



USO COMBINADO DE TRAÇADORES IDEAIS E REATIVOS PARA VERIFICAÇÃO DO DESEMPENHO DE POÇOS MULTINÍVEIS

COMBINED USE OF REACTIVE AND IDEAL TRACERS TO ASSESS THE PERFORMANCE OF MULTILEVEL WELLS

Marcelo da Fonseca Oliveira¹; Margarita Nuche Galvez¹;
Thomás Gerdulo Bodelão²; Juliana Gardenalli de Freitas¹; Everton de Oliveira²

Artigo recebido em: 30/07/2015 e aceito para publicação em: 25/05/2016.

DOI: <http://dx.doi.org/10.14295/ras.v30i1.28492>

Resumo: A caracterização de plumas de contaminação é uma etapa crucial para o gerenciamento de áreas contaminadas, mas, por serem heterogêneas, há a necessidade de investigação de alta resolução. Nesse trabalho buscou-se desenvolver um poço multinível pré-montado e selecionar traçadores para verificação do isolamento hidráulico entre os níveis. Testes de coluna foram feitos para avaliar o comportamento dos traçadores e protótipos foram montados e testados em laboratório. Um poço multinível foi instalado numa área experimental, e seu desempenho avaliado por teste com os traçadores. A fluoresceína foi selecionada como traçador reativo e o brometo como traçador ideal. As melhores configurações para o selo do poço multinível foram papel pardo com bentonita em pellets quebrada e granulada, e tela plástica com bentonita em pellets quebrada. No teste em campo, o protótipo instalado funcionou satisfatoriamente e verificou-se que o uso de traçadores ideal e reativo permite avaliar a instalação do poço e também a conectividade entre os níveis.

Palavras chaves: Traçadores. Poços multiníveis. Investigação de áreas contaminadas.

Abstract: Characterization of contamination plumes is a crucial step for contaminated sites management but, due to its heterogeneity, high resolution characterization is needed. This work aimed to develop a prepacked multilevel well and select tracers to verify its performance. Column tests were conducted to assess tracers behaviour and prototypes were built and tested in the laboratory. One multilevel well was installed in a field site, and its performance tested with tracers. Fluorescein was selected as a reactive tracer and bromide as an ideal tracer. The better configurations for the multilevel seal were with kraft paper with bentonite in broken pellets and granulated, and a plastic screen with bentonite in broken pellets. In the field test, the prototype worked satisfactorily, and the combined use of reactive and ideal tracers allowed verifying the well installation and the connectivity between sampling levels.

Keywords: Tracer. Multilevel wells. Site assessment.

1 INTRODUÇÃO

A água subterrânea é um recurso de grande importância para o abastecimento público, mas a sua qualidade está em constante ameaça devido à contaminações do ambiente por decorrência das atividades humanas. Substâncias lançadas no ambiente podem infiltrar pelo solo e atingir o nível d'água. Na zona saturada, formam-se plumas de contaminação que podem se estender por centenas de metros. Quando ocorre a contaminação, é de

fundamental importância a caracterização da distribuição desses contaminantes no meio subterrâneo, pois ela subsidia as avaliações de risco toxicológico e a aplicação de técnicas de remediação. No entanto, as plumas de contaminação costumam ser heterogêneas, apresentando grandes variações de concentração em pequenas distâncias. Amostras coletadas em poços de monitoramento com filtros longos (superiores a 3 m) geram resultados que são uma composição do intervalo amostrado, dependente da variação da permeabilidade com

¹ UNIFESP - Diadema. (marcelo.dafonsecaoliveira@yahoo.com.br, marga515@hotmail.com, jgfreitas@unifesp.br)

² UNESP - Rio Claro (everton@hidroplan.com.br, thomasbodelao10@hotmail.com)

a profundidade, estando sujeitos a interferências como fluxo vertical no poço, por exemplo (HUTCHINS AND ACREE, 2000; METCALF E ROBBINS, 2007; McMILLAN et al., 2014). Portanto, para a caracterização adequada da pluma de contaminação, é necessário obter amostras com pequenas distâncias verticais entre elas, da ordem de dezenas de centímetros.

Para coletar amostras em diferentes profundidades é comum o uso de poços multiníveis. Esses poços podem ser instalados de diversas formas, como cada nível em um poço instalado em um furo de sondagem separado, ou instalados no mesmo furo. Outro tipo é o *Continuous Multichannel Tubing*TM (CMT), onde até sete zonas discretas de amostragem são possíveis em um único tubo (EINARSON E CHERRY, 2002).

No entanto, o uso desses poços ainda é limitado devido a dificuldades de instalação e custo, principalmente quando se busca uma alta resolução com muitos níveis de amostragem com espaçamento vertical da ordem de centímetros. Em todos os casos onde mais de um ponto de amostragem é instalado em um mesmo furo de sondagem, é fundamental que se tenha um isolamento hidráulico entre os níveis de amostragem, evitando-se a formação de caminhos preferenciais que comprometam a representatividade das amostras. Nos locais onde o material é colapsável, como areia não consolidada, a instalação torna-se bastante simplificada, pois o colapso do material ao redor do poço é suficiente para preencher o espaço recriando a permeabilidade natural (EINARSON e CHERRY, 2002). Em materiais não colapsáveis, ricos em argilas ou em rochas, é necessário preencher o espaço e criar selos que criem isolamento entre os níveis de amostragem. Convencionalmente, é feita a adição de bentonita e areia de forma intercalada, formando o selo e o pré-filtro, respectivamente. No entanto, essa técnica exige bastante precisão, sendo difícil o controle exato da espessura das camadas, além de apresentar diversas dificuldades para a execução, como a presença de espaços vazios, contaminação cruzada e outros (BOYLE, 1992). Assim, essa

técnica é praticamente inviável quando se requer uma pequena distância entre os níveis de amostragem, da ordem de decímetros, por exemplo. Outra opção para a criação dos selos e pré-filtros é a montagem dos selos previamente à instalação dos poços. Bentonita e areia são fixados ao revestimento ou filtro por meio de telas, que permitem o contato com a água e expansão da bentonita (EINARSON E CHERRY, 2002).

Considerando-se todas as dificuldades para a instalação adequada de um poço multinível, é importante ter ferramentas que permitam avaliar a qualidade dos selos e a sua integridade após um intervalo de tempo. Uma opção para isso é o uso de traçadores, que podem ser compostos químicos ou energia. Traçadores são usados há décadas para a determinação da direção e velocidade de fluxo e de parâmetros hidrogeológicos (DAVIS et al., 1980; HALL, 1993). Mais recentemente, testes com traçadores passaram a ser aplicado com outras finalidades, como quantificar a presença de NAPL (*non-aqueous phase liquids*), avaliar o potencial de biodegradação, a demanda natural de oxidante e a sorção de contaminantes orgânicos, entre outras aplicações (PTAK et al., 2004; GODEKE et al., 2006).

