

CARACTERIZAÇÃO PRELIMINAR DO AQUIFERO RIO CLARO EM PAULÍNIA/SP

PRELIMINARY CHARACTERIZATION OF THE RIO CLARO AQUIFER IN PAULÍNIA/SP

Elias Hideo TERAMOTO^{1,2}; Chang Hung KIANG^{1,2,3}, Maria Rita CAETANO CHANG³

¹Laboratório de Estudo de Bacias, Universidade Estadual Paulista – UNESP, Rio Claro (SP), Brasil. Email: teramoto@rc.unesp.br

²Centro de Estudos Ambientais - Universidade Estadual Paulista. Rio Claro (SP)

³Departamento de Geologia Aplicada, Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Universidade Estadual Paulista – UNESP, Rio Claro (SP), Brasil. Emails: chang@rc.unesp.br, mrchang@rc.unesp.br

Introdução
Geologia Regional
Materiais e Métodos
 Caracterização geológica de superfície e subsuperfície
 Krigagem indicativa
 Determinação das propriedades hidráulicas do aquífero
Resultados
 Caracterização litofaciológica
 Fácies de preenchimento de canal / barras
 Fácies de planície de inundação
 Geometria de fácies
 Arquitetura e geometria de fácies
 Caracterização hidráulica do aquífero
Discussão
Conclusão
Agradecimentos
Referências

RESUMO – Este trabalho apresenta os resultados de um estudo sistemático destinado à caracterização hidroestratigráfica do Aquífero Rio Claro no município de Paulínia (SP). Os estudos contemplaram a caracterização do arcabouço geológico e da condutividade hidráulica do aquífero. Os resultados denotam a arquitetura fluvial da unidade litoestratigráfica, com predomínio de litofácies silto-argilosas de planície de inundação, entremeadas por corpos pouco espessos de arenitos de canal, que se distribuem ao longo de cinturões estreitos e relativamente contínuos. Os valores de condutividade hidráulica do Aquífero Rio Claro variam quatro ordens de grandeza, abrangendo um intervalo entre 107 m/s e 10⁻⁴ m/s, em concordância com a forte heterogeneidade litológica observada.

Palavras-chave: Aquífero Rio Claro, Depósitos cenozoicos, Aquífero raso, Geoestatística

ABSTRACT - This work presents the results of a systematic work for the characterization of the Rio Claro aquifer in the industrial district of Paulínia municipality. In this research, was performed the characterization of the geological framework and the hydraulic conductivity of aquifer. The results point to an aquifer composed of rocks deposited in a meandering fluvial environment, with the predominance of flood plain facies associated with channel facies distributed along narrow and relatively continuous belts. The hydraulic conductivity values vary four orders of magnitude, covering a range from 10⁸ to 10⁻⁴ m/s, that is related to the lithological heterogeneity of the aquifer.

Keywords: Rio Claro aquifer, Cenozoic deposits, Shallow aquifers, Geostatistic

INTRODUÇÃO

A denominação Formação Rio Claro tem sido utilizada para designar, de maneira genérica, grande parte dos depósitos Cenozoicos geneticamente relacionados à evolução do relevo da Depressão Periférica Paulista e das Cuestas Basálticas. No entanto, muitos dos depósitos assim denominados apresentam controvérsias quanto à sua idade e contexto paleodeposicional. Na região onde se insere a área de estudo, diversos autores, destacando-se Melo (1995), IG (1995) e Fernandes (1997), descrevem depósitos correlacionáveis à Formação Rio Claro.

O escalonamento do relevo em níveis aplainados, onde estão assentados os depósitos da Formação Rio Claro, tem origem controversa. Bigarella et al. (1965), por exemplo, associam o surgimento desses níveis a oscilações paleoclimáticas, enquanto Soares e Landim (1976) atribuem-nos à atividade tectônica.

No que se refere ao contexto paleoclimático/paleodeposicional na deposição desses sedimentos na área de estudo, Melo et al. (1997) atribuem um sistema fluvial meandrante, atuante sob a vigência de um clima tropical

úmido. Tal conclusão é compartilhada por Santos et al. (2007) que, estudando a composição tafoflorística da Formação Rio Claro no município de Jaguariúna (SP), sob o ponto de vista morfológico e taxonômico, reforça a visão de que a gênese desses depósitos estaria vinculada a um clima tropical úmido, caracterizada por uma floresta tropical ombrófila.

No que tange aos condicionantes deposicionais, nas proximidades do limite leste da Depressão Periférica, Melo et al. (1997) sugerem que o acúmulo de sedimentos foi condicionado por barramentos litológicos formados pelas soleiras e diques de diabásio, uma vez que não encontraram evidências de reativações tectônicas neocenozóicas que condicionassem a sedimentação desses depósitos.

Como apontado por Lopes (1994), os poços que extraem água de aquíferos compostos pelos depósitos cenozoicos das bacias dos Rios Piracicaba, Capivari e Jundiáí, incluindo a Formação Rio Claro, podem alcançar vazões de 35 m³/h, dando indícios que estes aquíferos

possuem elevado potencial de exploração. Oliva (2006) demonstra que o Aquífero Rio Claro no município de Rio Claro/SP representa uma importante reserva de água armazenado no interstício poroso da unidade litoestratigráfica homônima, sendo um aquífero potencialmente importante para o município.

O Aquífero Rio Claro no município de Paulínia e municípios contíguos possui 164 Km² e predominantemente do tipo livre e marcada por sua forte heterogeneidade. A maior parcela água que foi neste aquífero descarrega em tributários dos rios Jaguari e Atibaia, enquanto uma parcela minoritária flui para outros aquíferos subjacentes. A área de estudo situa-se no município de Paulínia, porção centro-leste do Estado de São Paulo.

Diante do cenário exposto acima, este trabalho pretendeu apresentar as informações hoje disponíveis sobre o Aquífero Rio Claro na região do município de Paulínia/SP, descrevendo suas características faciológicas, hidráulicas, bem como avaliar do volume de recarga que ingressa no aquífero.

