2).

As medidas foram iniciadas a partir da posição 0°, ou seja, com uma seta indicadora da "janela" do colimador apontando para o norte. A sonda direcional foi girada de 0 a 330°, em intervalos de 30°, no sentido horário, registrando-se, em cada posição, três medidas de um minuto cada e foi calculado o valor médio da taxa de contagem, em contagens por minuto (cpm), para cada posição angular (Borowczyk et al., 1965, 1967; Halevy et al., 1967; Ferreira, 1976). Foram realizadas 8 séries de medidas correspondendo, respectivamente, a 4, 6, 7, 11, 12, 13, 14 e 16 horas após a injeção do traçador (Nery, 2000). Os dados obtidos são mostrados na Tabela 1.

As oito séries de dados evidenciaram a direção do fluxo, conforme mostrado na Figura 7, que apresenta as oito seqüências plotadas em gráfico radial, onde se pode observar a diminuição da atividade registrada com

o decorrer do tempo, em virtude do deslocamento do traçador pelo fluxo da água.

A direção resultante foi obtida pelo método analítico de decomposição de vetores em componentes ortogonais, onde a taxa de contagem obtida em cada posição angular representa a intensidade do vetor. A representação vetorial para a distribuição do traçador ao longo do fluxo é justificada pelo fato de que o mesmo se desloca ao longo das linhas de corrente geradas pelo movimento da água, às quais sempre se associa uma grandeza vetorial. Calculando-se a resultante desses vetores, obtém-se a direção do fluxo da água subterrânea.

Para cada série de medidas calculou-se a direção de deslocamento do traçador. O valor da direção resultante, em relação ao norte, no sentido horário, foi obtido através da média aritmética dos ângulos obtidos em cada série de medidas. Foi determinada, com isso, a direção de $130^\circ \pm 6^\circ$, portanto, no sentido para sudeste.

Por outro lado, calculando os valores médios das taxas de contagem para cada posição angular, foi construído o gráfico polar apresentado na Figura 8, cuja direção do fluxo, calculada pelo mesmo método citado anteriormente, coincide com o valor obtido acima. A Figura 9 é uma outra forma de representação da variação das taxas de contagens em função dos ângulos de rotação, com os mesmos dados da Figura 8, mostrando o maior registro da taxa de contagem na posição angular que corresponde à direção de deslocamento do fluxo da água subterrânea.

TABELA 1. Taxa de contagem registrada em cada amostra de dados.

Direção (graus)	Taxa de contagem (cpm)								
	4h	6h	7h	11h	12h	13h	14h	16h	Média
0	158,5	112	103	68,5	85	89,5	76	77,5	96,3
30	197,5	163,5	167,5	116	122,5	128	113	101	138,6
60	242,5	216	200	141	144,5	138,5	136,5	113,5	166,6
90	276	200	221,5	171,5	175,5	184,5	170	159,5	194,8
120	396,5	231	237	179,5	178,5	192	172,5	175,5	220,3
150	339,5	255	243	192,5	173,5	198	185	171	219,7
180	333	185	245,5	147,5	154,5	151	183	145	193,1
210	240	153,5	192,5	118	113	115	130	125,5	148,4
240	208	132,5	153	104	108,5	106	100	106,5	127,3
270	154	109,5	126	78,5	85	90	73,5	79,5	99,5
300	116	94,5	102,5	69	58	61	56,5	70,5	78,5
330	114,5	86,5	93,5	76,5	69	76	67,5	61	80,6