Assim, nesse trabalho buscou-se desenvolver um método para montagem de poços multiníveis de alta resolução com selo pré-montado, com espaçamento de 10 cm entre os níveis de amostragem, adequado para ser instalado em solo tropical. Optou-se por trabalhar com um Latossolo Vermelho, já que os Latossolos são os solos mais representativos no Brasil, ocupando aproximadamente 50% do território e distribuídos por praticamente todo o território nacional (OLIVEIRA, 2005). São solos num estágio de intemperização avançado, bem desenvolvidos e profundos. Possuem horizonte diagnóstico B latossólico (Bw), sendo este um horizonte subsuperficial composto por diversos teores de óxidos de alumínio e ferro, minerais de argila 1:1 e minerais mais resistentes ao intemperismo, como o quartzo (EMBRAPA, 2006). Para avaliação da performance do poço multinível, foi desenvolvido teste de traçador com uso simultâneo

de dois traçadores, um conservativo e um reativo, com o objetivo de detectar os caminhos por onde acontece o transporte, através do solo ou de falhas no selo.

2 MÉTODOS

2.1 Avaliação dos traçadores em laboratório

Buscando avaliar o transporte dos traçadores no Latossolo Vermelho, foram realizados testes de coluna de solo deformado em condições saturadas. Na montagem de colunas de solo compactado, busca-se reproduzir uma coluna de solo homogêneo, sem macroporos e heterogeneidades, cuja densidade aparente e dispersividade sejam similares às observadas no campo, evitando camadas de estratificação ou caminhos de fluxo preferenciais (LEWIS e SJÖSTROM, 2010). A compactação do solo na coluna foi feita adicionando-se pequenas quantidades de solo úmido na coluna e, em seguida, compactando o solo mecanicamente com um cilindro de madeira. Depois da compactação e antes da adição da camada seguinte, a superfície do solo foi escarificada para garantir a conectividade hidráulica entre as camadas de solo.

A saturação da coluna é um procedimento crítico na obtenção de resultados. Pequenas bolhas de ar presas nos poros do solo,

devido a uma saturação incompleta, podem modificar o fluxo da água e alterar a condutividade hidráulica (LEWIS E SJÖSTROM, 2010). Para assegurar a completa saturação da coluna, foi circulado dióxido de carbono para substituição do ar, por sua maior solubilidade em água, que facilita a eliminação de eventuais bolhas. Após a injeção de dióxido de carbono, a coluna foi saturada com fluxo vertical ascendente de água previamente desaerada, preparada por ação de uma bomba de vácuo (Prismatec 131) ligada a um tanque desaerador (Humboldt HM-4187A).

Na entrada e na saída da coluna foi colocada uma camada defletora de espessura de 2 cm formadas por esferas de vidro de diâmetro de 2 mm, para evitar padrões de fluxo não ideais (BARRY, 2009). Além disso, para evitar a perda de material fino, foram colocadas: (1) duas camadas de tela de Nylon®, com diâmetro de poro de 0,5-1 mm, nos extremos da coluna; e (2) uma fina camada de areia, com um diâmetro de 2 mm e espessura de 1 cm, entre as esferas de vidro e o solo (Figura 1). As esferas de vidro e areia foram lavadas com HCl (0,05M) e NaOH (0,1M) repetidas vezes e secas na estufa a 105°C por 24h, de acordo com o método proposto por Corá *et al.* (2009) para a remoção das impurezas.

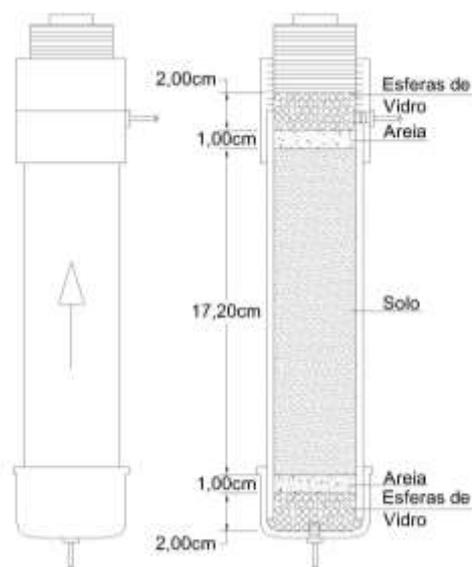


Figura 1 – Esquema de preenchimento da coluna
Figure 1 – Column setup

As dimensões da coluna de solo têm uma influência significativa sobre o comportamento do fluxo na coluna de solo saturado (BROMLY *et al.*, 2007). Assim, para evitar a circulação horizontal e promover o fluxo vertical na coluna foram utilizadas colunas cilíndricas de PVC em proporção de 1:4 entre o diâmetro e o comprimento, com valores de 4,3 e 17,2 cm, respectivamente.

O primeiro traçador avaliado foi a fluoresceína (C₂₀H₁₂O₅), substância orgânica fluorescente hidrossolúvel. No teste de fluoresceína foi injetada com uma vazão média de 0,27 mL s⁻¹ uma solução de 100 mg L⁻¹ durante aproximadamente 40 min (correspondente a 1,5 volumes de poro), seguido por água destilada para remover o traçador do meio. Amostras foram coletadas na saída da coluna. Para a quantificação da concentração de fluoresceína as amostras foram analisadas em fluorímetro (Thermo Scientific Quantech Digital Filter Fluorometer) a 490 nm (Thermo Scientific QNT BASE) utilizando filtro primário para a seleção do comprimento de onda de excitação e secundário para a seleção do espectro de emissão, NB490 e SC515, respectivamente. Para tanto foi inserida uma curva de calibração no aparelho com 5 pontos entre 1 a 100 mg L⁻¹, lidas em triplicatas.

O segundo traçador avaliado foi o íon brometo (Br⁻), na forma salina de brometo de potássio (KBr). O íon brometo é considerado química, biológica e fotoliticamente estável e, devido à sua carga negativa, funciona como um traçador conservativo ideal ou quase ideal (LEIBUNDGUT *et al.*, 2009). Os testes com o traçador foram realizados injetando uma solução de brometo de potássio (KBr) com uma concentração de 25 mg L⁻¹. Em um teste a solução foi preparada com água destilada e no segundo teste com água subterrânea, coletada próximo ao local de coleta do solo. A vazão utilizada foi 0,1 mL s⁻¹ e foi feita medição automática de brometo em intervalos de 2 minutos. Para a leitura de brometo, foi utilizado um medidor seletivo de íons (Thermo Scientific Orion Star A324 pH/ISE Meter) com um eletrodo de brometo (Thermo Scientific Bromide Ion Selective Electrode). Foi construída uma

curva de calibração para o brometo baseada em oito padrões e, com a regressão linear dos pontos, foi calculada a concentração de brometo. Para cada amostra foram feitas três leituras em millivolts e calculada a média.