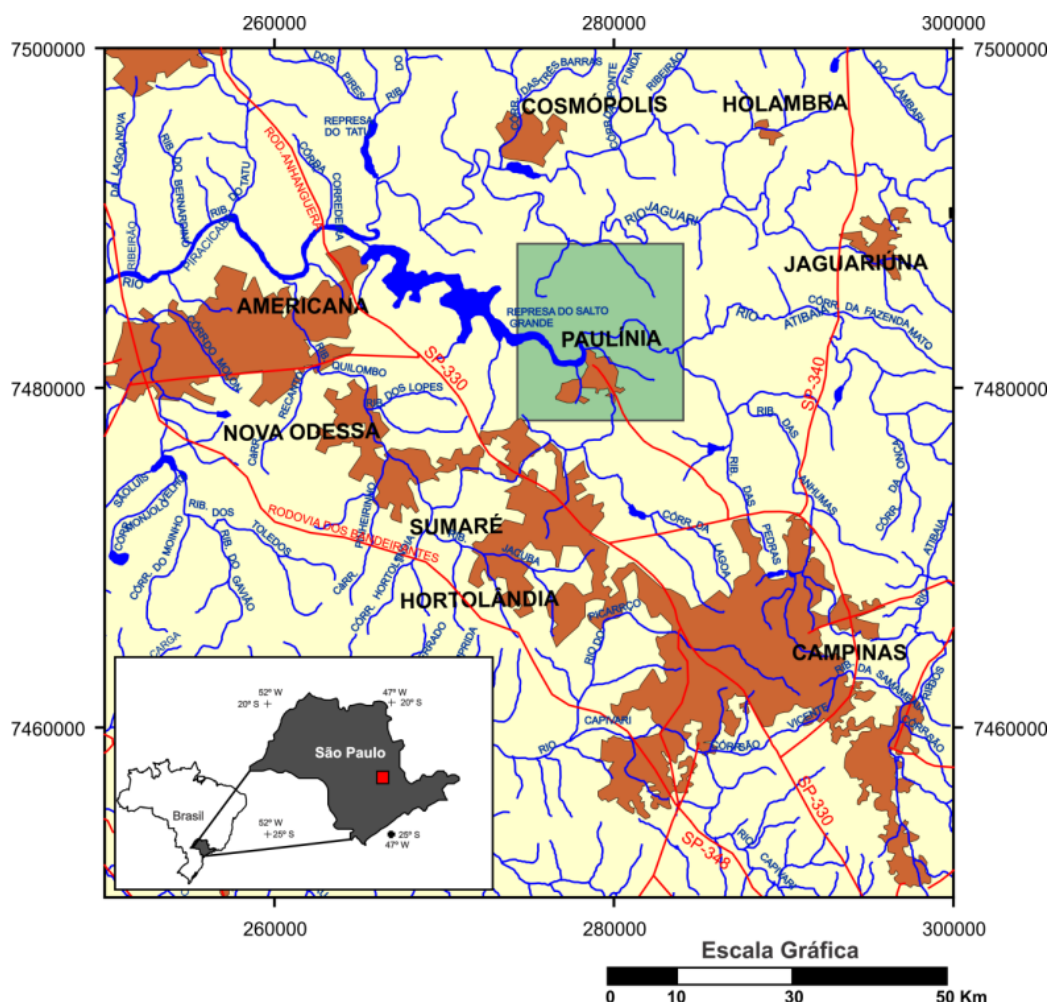


Figura 1 – Localização do município de Paulínia, onde se situa a área de estudo.

GEOLOGIA REGIONAL

Como descrito por Fernandes (1997), na região que abrange a área de estudo estão presentes litologias pertencentes ao Embasamento Cristalino e a unidades litoestratigráficas da Bacia do Paraná

– Subgrupo Itararé, rochas intrusivas básicas da Formação Serra Geral, depósitos cenozoicos atribuídos à Formação Rio Claro – e depósitos quaternários (Figura 2).

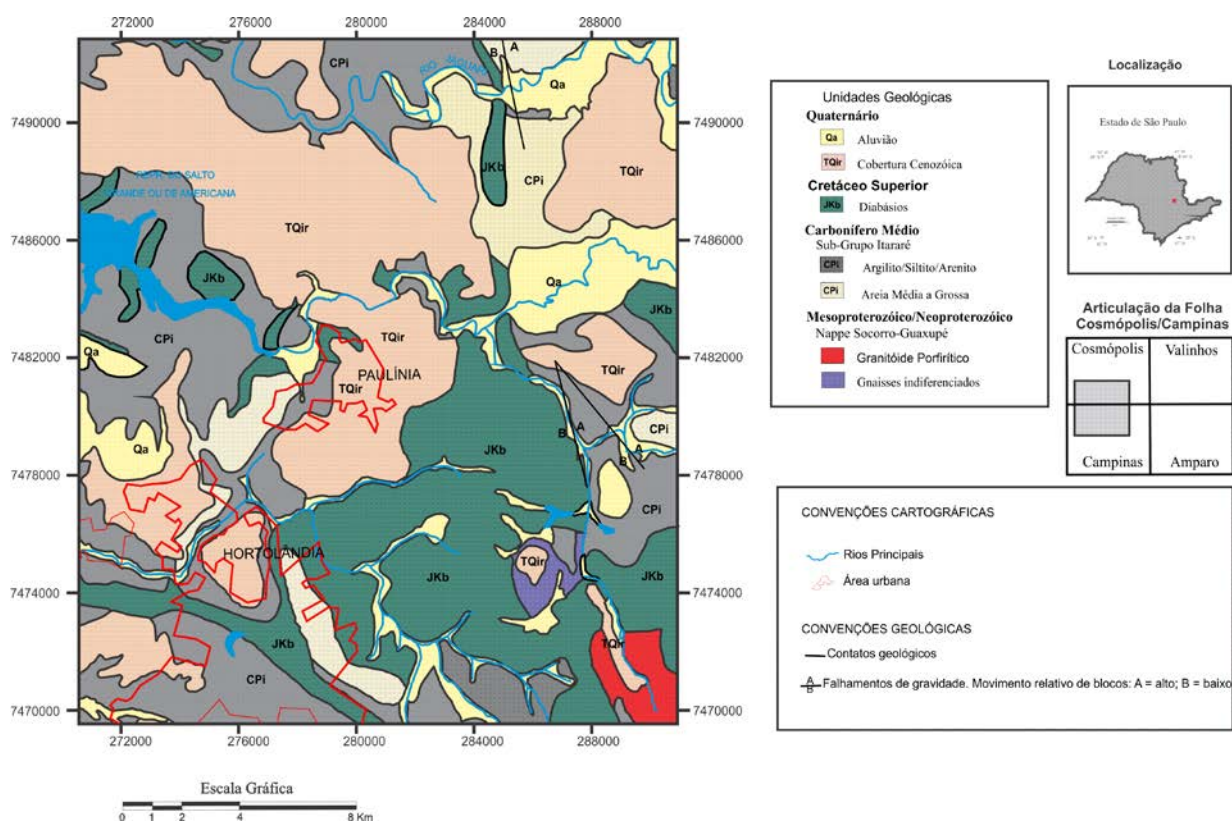


Figura 2 – Mapa geológico da região de Paulínia e regiões contíguas (FERNANDES, 1997).