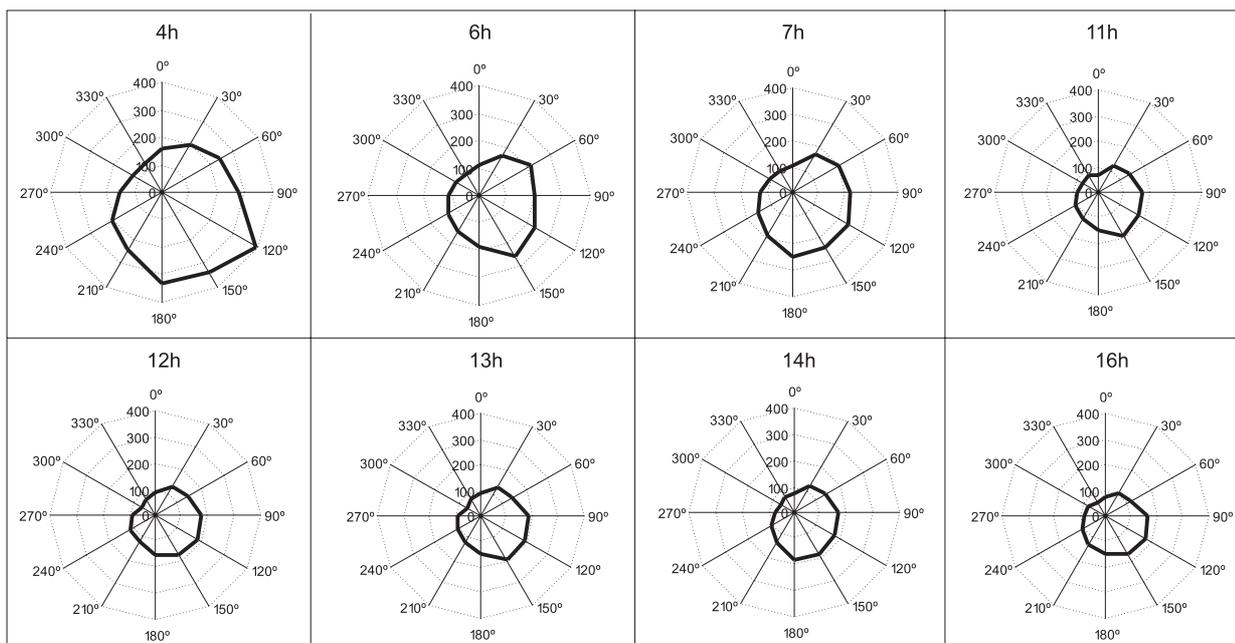


FIGURA 7. Distribuição do traçador (em cpm) de acordo com o tempo da medida após a injeção.

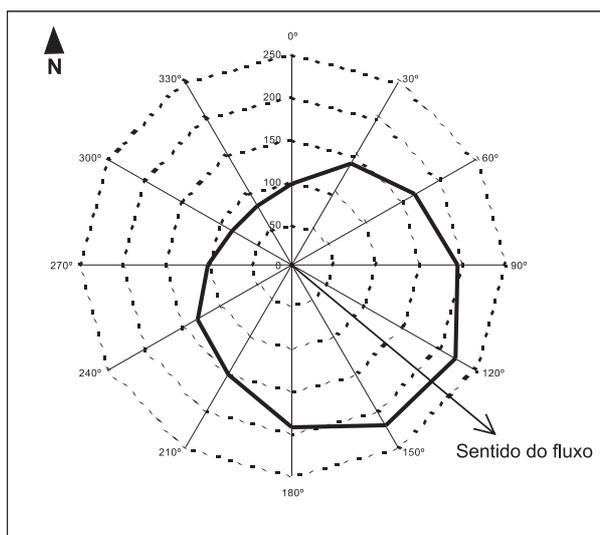


FIGURA 8. Representação polar das taxas de contagem (em cpm), mostrando a distribuição da “nuvem” radioativa, e o sentido de deslocamento do fluxo.

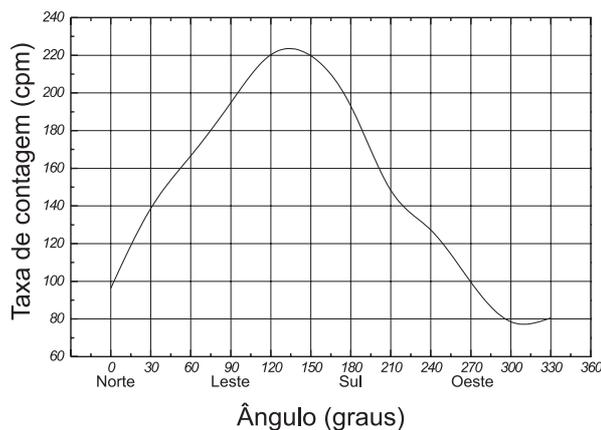


FIGURA 9. Representação das taxas de contagem em função da posição angular. A posição de maior intensidade radioativa indica a direção do fluxo.

DISCUSSÃO

O método utilizado representa uma alternativa viável para determinar a velocidade de filtração sem o conhecimento do gradiente hidráulico. Entretanto, para o cálculo da velocidade real de filtração é necessária a utilização da constante de Ogilvi (Halevy et al., 1967; Sanchez, 1975; Drost, 1983) que necessita o conhecimento da permeabilidade do aquífero. Essa permeabilidade

não foi determinada experimentalmente, tendo sido estimada de acordo com a análise da formação geológica, retirada por ocasião da sondagem, baseado em tabelas especialmente elaboradas para esta finalidade (Halevy et al., 1967; Ferreira & Gomes, 1993; Nery, 2000). Essa estimativa não apresenta influências que alterem de modo significativo nos resulta-

dos, uma vez que também se utiliza a aproximação teórica $\alpha \cong 2,1$, apresentada por Drost et al. (1968, segundo Lamontagne et al., 2002).