A curva de chegada dos traçadores (concentração *versus* tempo) foi ajustada à solução simplificada de Ogata-Banks (1961) para um fluxo unidimensional com advecção e dispersão (WILLIAMS, 2007), apresentada a seguir:

$$C(\Delta L, t) = \left(\frac{C_0}{2}\right) \operatorname{erfc} \left[\frac{(\Delta L - vt)}{2 \cdot (D \cdot t)^{1/2}} \right] \quad (1)$$

Onde C : concentração do traçador; C_0 : concentração inicial; ΔL : comprimento da coluna; v : velocidade do traçador; t : tempo; D : coeficiente de dispersão.

2.2 Montagem dos protótipos

Os protótipos dos poços multiníveis foram construídos com dez pontos de amostragem, com espaçamento vertical de 10 cm entre as extremidades das mangueiras, com o objetivo de proporcionar a caracterização detalhada de plumas de contaminação. Um tubo de PVC de diâmetro de 1" (2,54 cm) e comprimento de 1 m foi utilizado como tubo suporte. Por dentro do tubo de PVC, foram inseridas 10 mangueiras de Teflon® (PTFE) de 4 × 2 mm, cada uma atingindo uma profundidade diferente. As mangueiras atravessavam o tubo suporte por furos de 5 mm feitos no tubo de PVC a cada 10 cm, e a saída de cada mangueira foi coberta por uma tela de nylon para evitar a entrada de material mais fino (Figura 2).

Na parte exterior do tubo de PVC foram montadas seções intercaladas de filtros e selos. Os filtros foram instalados por cima da saída das mangueiras de Teflon®, e construídos com material de alta permeabilidade, com o objetivo de permitir a entrada de água, mas evitar a passagem de material fino. Para isso, utilizou-se areia comercialmente disponível como areia para pré-filtro.

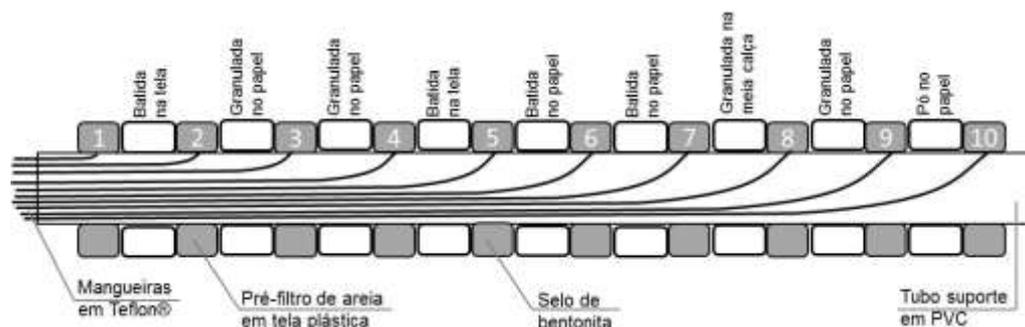


Figura 2 - Esquema de montagem do primeiro protótipo (sem escala)
Figure 2 – First prototype setup (not to scale)

Os selos foram montados com material impermeável, buscando isolar os diferentes níveis de amostragem.

Os materiais utilizados para a preparação do selo do poço multinível foram bentonitas de 3 distribuições granulométricas diferentes (Figura 3). As bentonitas em pó e granulada foram utilizadas na granulometria obtida comercialmente. A terceira granulometria utilizada foi preparada a partir da redução da gra-

nulometria da bentonita em pellets, que foi batida em cima de uma madeira, com um martelo de plástico, duas a três vezes em cada grão (denominada “bentonita em pellets batida” ou “quebrada”). Isso foi realizado para reduzir o tamanho das partículas para um tamanho mais adequado para a construção do poço multinível. Para a caracterização da granulometria dos materiais foram usadas peneiras de 1 mm a 0,053 mm.



Figura 3 – Frações de bentonita utilizadas como selo
Figure 3 – Bentonite fractions used as multilevel wells seals

Para a fixação dos selos de bentonita foram testados diferentes materiais. Foram utilizados papel pardo (com as três granulometrias de bentonita), tela plástica com espaçamento de aproximadamente 0,2 mm (somente com a bentonita em pellets batida, que não passava pelo espaçamento da tela) e meia calça de fio fino nº 40 (bentonita granulada e em pellets batida). Os selos foram fixados no tubo de PVC utilizando braçadeiras de Nylon® com tamanho de 4,5 × 200 mm. A areia utilizada no pré-filtro (Trionic; 0,6 a

1,5 mm) foi lavada com água, ácido sulfúrico e hidróxido de sódio para remoção de impurezas, e foi posteriormente seca em uma estufa a 100°C por 24 horas. O pré-filtro foi fixado ao tubo de PVC, com uma tela plástica e braçadeiras de Nylon®. Para cada pré-filtro e selo, foram utilizados aproximadamente 26,8 g de produto, seja bentonita ou areia. O diâmetro final do poço pré-montado foi de aproximadamente 4,5 cm.

Foram construídos cinco protótipos para teste em laboratório. A construção do pri-

meiro protótipo (Figura 2) foi feita mantendo este deitado, colocando a bentonita sobre o papel, tela ou meia-calça, e enrolando-o sobre o tubo e fixando com braçadeiras. A geometria dos selos foi alterada do segundo ao quinto protótipo. Os selos de bentonita granulada na meia-calça foram substituídos por bentonita granulada no papel, e não foi mais utilizada

bentonita em pó. A técnica de montagem também foi alterada a partir do segundo protótipo; o tubo de PVC passou a ser mantido na vertical, a tela ou o papel foram enrolados em volta do poço, a parte de baixo fixada com braçadeira e então foi colocada a bentonita. A Figura 4 ilustra o processo de montagem dos protótipos.