MATERIAL E MÉTODOS

Embora este trabalho tenha pretendido caracterizar integralmente o Aquífero Rio Claro na região do município de Paulínia, a totalidade das informações de sub-superfície empregadas neste trabalho é proveniente de sucessivas investigações ambientais e monitoramento empreendido em uma área correspondente à aproximadamente 8 Km², que representa apenas uma pequena parcela dos 164 Km² do aquífero.

O mapeamento de afloramentos na região de Paulínia indica que o contexto geológico regional é similar àquela observada em regiões onde se dispõem de informações e, deste modo, assume-se que a caracterização empreendida na área pode ser generalizada para todo o aquífero.

Caracterização Geológica de superfície e subsuperfície

A caracterização inicial da unidade geológica de interesse se apoiou em consulta de trabalhos abordando esta unidade geológica em informações disponíveis na literatura,

sobretudo Melo (1995), Fernandes (1997) e IG (1995). Para promover a caracterização desta unidade, 30 afloramentos foram visitados (Figura 3), das quais 14 pontos correspondem aos afloramentos visitados pelo Instituto Geológico (1995) durante o mapeamento geológico da região que engloba a área de estudo.

A maior parte das informações empregadas para elaborar o modelo geológico conceitual da Fm. Rio Claro foi adquirido a partir de perfis descritivos de investigações ambientais e da compilação de informações provenientes da descrição de sondagens do tipo SPT (*Standard Penetration Test*). Estas informações permitiram a identificação dos litotipos que perfazem o Aquífero Rio Claro, bem como as suas espessuras médias.

Krigagem Indicativa

Para aprimorar o entendimento da distribuição tridimensional das fácies arenosas no Aquífero Rio Claro, foi empregado o método

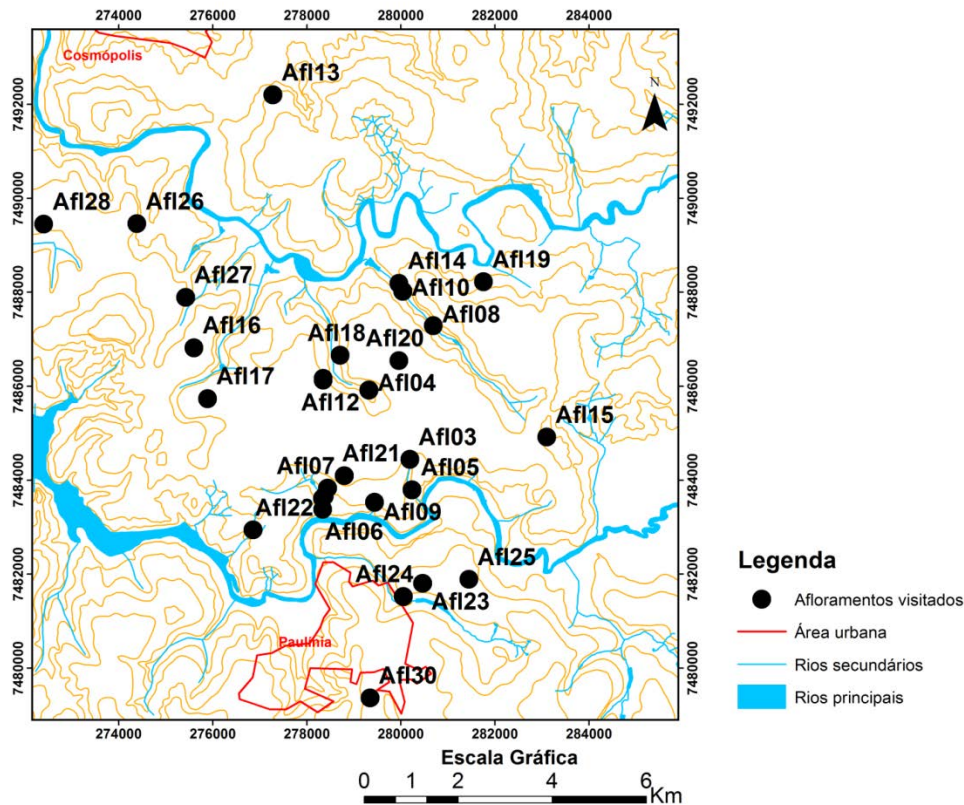


Figura 3 – Mapa com a localização dos afloramentos da Formação Rio Claro visitados e descritos.

geoestatístico da krigagem indicativa às informações de sondagens disponíveis (Figura 4). Johnson & Dreiss (1989) demonstraram a aplicabilidade da krigagem indicativa, proposta por Journel (1983), para caracterização qualitativa de depósitos aluviais complexos. O potencial da krigagem indicativa para

caracterização hidroestratigráfica, empregando a abordagem descrita por Johnson & Dreiss (1989), foi demonstrado com sucesso em diversos trabalhos, incluindo Sminchak, Dominic e Ritzi (1996), Proce *et al.* (2004), Trevisani & Fabbri (2010) e Eshall *et al.* (2013).

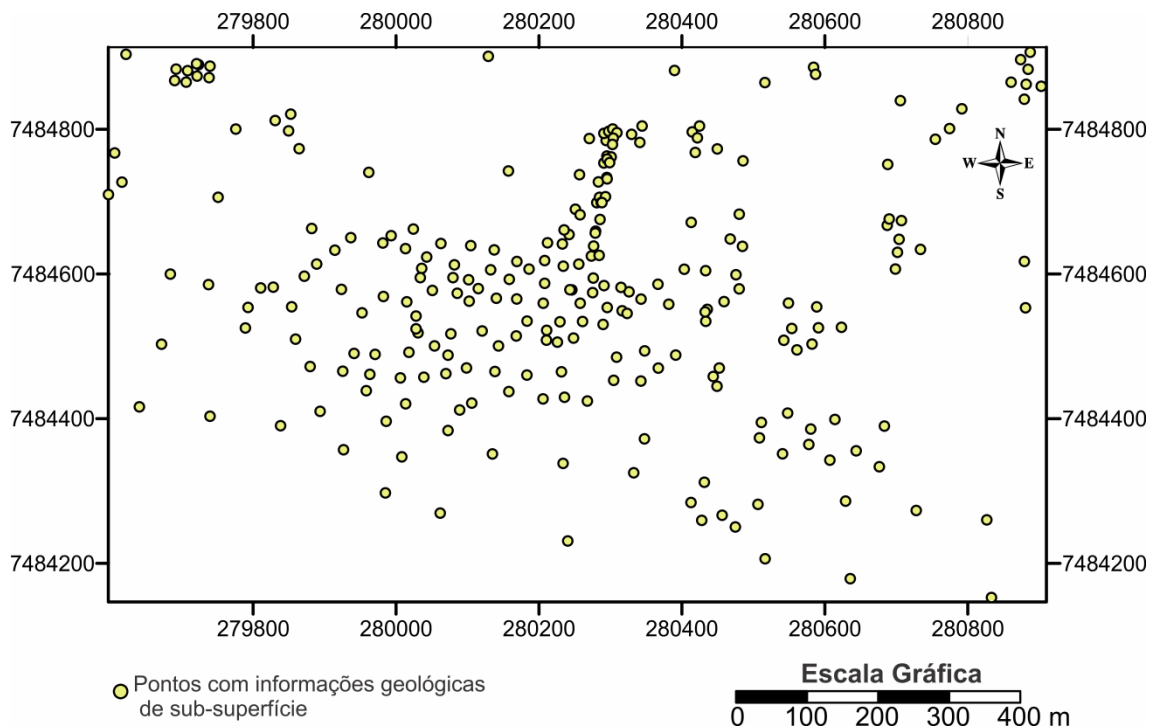


Figura 4 – Distribuição dos 255 pontos com informações geológicas de subsuperfície empregados no presente trabalho.