Os sedimentos constituintes do aquífero estudado permitem fazer uma estimativa da ordem de grandeza da velocidade da água de cerca de 10^{-4} a 10^{-3} cm/s (Halevy et al., 1967). Dessa forma, o resultado que obtivemos para a velocidade do fluxo apresentou valores da ordem de grandeza do previsto e cujo valor concorda com o obtido por Ferreira & Gomes (1993) em trabalho utilizando a mesma metodologia, entretanto com a aplicação do traçador cromo-51.

Apesar de ter o suporte de formulação relativamente complexa, o método utilizado neste trabalho é aplicado com simplicidade e os equipamentos que compõem o sistema de determinação da velocidade apresentaram comportamento bastante satisfatório para os objetivos deste trabalho.

A técnica empregada para a determinação da direção do fluxo vem sendo aplicada com sucesso,

mostrando ser adequada em aquíferos onde não existe a influência de marés e regimes sazonais irregulares. Neste trabalho, apesar da influência de marés na variação do nível das águas do rio que circunvizinha a região e a intensidade de chuvas no local, não foi observada a possibilidade de refluxo da água do aquífero, fato constatado pelo monitoramento regular do nível freático do poço de estudo por 5 (cinco) anos ininterruptamente (Ferreira & Gomes, 1993; Nery, 2000).

A determinação da direção, precedida da determinação da velocidade, sem injeção adicional, embora não seja muito comum, apresentou excelentes resultados que podem ser comprovados não apenas pela nítida definição dos gráficos polares, mas também pela concordância dos resultados aqui obtidos com aqueles obtidos em trabalho realizado anteriormente (Ferreira & Gomes, 1993), utilizando a mesma técnica isotópica com o radiotraçador cromo-51, na forma de $^{51}\text{CrCl}_3$.

CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

Diante das condições experimentais em que se realizou este trabalho e diante dos resultados obtidos, conclui-se que o método aplicado na determinação da velocidade e direção do fluxo de águas subterrâneas apresentou resultados consistentes com o esperado, de acordo com as condições hidrogeológicas da área de estudo, ou seja, ausência de refluxo no aquífero com predominância de material permeável, predominantemente arenoso.

A técnica utilizada, com a sonda incluindo injetor e detector em um único dispositivo imerso na coluna de água do piezômetro, além de incluir o sistema de vedação, para evitar eventuais influências de fluxos verticais, foi uma opção apropriada mostrando facilidade de aplicação e clareza nos resultados obtidos. Recomenda-se, entretanto, que a porcentagem da área perfurada no filtro da tubulação de revestimento do poço de injeção seja maior, para se ter uma maior permeabilidade e, com isso, minimizar as influências da perfuração no resultado encontrado para a velocidade.

O radioisótopo utilizado, ^{131}I , na forma química de iodeto de sódio, mostrou grande potencial como traçador para este tipo de aplicação, especialmente na

determinação da velocidade. Por outro lado, apesar de não possuir características adsorventes, teve bom desempenho quanto à determinação do sentido do fluxo, indicando que para baixas velocidades há uma pequena adsorção do traçador nas vizinhanças do piezômetro, o suficiente para definir a direção de deslocamento.

O encapsulamento da sonda colimada de detecção, originalmente construído de aço, foi substituído por alumínio, facilitando a penetração da radiação através da janela do detector. Este fato certamente contribuiu para o sucesso do experimento.

Os gráficos polares mostram que, apesar da expectativa da influência de marés no nível d'água do aquífero, não existe o refluxo da água subterrânea na profundidade pesquisada, indicando que o igarapé Tucunduba, nas vizinhanças do local de estudo, somente recebe o fluxo do aquífero.

A metodologia empregada demonstrou grandes possibilidades de ser aplicada rotineiramente na prática, em função dos excelentes resultados alcançados e da facilidade na detecção dos dados para a determinação dos parâmetros investigados, desde que se disponha de pessoal qualificado para a operação.