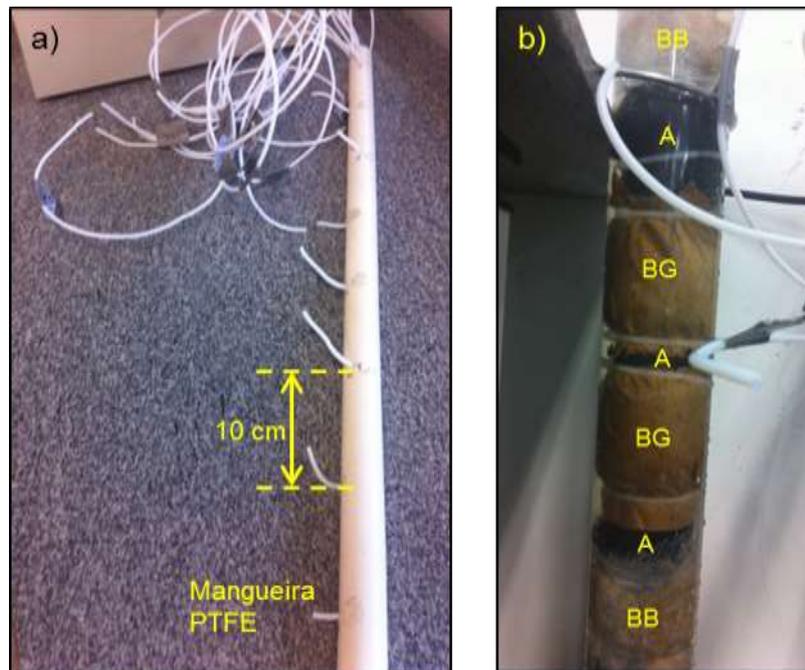


Figura 4 - Montagem de um dos protótipos; a) estágio inicial de montagem, com as mangueiras de Teflon por dentro do tubo suporte; b) protótipo montado dentro de tubo de acrílico. A: areia, BG: bentonita granulada, BB: bentonita batida

Figure 4 – Prototype construction; a) Initial stage, showing Teflon® tubing within the support pipe; b) prototype inserted within Plexiglass pipe

2.3 Avaliação dos materiais em laboratório

Com o objetivo de avaliar os protótipos construídos no laboratório, foram realizados testes para simular o comportamento dos materiais usados como selo ao serem inseridos num furo de sondagem em material não-collapsável abaixo do nível d'água. Para isso, foi utilizado um tubo de acrílico de 1 m de comprimento e 6 cm de diâmetro interno, com uma tampa na parte inferior para simular o furo da sondagem. Cada protótipo construído foi colocado no tubo de acrílico saturado com água. Foram feitas observações visuais da expansão da bentonita ao longo do tempo, e foi observado se havia falhas aparentes no selo. Os protótipos foram observados por períodos de até

dois meses.

Além da observação visual foram realizados testes com um traçador para verificar se os selos estavam isolando os níveis. Como traçador foi utilizada solução de 76 mg L⁻¹ de fluoresceína, que apresenta coloração amarelo-esverdeada. A fluoresceína foi injetada em um dos pontos de amostragem, e os pontos diretamente acima e abaixo eram amostrados com uma seringa plástica. O transporte da fluoresceína entre os níveis de amostragem era verificado visualmente no tubo de acrílico e também analisada a coloração das amostras coletadas. Esse método permitiu identificar os selos que apresentavam falhas e os selos que estavam intactos atuando como uma barreira para o transporte entre os níveis.

2.4 Verificação de poços multiníveis em campo

2.4.1 Caracterização da área

Os trabalhos de campo foram realizados na Floresta Estadual Edmundo Navarro de Andrade (Horto Florestal), ao leste da área central de Rio Claro. A área de estudo está inserida no contexto geológico da Bacia Sedimentar do Paraná, e afloram na área de estudo diabásios intrusivos, de idade mesozoica (REIS et al., 2005, BODELÃO et al., 2016).

A descrição pedológica e a classificação do solo foram realizadas em campo, a partir de observações feitas em uma trincheira com profundidade de 2,60 m, seguindo o “Manual de descrição e coleta de solo no campo” (SANTOS et al., 2005). Foram coletadas amostras deformadas e indeformadas para a caracterização das propriedades físicas do solo. As amostras indeformadas, representativas da estrutura original do solo, foram obtidas de dois poços escavados. Foram retiradas quatro amostras indeformadas e, após a retirada dos blocos, elas foram cobertas com pa-

rafina para não perderem umidade para o meio. Amostras deformadas foram coletadas de *liners* obtidos em 10 sondagens (S1 a S10), sendo as sondagens S5 e S3 localizadas mais próximas ao local de execução do teste. As amostras deformadas foram levadas ao laboratório, secas ao ar por 24 horas e esboroadas (terra fina seca ao ar - TFSA). As amostras deformadas e indeformadas foram usadas para determinações de massa específica, densidade aparente, porosidade, granulometria e condutividade hidráulica (BODELÃO et al., 2016).

O solo da área de estudo foi classificado como um Latossolo Vermelho, consistente com o mapeamento pedológico apresentado no plano de manejo da floresta (REIS et al., 2005). Foram caracterizados cinco horizontes na área de estudo, A, AB, BA, Bw1 e Bw2 (BODELÃO et al., 2016). O perfil apresentou textura argilosa a muito argilosa, consistência muito plástica e pegajosa a partir do horizonte BA. Nesse horizonte, o solo começou apresentar estrutura microgranular, que se tornou mais forte e aparente nos horizontes Bw1 e Bw2.

Tabela 1 - Resultados das análises granulométricas em amostras coletadas na área experimental
Table 1 – Particle size from samples collected at the field site

	Profundidade (m)	argila	silte	areia fina	areia média	areia grossa	pedregulho
S1	5.7 - 6.0	17,6%	16,6%	47,8%	14,5%	2,4%	1,1%
S2	2,8	22,7%	35,8%	29,1%	10,6%	1,7%	0,0%
	3.4 - 3.6	26,2%	12,0%	45,7%	14,7%	1,3%	0,1%
S3	3.8 - 3.95	5,4%	6,4%	33,1%	51,5%	3,3%	30%
	3.95 - 4.1	4,8%	5,3%	34,8%	51,5%	3,3%	0,3%
S5	1.5 - 2.0	37,9%	21,6%	25,1%	8,7%	5,0%	1,6%
	2.2 - 2.4	33,0%	27,9%	18,8%	7,7%	3,3%	9,3%
	0 - 1.2	40%	30%	19%	9%	3%	0%
S7	2.4 - 2.5	60%	23%	14%	3%	1%	0%
	3.5 - 3.6	18%	15%	12%	5%	7%	44%
S10	2,4	33%	28%	19%	8%	3%	9%

Os resultados de granulometria da área indicam que a maioria das amostras apresenta alta porcentagem de argila, chegando a 60% (Tabela 1). As sondagens S5 e S3, mais próximas aos locais de instalação do protótipo, apresentaram grande quantidade de argila nas camadas mais rasas. Apenas duas amostras, da

sondagem S3 em profundidades superiores a 3,8 m tiveram quantidade de argila inferior a 15%, contendo maior quantidade de areia média e pedregulho. Isso indica que existe uma heterogeneidade nas propriedades do solo nessa região, possivelmente relacionada à proximidade de um lago ou retrabalhamento da

área para sua ocupação.