Na abordagem proposta por Johnson & Dreiss (1989), os sedimentos com elevada permeabilidade recebem o atributo binário 1, enquanto os sedimentos com baixa permeabilidade recebem o atributo 0. A partir da construção do variograma e da krigagem dos valores classificados pela categoria binária, são gerados domínios bidimensionais ou tridimensionais com a distribuição equiprovável da ocorrência de litologias permeáveis. O valor 0,5 representa, aproximadamente, o limite entre sedimentos de elevada e baixa permeabilidade.

As hidrofácies identificadas no Aquífero Rio Claro foram agrupadas em dois grupos: sedimentos arenosos e sedimentos pelíticos. Os dados de descrição litológica nas sondagens analisadas foram classificados como atributo binário 1, para os sedimentos arenosos, e 0, para as fácies pelíticas, como apresentado na Equação 1.

$$I(x, z_c) = \begin{cases} 1: \text{fácies arenosas, se } Z(x) \leq z_c \\ 0: \text{fácies pelíticas, se } Z(x) > z_c \end{cases}$$

Sob a premissa de que as estruturas espaciais que governam a distribuição espacial de fácies podem ser descritas por semivariogramas experimentais indicativos, a partir de observações discretas ($z(x_i; z_c)$), estes semivariogramas foram calculados a partir da Equação 2.

$$\gamma^*(h; z_c) = \frac{1}{2N(h)} \sum_{i=1}^{N(h)} [z(x_i + h; z_c) - z(x_i; z_c)]^2$$

onde $\gamma^*(h)$ é o valor de semivariância

RESULTADOS

Caracterização Litofaciológica

A análise integrada de afloramentos e dos perfis descritivos das sondagens executadas na área de estudo permitiu distinguir dois conjuntos faciologicos característicos de sistema fluvial meandrante – fácies de canal e fácies de planície de inundação.

Fácies de Canal

As exposições de litotipos arenosos da Formação Rio Claro na região do município de Paulínia são menos abundantes que os silto-argilosos, sugerindo um predomínio de pelitos na unidade. Tal constatação é também parti-lhada em análises dos perfis descritivos de sondagens, em que delgadas camadas arenosas se alternam com camadas de pelitos, cujas espessuras podem atingir mais de uma dezena de metros. As fácies arenosas identificadas são representadas por dois litotipos distintos: arenito médio a grosso e arenito médio a grosso argiloso.

calculada entre dois pares situados a uma distância h , $N(h)$ é o número de pares de pontos separados aproximadamente pela mesma distância h , $z(x_i + h; z_c)$ é a probabilidade de ocorrência a uma distância $x_i + h$ e $z(x_i; z_c)$ é a probabilidade de ocorrência a uma distância x_i .

Aos semivariogramas experimentais foi ajustado um modelo variográfico mais apropriado; a krigagem ordinária utilizou os dados classificados com os atributos binários 0 e 1, gerando modelos tridimensionais com a distribuição das probabilidades de ocorrência de fácies arenosas. Adotando-se o critério proposto por Johnson & Dreiss (1989), foi empregado o valor de corte (z_c)0,5 para estabelecer os limites entre as fácies arenosas e pelíticas.

Determinação das Propriedades Hidráulicas do Aquífero

Os valores de condutividade hidráulica utilizados neste estudo foram compilados a partir de diversos trabalhos, como Teramoto & Chang (2008), Pede (2009) e Teramoto et al. (2010). Esses dados, obtidos a partir dos ensaios de slug e apresentados em Teramoto, Chang & Caetano-Chang (2017), foram interpretados empregando o método proposto por Hvorslev (1951). Nos poços de monitoramento foram instalados filtros em intervalos específicos, o que permitiu a determinação de condutividade hidráulica de cada uma das litologias identificadas.

Os arenitos médios a grossos, com grãos subangulares a subarredondados, muitas vezes levemente microconglomeráticos, apresentam estratificações cruzadas acanaladas e cruzadas de médio porte incipientes, formando corpos de espessura (decímetros a metros) e extensão (metros a dezenas de metros) variadas. Localmente ocorrem arenitos conglomeráticos e/ou conglomerados arenosos, cujos seixos, predominantemente quartzosos, são subarredondados a subangulares; por vezes apresentam intraclastos de siltitos laterizados. Esse litotipo corresponde a depósitos de barras de canais fluviais ativos (Figuras 5 e 6a). Arenitos médios a grossos, com matriz silto-argilosa (Figura 6b) que pode atingir 20% do total da rocha, são comuns; na maioria dos casos são maciços ou apresentam estratificações cruzadas pouco nítidas. Este litotipo corresponde à fácies de barras de canais abandonados, que se formam

nas fases iniciais do abandono, anteriormente à obstrução total do trecho abandonado. Esses

litotipos correspondem às fácies Ar de Fernandes (1997) e Trcc de Melo (1995).

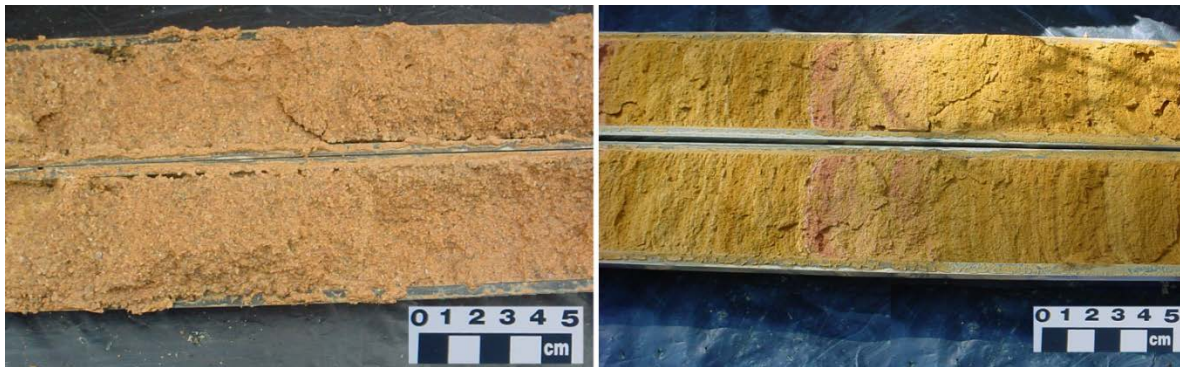


Figura 5. Litotipos de fácies de canal, recuperados pela técnica *direct push*: a) areia média a grossa microconglomerático, friável, sem estruturas preservadas; b) areia média a grossa argilosa, com estratificações pouco aparentes.