AGRADECIMENTOS

Este artigo é parte da Dissertação de Mestrado do primeiro autor que agradece ao Prof. Dr. Daniel Marcos Bonotto (UNESP – Rio Claro) pelo auxílio na revisão deste manuscrito e às Universidades Federais do Pará e do Amapá por terem oferecido as condições necessárias para sua realização.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. BOROWCZYK, M.; GRABCZAC, J.; ZUBER, A. Radioisotope measurements of the ground water flow direction by the single-well method. *Nukleonika*, v. 10, n. 1, p. 19-33, 1965.
2. BOROWCZYK, M.; MAIRHOFER, A.; ZUBER, A. Single well pulse techniques. In: SYMPOSIUM ON ISOTOPES IN HYDROLOGY, 1967, Viena. **Proceedings...** Viena: International Atomic Energy Agency, 1967, p. 507-519.
3. CNEN - COMISSÃO NACIONAL DE ENERGIA NUCLEAR. **Normas Básicas de Proteção Radiológica**. Resolução nº 06, 1973.
4. DIVINE, C.E. & MCDONNELL, J.J. The future of applied tracers in hydrogeology. *Hydrogeology Journal*, v. 13, p. 255-258, 2005.
5. DROST, W. Single well techniques. In: **Tracer Methods in Isotope Hydrology**, IAEA-TECDOC-291. Vienna: International Atomic Energy Agency, p. 67-112, 1983.
6. DROST, W.; KLOTZ, D.; KOCH, A.; MOSER, H.; NEUMAIER, F.; RAUERT, W. Point dilution methods of investigating ground water flow by means of radioisotopes. *Water Resources Research*, v. 4, n. 1, p. 125-146, 1968.
7. FEHN, U.; MORAN, J.; SNYDER, G.; MURAMATSU, Y. The initial $^{129}\text{I}/\text{I}$ ratio and the presence of 'old' iodine in continental margins. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B*, v. 259, p. 496-502, 2007.
8. FERREIRA, L.S. & GOMES, J.R.S. Uso de radioisótopos para verificar a provável influência de marés do rio Guamá no fluxo de água subterrânea do campus da UFPA. In: REUNIÃO ANUAL DA SBPC, 45, 1993, Recife. **Anais...** São Paulo: SBPC/UFPE, 1993, v. 1, p. 631.
9. FERREIRA, L.S. **Determinação de velocidade e direção de fluxo de água subterrânea utilizando técnicas nucleares**. Rio de Janeiro, 1976. 190 p. Dissertação (Mestrado em Física) – COPPE, Universidade Federal do Rio de Janeiro.
10. HALEVY, E.; MOSER, H.; ZELLHOFER, O.; ZUBER, A. Borehole dilution techniques: a critical review. In: SYMPOSIUM ON ISOTOPES IN HYDROLOGY, 1967, Viena. **Proceedings...** Viena: International Atomic Energy Agency, 1967, p. 531-564.
11. HALL, S.H. Single well tracer tests in aquifer characterization. *Ground Water Monitoring and Remediation*, v. 13, n. 2, p. 118-124, 1993.
12. LAMONTAGNE, S.; DIGHTON, J.; ULLMAN, W. **Estimation of groundwater velocity in riparian zones using point dilution tests**. CSIRO Land and Water Technical Report 14/20, 16 p., 2002.
13. LEAP, D.I. & KAPLAN P.G. A single-well tracing method for estimating regional advective velocity in a confined aquifer: theory and preliminary laboratory verification. *Water Resources Research*, v. 24, n. 7, p. 993-998, 1988.
14. MAIRHOFER, J. Groundwater flow and direction measurement by means of radioisotopes in a single well. In: **Isotope Techniques in the Hydrologic Cycle**. Geophysical Monograph Series, Washington, DC: American Geophysical Union, v. 11, p 119-129, 1967.
15. NERY, J.R.C. **Aplicação de traçadores radioativos na determinação da velocidade e direção do fluxo de águas subterrâneas**. Belém, 2000. 120 p. Dissertação (Mestrado em Física) – Departamento de Física, Universidade Federal do Pará.
16. PLATA, A. **Isótopos em hidrologia**. Madrid: Editorial Alhambra, 328 p., 1972.
17. PLATA, A. Single well techniques using radioactive tracers. In: **Tracer Methods in Isotope Hydrology**, IAEA-TECDOC-291. Vienna: International Atomic Energy Agency, p. 17-46, 1983.
18. RIEMANN, K.; VAN TONDER, G.; DZANGA, P. Interpretation of single-well tracer tests using fractional-flow dimensions. Part 2: A case study. *Hydrogeology Journal*, v. 10, p. 357-367, 2002.
19. SANCHEZ, W. **Técnicas radioisotópicas aplicadas ao estudo de águas subterrâneas**. São Paulo: Instituto de Energia Atômica, Informação IEA, n. 46, 40 p., 1975.
20. SCANLON, B.R.; HEALY, R.W.; COOK, P.G. Choosing appropriate techniques for quantifying groundwater recharge. *Hydrogeology Journal*, v. 10, p. 18-39, 2002.
21. TAZIOLI, A. & TAZIOLI, G.S. Environmental isotopes and artificial tracer techniques for investigation and monitoring of heterogeneous aquifers. In: GETA, J.A.L.; OLMEDO, J.G.; RODRIGUEZ, A.B.; HERNANDÈZ, L.R. (Eds), **Investigation management and remediation of contaminated aquifers**. Madrid: USGS, p. 142-158, 2001.

*Manuscrito Recebido em: 4 de outubro de 2007
Revisado e Aceito em: 9 de julho de 2008*