A porosidade das amostras se encontra na faixa de 60%, bastante elevada e típica de solos argilosos. A condutividade hidráulica medida nos testes de esgotamento nos poços resultou em valores entre $8,0 \times 10^{-5} \text{ cm s}^{-1}$ e $2,2 \times 10^{-5} \text{ cm s}^{-1}$. Os valores obtidos através do permeâmetro de Guelph forneceram valores na mesma ordem de grandeza, entre $4,5 \times 10^{-5}$ e $6,7 \times 10^{-4} \text{ cm s}^{-1}$. Esses valores são relativamente altos considerando a quantidade de argila presente no solo conforme determinado nas análises granulométricas. Isso se deve provavelmente à estruturação do solo em microagregados conforme verificado na descrição pedológica, que faz com que a argila se agregue em partículas com tamanho similar ao de grãos de areia (AZEVEDO e BONUMÁ, 2004). A área de pesquisa foi descrita com maiores detalhes previamente em BODELÃO

et al. (2016).

2.4.2 Instalação e verificação dos poços

O poço multinível testado no campo foi construído com cinco níveis de amostragem, espaçados 10 cm. Foram usados como selos as configurações que apresentaram melhor desempenho nos testes em laboratório, a bentonita granulada em papel pardo e a bentonita em pellets batida na tela plástica (Figura 5). Para a instalação do poço foi feito um furo de sondagem com um trado manual com diâmetro de 6 cm até uma profundidade de 1,37 m. Após a perfuração do solo, o protótipo foi colocado no furo e foi esperado um período de 2 horas antes do início dos testes, para garantir que ocorresse a expansão da bentonita. A profundidade do nível d'água no dia da instalação era de 0,86 m.

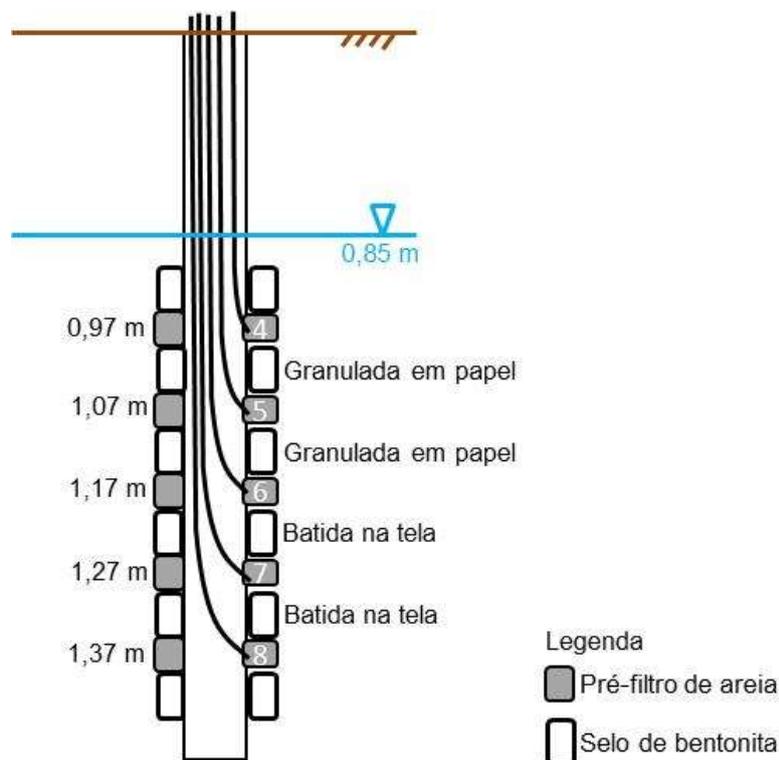


Figura 5 - Croqui do poço multinível instalado em campo (sem escala). Valores indicam a profundidade em metros

Figure 5 – Multilevel well installed in the field (not to scale). Values indicate depth below ground surface

Para verificação do funcionamento do poço foi realizado teste de traçador utilizando solução de brometo e fluoresceína (Synth), em concentrações de 200 mg L^{-1} e 76 mg L^{-1} , res-

pectivamente. Foi feita a injeção de 50 mL da solução em um dos níveis, utilizando uma seringa de plástico de 60 mL, com uma vazão de aproximadamente $4,2 \text{ mL s}^{-1}$. Após a injeção,

os demais níveis foram amostrados periodicamente. No local onde o poço está instalado, o gradiente hidráulico natural é da ordem de 0,002, e não possui uma componente vertical significativa. O transporte dos traçadores entre os níveis de amostragem é causado então por um gradiente forçado imposto durante a injeção e amostragem. No primeiro teste (08/10/2013) o traçador foi injetado no Nível 7, e foram amostrados os Níveis 6 e 8. Em seguida, foi feita a injeção no Nível 5 e amostrados os Níveis 4 e 6. As amostras foram armazenadas em frascos de vidro de 40 mL, mantidas sobre refrigeração a 4°C e protegidas da exposição à luz solar em caixas térmicas e levadas ao laboratório para análise, que foi realizada no prazo máximo de um dia. No segundo teste (19/03/2014), foi feita injeção no Nível 5, com amostragem no 4 e 6, e após uma hora foi feita injeção no 7, com amostragem

no 6 e 8. Foi seguido o mesmo procedimento de amostragem e análise das amostras do Teste 1.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 Comportamento dos traçadores em Latossolo Vermelho

Nos testes de coluna para estudo dos traçadores, verificou-se que a fluoresceína ficou completamente retida no solo, com todas as amostras na saída da coluna apresentando concentração inferior ao limite de detecção do método. A retenção da fluoresceína também foi perceptível visualmente, sendo que a concentração na entrada da coluna apresentava coloração esverdeada, que não foi visível na solução na saída da coluna.

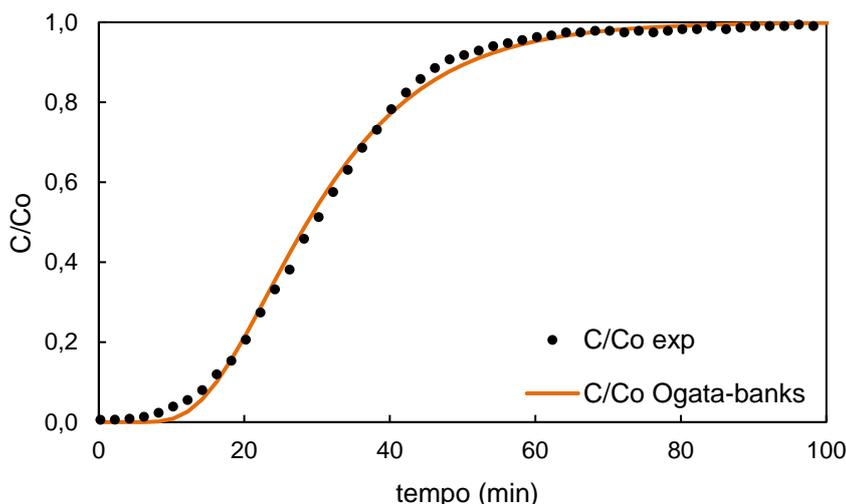


Figura 6 - Resultados de teste de coluna com brometo (C/C_0 experimental) e resultados da solução analítica (C/C_0 Ogata-Banks)

Figure 6 – Bromide breakthrough curve in the column test (C/C_0 experimental) and analytical solution (C/C_0 Ogata-Banks)

Essa retenção provavelmente aconteceu pois a fluoresceína possui carga negativa, e os Latossolos Vermelhos possuem alta quantidade de óxidos de ferro e caulinita, que possuem carga variável, e estavam carregados positivamente na faixa de pH trabalhada (~6,5) (KER, 1998). Por exemplo, a hematita apresenta ponto de carga zero de 9,5 e a goethita de 7,8 a 8,9 (MEURER, 2010). Isso deve ter resultado em retenção da fluoresceína

por atração eletrostática (KASNAVIA et al., 1999).