Figura 6 – Litotipos de fácies de canal em afloramentos: a) areia média a grossa microconglomerática com estratificações cruzadas acanaladas (Afl27); b) areia média a grossa argilosa, levemente microconglomerático, com estratificações cruzadas e acanaladas pouco pronunciadas (Afl04).

Fácies de Planície de Inundação

Os litotipos pelíticos são majoritários na composição da Formação Rio Claro na região de Paulínia. São representados predominantemente por siltitos argilosos (Figuras 7a e 8a) e, de maneira subordinada, por argilitos arenosos (Figura 8b) e arenitos muito finos silto-argilosos (Figura 7b). Esta fácies apresenta laminações plano-paralelas incipientes e pouco frequentes, dominando o aspecto maciço, provavelmente devido à intensa bioturbação. Por vezes apresentam-se bastante fraturados (Figura 7a e

8a). Esses litotipos constituem depósitos de planície de inundação, englobando fácies de *crevasse splay*s (Figura 7b), relacionadas a eventos episódicos de transbordamento de canal. Correspondem às fácies Si, Ag e Laf de Fernandes (1997) e Trcm de Melo (1995).

O franco predomínio das fácies de planície de inundação observado na região de Paulínia, forma extensas (centenas de metros) e espessas (metros) camadas, sugerindo um contexto marcado por amplas e extensas planícies cortadas por rios meandantes isolados.



Figura 7 – Litotipos de fácies de planície de inundação em afloramentos: a) Silte argiloso (Afl02); b) Areia fina siltosa, com laminação cruzada (Afl 01).

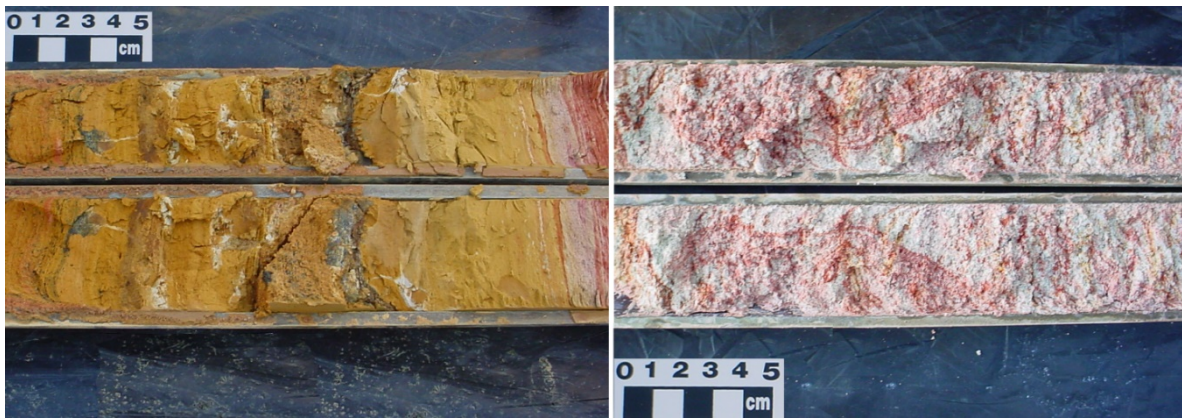


Figura 8 – Litotipos de fácies de planície de inundação recuperados pela técnica *direct push*: a) Silte argiloso, maciço e fraturado, alternado com arenito fino siltoso, mostrando laminações cruzadas; b) Argila arenosa, maciço, com grânulos e seixos dispersos.

Arquitetura e Geometria das Fácies

A arquitetura de fácies mostra o comportamento lateral e vertical de fácies sedimentares, permitindo inferir a distribuição e a proporção relativa entre fácies em um determinado contexto deposicional. Nesse sentido, a definição dessa arquitetura é de particular importância para identificação da distribuição e persistência das fácies mais permeáveis, fundamentais para o entendimento do comportamento de fluxo e armazenamento de água no aquífero.

A análise de afloramentos e testemunhos de sondagens da Formação Rio Claro na região de Paulínia indica que as fácies arenosas – fácies de canal – estão embutidas em espessas camadas de pelitos – fácies de planície de inundação. Esses corpos arenosos apresentam espessura (decímetros a metros) e extensão (metros a dezenas de metros) variadas, em muitos casos evidenciando a geometria de paleo-canais (Figura 9); o amalgamento de canais é perceptível, porém não marcante.

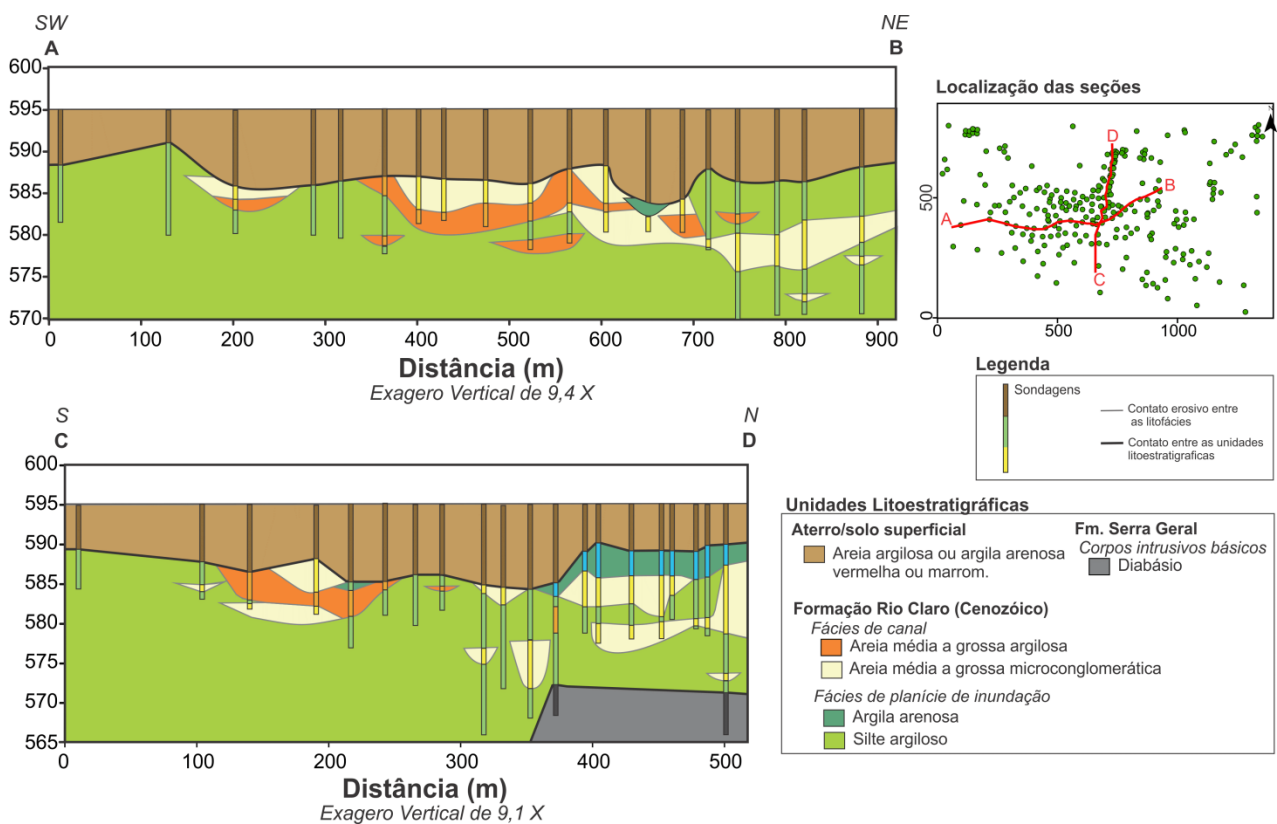


Figura 9 – Seções geológicas construídas a partir de descrições litológicas de sondagens na área de estudo: a) Seção geológica aproximadamente E-W; b) Seção geológica N-S.

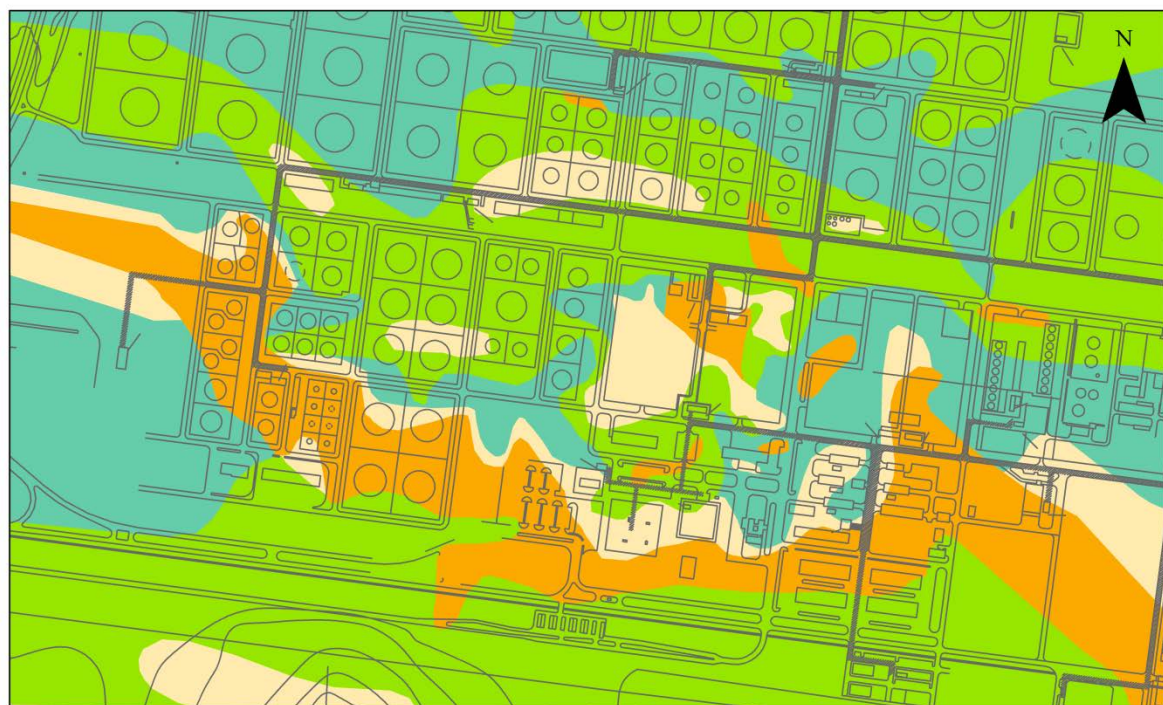
A relação entre as fácies de canal e de “afogamento” de canais na região de Paulínia, planície de inundação sugerem situação de diferente do que se encontra na região de Rio

Claro, onde predominam arenitos e conglomerados de canais fluviais, com fácies pelíticas subordinadas, sugerindo condições paleoambientais/paleoclimáticas diversas.

Outra característica a ser notada é que os depósitos atribuídos à Formação Rio Claro na região de Paulínia apresentam consolidação pouco mais elevada comparativamente às rochas da Formação Rio Claro na região do município homônimo. Isso pode ser explicado pela idade pouco maior dessas rochas na região de Paulínia, como detectado por Salmazo (2015), sugerindo, juntamente com as distintas proporções entre as fácies, fases distintas na deposição desses sedimentos.





A concepção do padrão deposicional

possibilitou a proposição de modelo lito-faciológico para a porção superior da zona saturada do Aquífero Rio Claro na região de Paulínia. Esse modelo conceitual mostra o amplo predomínio de litotipos pelíticos de fácies de planície de inundação, com os corpos arenosos alongados distribuídos em uma faixa restrita. As camadas arenosas na área industrial possuem espessuras que variam de decímetros até pouco mais de 5 m, sugerindo processo de amalgamento nas porções mais espessas, conforme verificado em afloramentos. A Figura 10 mostra a configuração dos litotipos presentes em subsuperfície, em área do Distrito Industrial de Paulínia, na porção superior da zona saturada do Aquífero Rio Claro.



Legenda

Litologias

-  Areia média a grossa microconglomerática
-  Areia média a grossa argilosa
-  Argila arenosa
-  Silte argiloso

Escala Gráfica

0 62,5 125 250 375 500 m

Figura 10 – Distribuição de litotipos presentes na porção superior da zona saturada do Aquífero Rio Claro em área do Distrito Industrial de Paulínia. Notar corpo de arenitos alongado, evidenciando deposição ao longo de canal fluvial.