Apesar de potencialmente também apresentar retardamento em Latossolos, que têm presença significativa de caulinita e óxidos de ferro (GOLDBERG e KABENGI, 2010), o brometo apresentou comportamento muito próximo do esperado baseado na solução analítica (Figura 6), confirmando que poderia ser utilizado com um traçador ideal nas

condições do estudo. O retardamento não significativo pode estar relacionado ao pH próximo ao neutro nas condições do estudo.

3.2 Teste com protótipos no laboratório

A granulometria dos materiais usados como selo e material de pré-filtro estão indicadas na Tabela 2. Observa-se que a areia utilizada como pré-filtro tinha granulometria predominantemente muito grossa. Quanto ao material utilizado como selo, a bentonita em pellets quebrada tinha granulometria muito grossa, a bentonita granulada de grossa a média, e a bentonita em pó predominantemente fina.

A observação do comportamento dos protótipos no tubo de acrílico permitiu verificar que a granulometria da bentonita tem um papel importante no desempenho do selo. No primeiro protótipo avaliado foi evidente que a bentonita em pó não teria bom desempenho, por não apresentar expansão significativa pela baixa absorção de água. Os testes com os protótipos seguintes confirmaram que as bentonitas com granulometria mais grossa apresentam maior capacidade de atuar como selo. A bentonita granulada e a em pellets quebrada tiveram expansão considerada adequada, já que foram capazes de preencher todo o espaço vazio entre os protótipos e a parede do tubo de acrílico. O tempo necessário para que a bentonita granulada e em pellets quebrada atingissem conformação próxima à final foi de aproximadamente duas horas.

Tabela 2 - Granulometria dos materiais usados para construção dos poços multiníveis determinada por peneiramento. A classificação é relativa ao tamanho de areia

Table 2 – Multilevel wells materials grain size distribution, determined by sieving, relative to the sand particle size

Material	muito grossa 1 a 2mm	grossa 0,5-1 mm	média 0,25-0,5 mm	fina 0,15-0,25mm	muito fina < 0,15 mm
Bentonita em pellets quebrada	89,54%	5,74%	2,23%	0,78%	0,81%
Bentonita granulada	9,48%	41,69%	44,23%	3,73%	0,53%
Bentonita em pó	0%	0%	0%	88,55%	10,03%
Areia	90,08%	9,82%	0,07%	0,01%	0,02%

No entanto, mesmo utilizando esses materiais alguns selos não tiveram comportamento adequado, e alguns caminhos preferenciais de fluxo foram formados através do selo. Isso ocorreu pois em alguns pontos a distribuição da bentonita não foi uniforme, possivelmente pela adição insuficiente de material ou distribuição inadequada antes da colocação do protótipo no tubo.

Em relação ao material suporte, o papel funcionou adequadamente com a bentonita em pellets quebrada e granulada, permitindo a expansão do material. A tela plástica funcionou adequadamente somente com a bentonita em pellets quebrada, sendo que a bentonita se expandiu além dos orifícios da tela com uma boa distribuição ao redor do tubo suporte. Não foi observada expansão da bentonita quando

foi utilizada a meia calça como material suporte.

3.3 Teste de traçadores e desempenho do poço no campo

Para a avaliação do desempenho no campo, o brometo foi utilizado como traçador ideal e a fluoresceína como traçador reativo. A comparação entre o comportamento dos dois foi utilizada como indicação se a solução migrou pelo solo ou diretamente por falhas no selo. Na ocorrência de falhas no selo, os dois traçadores apresentariam curva de chegada semelhante, mas se o isolamento ocorre de forma adequada, o fluxo necessariamente ocorre pelo solo com consequente retenção da fluoresceína por adsorção, e portanto o bro-

meto é detectado de forma relativamente mais intensa. O uso de dois traçadores se mostrou bastante eficaz para avaliar a conexão entre níveis no campo.

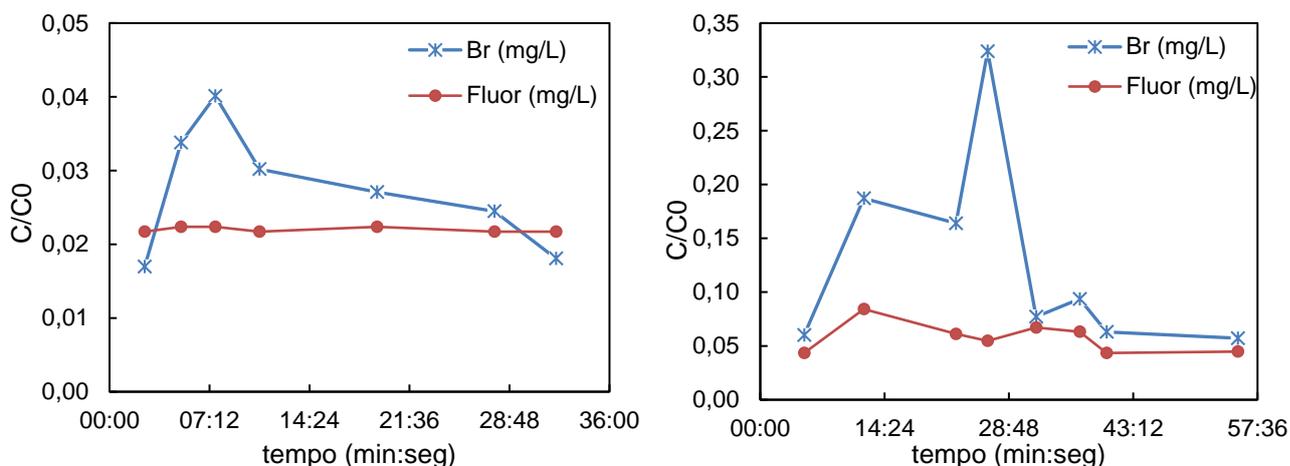
O resultado das curvas medidas em dois pontos de amostragem (nível 4, a 0,97 m de profundidade e nível 6, a 1,17 m de profundidade) estão apresentados na

Figura 7. Pode-se observar que nesses dois pontos a curva do brometo atingiu valores significativamente mais altos que a fluoresceína e apresentou claramente um pico de concentrações, como seria esperado após a injeção do traçador. Já a fluoresceína não apresentou sinais de aumento das concentrações e os valores medidos estiveram próximos ao limite de quantificação do equipamento. A não-deteção de fluoresceína em concentrações significativas é um indício que a solução com os traçadores migrou pelo solo, o que resultou na retenção da fluoresceína por adsorção, enquanto o brometo migrou seguindo o fluxo da

água. Logo, pode-se concluir que o selo entre os níveis 4 e 5; e entre os níveis 6 e 7 tiveram bom desempenho.