Para aprimorar a compreensão da distribuição tridimensional das fácies arenosas na área estudada, foram realizados cálculos de krigagem indicativa, a partir de informações dos perfis de sondagens. O semivariograma experimental indicativo omnidirecional com ajuste a um modelo esférico é apresentado na Figura 11a.

Com base no modelo variográfico foi realizado o cálculo dos valores equiprováveis para a ocorrência de fácies arenosas a partir da krigagem indicativa. Adotando-se um valor de corte de 0,5 foi construída a distribuição tridimensional das fácies de depósitos de preenchimento de canal (Figura 11b).

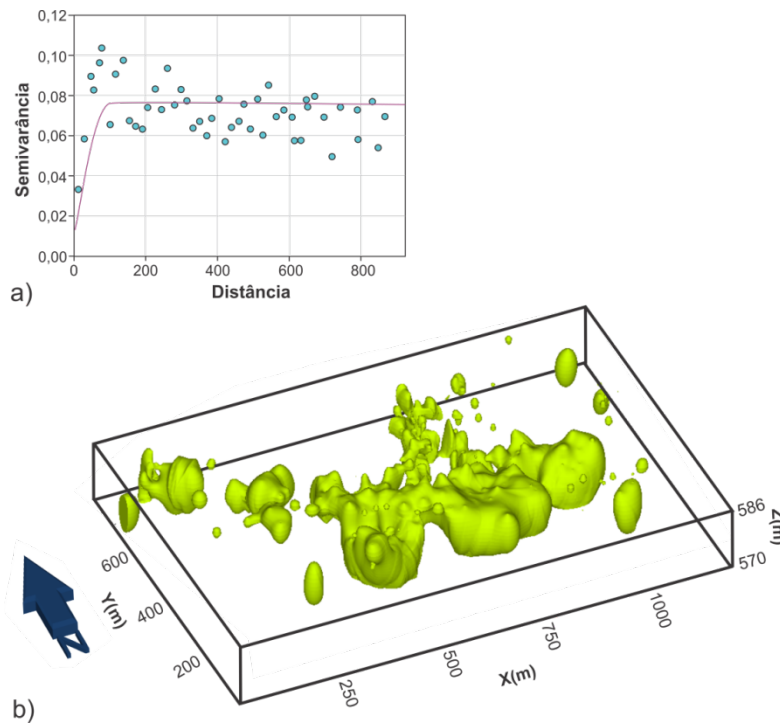


Figura 11 – a) Variograma experimental e b) modelo tridimensional para ocorrência das fácies arenosas.

Teramoto, Chang & Caetano-Chang (2017) demonstraram que, em razão do amplo predomínio de fácies pelíticas, a migração de contaminantes no Aquífero Rio Claro é essencialmente controlada pela conectividade das fácies arenosas que, quando pouco argilosas, são dotadas de elevados valores de permeabilidade. A proporção de fácies arenosas na área avaliada é de 32,7%. Na distribuição tridimensional das fácies de preenchimento de canal, geradas a partir da krigagem indicativa, é possível constatar que as fácies arenosas se distribuem ao longo de uma faixa aproximadamente leste-oeste, concordante com o fluxo de provável canal. A constatação desta geometria tem profundas

implicações no regime de fluxo subsuperficial e no comportamento de contaminantes em subsuperfície no local.

Caracterização Hidráulica do Aquífero

A Figura 12 apresenta os logaritmos naturais de condutividade hidráulica ($\ln(K)$), com base em 116 informações coletadas. Esses resultados obedecem a uma distribuição aproximadamente normal, com leve assimetria negativa. Os valores de média e desvio-padrão calculados para $\ln(k)$ são, respectivamente, -11,58 ($K=9,30 \times 10^{-4}$ m/s) e 2,10. O elevado valor de desvio-padrão reflete a ampla variação dos valores de condutividade hidráulica, decorrentes das heterogeneidades geológicas que caracterizam este aquífero.

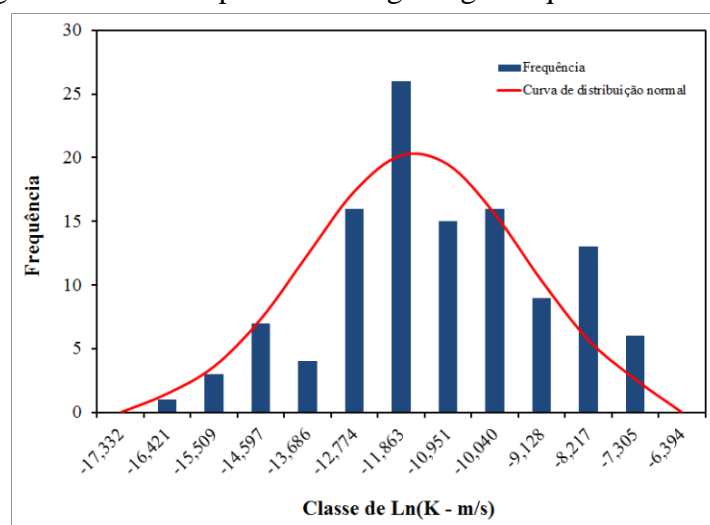


Figura 12 – Distribuição dos valores de $\ln(K)$, revelando uma distribuição normal dos 116 dados de condutividade hidráulica obtidos.

Tabela 1 – Litologias presentes na área de estudo e respectivos valores de condutividade hidráulica, mensurados em poços de monitoramento na área de estudo.

Litologia	K (m/s) mínimo	K (m/s) médio	K (m/s) máximo	Número de ensaios
Silte argiloso litificado	$7,39 \times 10^{-8}$	$2,71 \times 10^{-7}$	$5,45 \times 10^{-7}$	13
Silte argiloso friável	$7,48 \times 10^{-7}$	$3,30 \times 10^{-6}$	$6,64 \times 10^{-6}$	44
Argila arenosa	$7,20 \times 10^{-6}$	$1,91 \times 10^{-5}$	$3,82 \times 10^{-5}$	31
Areia média argilosa	$5,23 \times 10^{-5}$	$7,27 \times 10^{-5}$	$8,98 \times 10^{-5}$	5
Areia média a grossa microconglomerático	$1,03 \times 10^{-4}$	$2,36 \times 10^{-4}$	$6,72 \times 10^{-4}$	23

A partir dos perfis descritivos dos poços de monitoramento, Teramoto (2015) estabeleceu a associação entre os valores de condutividade hidráulica para cada litotipo identificado (Tabela 1). Verifica-se que cada litotipo apresenta baixa variabilidade nos valores de condutividade hidráulica, com exceção dos siltitos argilosos que mostram ampla faixa de variação, alcançando duas ordens de grandeza. Esse litotipo ostenta variados graus de faturamento, que é responsável por conferir valores de condutividade hidráulicas muito superiores aos esperados para esse litotipo.