Caso houvesse a detecção de fluoresceína com comportamento similar ao brometo, seria um indício que o fluxo ocorreu por falhas no selo, e não pelo solo (que resultaria em retenção da fluoresceína).

Baseado nesse teste realizado com os traçadores foi verificado que os selos construídos com bentonita granulada em papel e bentonita em pellets quebrada em tela plástica podem funcionar adequadamente para a construção de poços multiníveis. No entanto, é importante que ocorra a verificação no campo da adequação dos selos por meio de testes com traçadores, pois pode haver falhas durante a construção do poço que resultem em caminhos preferenciais entre os níveis.



a) Curva de chegada no Nível 4, após injeção no 5 b) Curva de chegada no Nível 6, após injeção no 7

Figura 7 - Curvas de chegada para brometo (Br) e fluoresceína (fluor) obtidas no teste de campo
Figure 7 – Bromide (Br) and fluorescein (fluor) breakthrough curves obtained in the field test

O teste no campo com os traçadores também se mostrou útil para verificação da conectividade hidráulica entre os níveis. Foi observada uma boa conectividade entre os Níveis 6 e 7, mas os Níveis 5 e 6 não apresentaram conexão geológica, como fica evidente pela falta de resposta de brometo no Nível 6 após injeção no Nível 5 (Figura 8). A não-deteção de fluoresceína entre os níveis 5 e 6 indica também um bom funcionamento do selo.

Além disso, é uma evidência que existem heterogeneidades que limitam o fluxo vertical de um nível para o outro, apesar da distância de apenas 10 cm entre eles. A falta de conexão entre esses dois pontos é consistente com a observação de campo da presença de uma camada centimétrica cinza de hidromorfismo nessa profundidade, bastante argilosa e sem estruturação, que resulta em valores de condutividade hidráulica reduzidos.

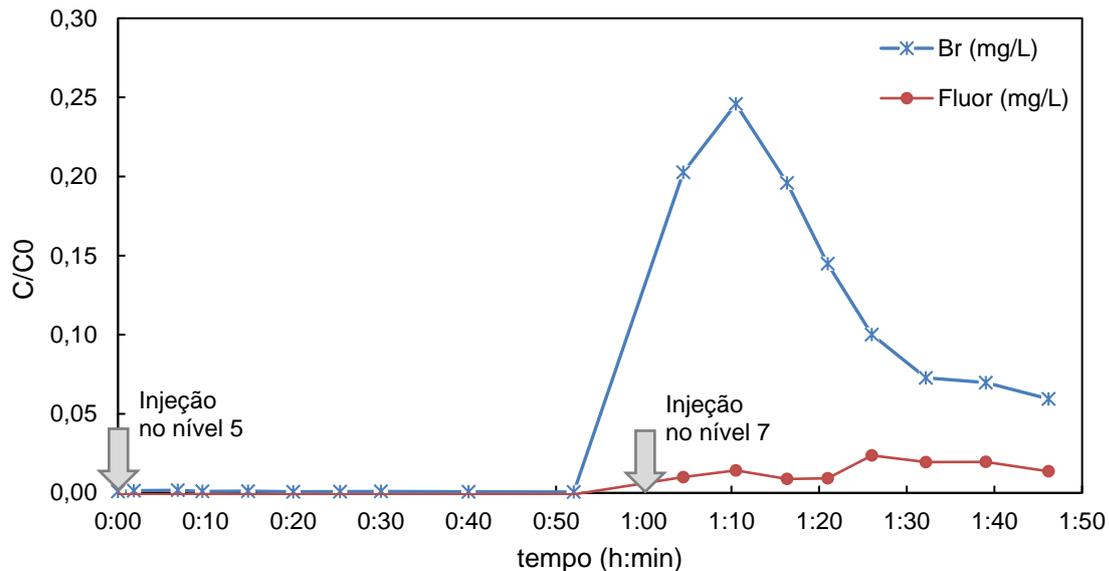


Figura 8 - Curvas de chegada para brometo (“Br”) e fluoresceína (“fluor”) obtidas no teste no campo no Nível 6
Figure 8 - Bromide (Br) and fluorescein (fluor) breakthrough curves obtained in the field test at Level 6

4 CONCLUSÃO

A avaliação em laboratório de materiais para construção de poço multinível pré-montado com resolução de 10 cm na direção vertical indicou que um dos principais parâmetros que controla o desempenho do selo é a granulometria do material utilizado. A granulometria interfere na capacidade de expansão e na uniformidade da distribuição do material ao redor do tubo suporte. A bentonita granulada e em *pellets* quebrada tiveram desempenho adequado, no entanto, a bentonita em pó não demonstrou capacidade de expansão e, conseqüentemente, de isolamento. Como material suporte da bentonita, foi possível obter bons resultados com papel pardo e tela plástica. Os ensaios em laboratório se mostraram uma ferramenta importante para o teste de materiais e técnicas de montagem do poço multinível pré-montado, podendo ser facilmente aplicado para testar novos materiais.

Foi verificado que a fluoresceína apresenta forte sorção pelo Latossolo Vermelho, solo tipicamente tropical, provavelmente devido à presença de cargas eletrostáticas. No entanto, a presença de cargas positivas não teve impacto significativo no transporte do traçador brometo, que apresentou comportamento adequado para ser utilizado como tra-

çador conservativo. A diferença de comportamento entre os dois compostos possibilitou o uso combinado dos dois traçadores para a verificação da instalação do poço multinível no campo. O teste em campo foi realizado pela injeção simultânea dos dois traçadores e monitoramento nos pontos diretamente abaixo e acima da injeção. A diferença no comportamento dos dois traçadores pôde ser interpretada como evidência de bom isolamento entre os diferentes níveis de amostragem, com o fluxo ocorrendo pelo meio poroso. Já a detecção de ambos os traçadores indica a ocorrência de falhas no selo, que resulta na fluoresceína sendo transportada sem adsorção. O teste em campo comprovou que é possível construir e instalar um poço multinível pré-montado de alta resolução em solo tropical, com um bom desempenho.

Assim, foi desenvolvida uma técnica de baixo custo para montagem de poços multiníveis e para verificação da integridade dos selos entre níveis de amostragem, que pode ser facilmente aplicada por profissionais da área. Ressalta-se que os traçadores a serem utilizados devem ser previamente avaliados para o material do aquífero de interesse, e o desempenho dos selos deve ser verificado em campo.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao apoio do CNPQ, por meio do Projeto 477283/2011-0.

Agradecem também ao apoio da Fapesp (Processo 2011/12158-2). A participação da autora Margarita Nucho Gálvez no projeto foi financiada por bolsa Bolsa Ibero América-

Santander Universidades. Também agradecem ao apoio da Cetesb, em especial ao presidente Eng. Otávio Okano e do Horto de Rio Claro/SP, em especial ao geólogo Sérgio Ricardo Christofolletti. Os autores ainda agradecem a colaboração da Profa. Sheila A. C. Furquim pela descrição pedológica do solo.

REFERÊNCIAS

- AZEVEDO, Antonio Carlos; BONUMÁ, Angélica S. Partículas coloidais, dispersão e agregação em Latossolos. *Ciência Rural*, v. 34, n. 2, p. 609–617, abr. 2004.
- BARRY, Andrew D. Effect of nonuniform boundary conditions on steady flow in saturated homogeneous cylindrical soil columns. *Advances in Water Resources*, v. 32, n. 4, p. 522-531, abr. 2009.
- BODELÃO, Thomás G.; OLIVEIRA, Everton; FREITAS, Juliana G. Distribuição de LNAPL na zona não saturada em solo tropical, no município de Rio Claro/SP. Submetido à *Revista Águas Subterrâneas*, São Paulo, 2016.
- BOYLE, Dan R. A Dry Injection System for the Emplacement of Filter Packs and Annular Seals in Ground Water Monitoring Wells. *Groundwater Monitoring & Remediation*, v. 12, n. 1, p. 120-125, fev. 1992.
- BROMLY, Melissa; HINZ, Christoph; ALYMORE, Graham. Relation of dispersivity to properties of homogeneous saturated repacked soil columns. *European Journal of Soil Science*, v. 58 n. 1, p. 293-301, fev. 2007.
- CORÁ, José Eduardo; FERNANDES, Carolina; BERALDO, José Marcos G.; MARCELO, Adolfo V. Adição de areia para dispersão de solos na análise granulométrica. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, vol. 33, n. 2, p. 255-262, 2009.
- DAVIS, Stanley N *et al.* Ground-water tracers - a short review. *Ground Water*, v. 18, n. 8, p. 14–23, jan. 1980.
- EINARSON, Murray D.; CHERRY, John A. A new multilevel ground water monitoring system using multichannel tubing. *Ground Water Monitoring & Remediation*, v. 22, n. 4, p. 52–65, nov. 2002.
- EMBRAPA. Sistema Brasileiro de Classificação de Solos. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. 2. ed. Brasília: Embrapa Informação Tecnológica, 2006.
- GÖDEKE, Stefan *et al.* Multi tracer test for the implementation of enhanced in-situ bioremediation at a BTEX-contaminated megasite. *Journal of Contaminant Hydrology*, v. 87, n. 3-4, p. 211–36, out 2006.
- GOLDBERG, Sabine; KABENGI, Nadine J. Bromide adsorption by reference minerals and soils. *Vadose Zone Journal*, v. 9, n. 3, p. 780-786, 2010.
- HALL, Stephen H. Single well tracer tests in aquifer characterization. *Ground Water Monitoring & Remediation*, v. 13, n. 2, p. 118–124, maio 1993.
- HUTCHINS, Stephen R.; ACREE, Steven D. Groundwater sampling bias observed in shallow, conventional wells. *Ground Water Monitoring & Remediation*, v. 20, n. 1, fev. 2000.
- KASNAVIA, Torez; DE, Vu; SABATINI David A. Fluorescent dye and media properties affecting sorption and tracer selection. *Ground Water*, v. 37, n. 3, p. 376–381, 1999.
- KER, João Carlos. Latossolos do Brasil: uma revisão. *Geonomos*, v. 5, n. 1, p. 17–40, 1994.
- LEIBUNDGUT, Christian; MALOSZEWSKI, Piotr; KÜLLS, Christoph. *Tracers in Hydrology*. Chichester: Wiley-Blackwell, 2009.
- LEWIS, Jeffrey; SJÖSTROM, Jan. Optimizing the experimental design of soil columns in saturated and unsaturated transport experiments. *Journal of Contaminant Hydrology*, v. 115, n. 1-4, p. 1–13, jun. 2010.
- McMILLAN, Lindsay A.; RIVETT, Michael O.; TELLAN, John H.; DUMBLE, Peter; SHARP, Helen. Influence of vertical flows in wells on groundwater sampling. *Journal of Contaminant Hydrology*, v. 169, p. 50–61, nov. 2014.
- METCALF, Meredith J.; ROBBINS, Gary A. Comparison of Water Quality Profiles from Shallow Monitoring Wells and Adjacent Multilevel Samplers. *Ground Water Monitoring & Remediation*, v. 27, n. 1, p. 84–91, fev. 2007.

- MEURER, Egon J. **Fundamentos de química do solo**. 4 ed. Porto Alegre: Evangraf, 2010.
- OGATA, Akio; BANKS, Robert B. **A solution of the differential equation of longitudinal dispersion in porous media**. Professional Paper 411-A. Washington, DC: U.S. Geological Survey, 1961.
- OLIVEIRA, João Bertoldo. **Pedologia aplicada**. 2 ed. Piracicaba: FEALQ, 2005.
- PTAK, Thomas; PIEPENBRINK, Matthias; MARTAC, Eugeniu. Tracer tests for the investigation of heterogeneous porous media and stochastic modeling of flow and transport—a review of some recent developments. **Journal of Hydrology**, v. 294, n. 1-3, p. 122–163, jul. 2004.
- REIS, Claudia M.; ZANCHETTA, Denise; FACHIN, Honório C. (coord.). **Plano de manejo da Floresta Estadual Edmundo Navarro de Andrade**. Rio Claro: Instituto Florestal, 2005.
- SANTOS, Raphael D.; LEMOS, Raimundo C.; SANTOS, Humberto G.; KER, João Carlos; ANJOS, Lúcia H. C. **Manual de descrição e coleta de solo no campo**. Viçosa: SBCS, 2005.
- WILLIAMS, Erika C. **Effect of ethanol on BTEX biodegradation in aerobic aquifer systems**. 2007. 105 f. Dissertação (Mestrado em Earth Sciences) - University of Waterloo, Waterloo.