Os valores de condutividade hidráulica foram obtidos a partir dos trabalhos de Teramoto (2008), Pede (2009), Teramoto et al. (2010) e Teramoto (2015). Tendo em vista que os tipos litológicos identificados pelos mencionados autores são os mesmos identificados nos afloramentos visitados, assume-se a premissa que estes valores podem ser empregados para toda a Formação Rio Claro no município de Paulínia.

Os siltitos argilosos litificados ostentam variáveis graus de faturamento. A presença destas fraturas é responsável por conferir valores de condutividade hidráulicas muito superiores aos esperados para tais litologias. É

ainda possível verificar que a variabilidade no grau de fraturamento deste litotipo pode explicar a ampla faixa de variação dos valores de condutividade hidráulica desta unidade apresentados na Tabela 1.

Segundo Teramoto et al. (2010), a condutividade hidráulica é dependente do parâmetro d_{60} , extraída da curva granulométrica e de um parâmetro binário, denominado fator de compactação da amostra (fct), sendo atribuído 0 para amostras friáveis e 1 para amostras com algum grau de litificação. Com base nesta relação, Teramoto et al. (2010) determinou a seguinte relação expressa na Equação 3.

$$K(m/s) = e^{(0,9422 * \ln(d_{60}) - 3,7011 * f_{cp} - 8,4197)}$$

A distribuição tridimensional da condutividade hidráulica é uma informação crucial para entendimento dos regimes de fluxo em subsuperfície, bem como do transporte de contaminantes dissolvidos na água subterrânea e simulações numéricas de fluxo em meio poroso. Com base na associação entre a arquitetura faciológica e o valor médio de K para cada um dos litotipos individualmente, é possível estimar a distribuição tridimensional dos valores deste parâmetro no aquífero.

DISCUSSÃO

Ressalta-se a necessidade de se avaliar a potencialidade deste aquífero com o mapeamento sistemático de sub-superfície das unidades permeáveis e mensuração da produtividade de poços instalados neste aquífero a partir de testes de bombeamento. Entretanto, elementos disponíveis neste momento sugerem que este aquífero possui elevado potencial de exploração. O litotipo areia média a grossa microconglomerática possui valores elevados de

condutividade hidráulica e, portanto, porções do aquífero onde existe o predomínio deste litotipo, os valores de transmissividade são igualmente elevados, permitindo grandes vazões de água. Os poços de bombeamento instalados neste aquífero na região industrial de Paulínia releva que este pode alcançar elevadas dos poços de bombeamento superiores a $9 \text{ m}^3/\text{h}$, mesmo com 5 m de sessão filtrante. Tais poços possuem vazões duas vezes superiores aos poços do Aquífero

Tubarão, representado pelas rochas do Sub-Grupo Itararé, nas proximidades do município de Paulínia, com profundidade variando de 120 a 250 m. Deste modo, o Aquífero Rio Claro mostra-se mais produtivo e os custos de perfuração e instalação destes poços são muito inferiores que em poços do Aquífero Tubarão.

É relevante mencionar que a despeito das elevadas vazões registradas neste aquífero, estas são possíveis somente em casos onde a sessão filtrante dos poços de bombeamento é instalada em porções contínuas dos corpos de paleocanais. Os poços instalados em camadas das fácies arenosas descontínuas são caracterizados por grandes volumes nos estágios iniciais de bombeamento, seguidos por um rebaixamento excessivo do nível dinâmico, indicando uma restrição nas taxas de reposição de água nos poços. A favorabilidade da instalação de poços de bombeamento deve ser conduzida a partir da execução de sondagens contínuas para realizar o mapeamento de sub-superfície para identificar a presença de arenitos atribuídas às fácies de canal/barra marginal e avaliar sua continuidade

lateral.

Tendo em vista que o Aquífero na região de interesse recobre uma área de aproximadamente 164 Km², admitindo-se uma espessura saturada média de 25 m, uma porosidade efetiva de 0,22 (PEDE, 2009) e que as fácies arenosas correspondem à 20% do aquífero, obtêm-se uma estimativa de volume explorável de água em torno de 144.320.000 m³ de água. Tal estimativa indica que este aquífero possui uma importante e estratégica importância local, embora esta seja negligenciada.

O fato de o Aquífero Rio Claro ser do tipo livre e não-confinado e se situar em um importante pólo petroquímico, o torna fortemente susceptível à contaminação por derivados de petróleo proveniente do vazamento acidental de dutos de transferência ou tanques de estocagem. O conhecimento das propriedades hidráulicas e das heterogeneidades geológicas deste aquífero contribuem significativamente para o entendimento do comportamento dos contaminantes orgânicos em sub-superfície na área de estudo.

CONCLUSÕES

A existência de importante polo petroquímico no município de Paulínia acarreta problemas relacionados à contaminação do terreno por vazamento de hidrocarbonetos. Deste modo, o conhecimento prévio das características geológicas da área e de suas propriedades hidráulicas é crucial para o entendimento do comportamento de contaminantes em subsuperfície e para o estabelecimento de modelos conceituais consistentes do aquífero local. A despeito deste cenário, trabalhos sistemáticos para caracterização do Aquífero Rio Claro no município não haviam ainda sido conduzidos.

No município de Paulínia, o Aquífero Rio Claro é composto predominantemente por fácies

de planícies de inundação (litotipos pelíticos), que formam espessas e contínuas camadas de siltitos argilosos, nos quais estão embutidos corpos arenosos de fácies de canal, distribuídos como lentes alongadas e, por vezes, espessas. Esta arquitetura de fácies reflete o contexto deposicional reinante, no qual os canais apresentam baixa taxa de migração lateral e forte acreção vertical, propiciando o amalgamento de canais ao longo de uma faixa estreita.

As fácies de canal (barras de meandro) apresentam elevados valores de permeabilidade ($5,23 \times 10^{-5}$ m/s a $6,72 \times 10^{-4}$ m/s), enquanto as fácies de planície de inundação são dotadas de valores baixos a moderados ($7,39 \times 10^{-8}$ m/s a $3,82 \times 10^{-5}$ m/s).

REFERÊNCIAS

- BIGARELLA, J.J.; MOUSINHO, M.R.; SILVA, J.X. Contribuição ao estudo da Formação Pariquera-Açu. **Boletim Paranaense de Geografia** v.16/17, p. 17-41, 1965.
- ELSHALL, A.S.; TSAI, F.C.; HANOR, J.S. Indicator geostatistics for reconstructing Baton Rouge aquifer-fault hydrostratigraphy, Louisiana, USA. **Hydrogeology Journal**, v. 21, n. 8, p. 1731-1747, 2013.
- FERNANDES, A.J. **Tectônica Cenozóica na Porção Média da Bacia do rio Piracicaba e sua Aplicação à Hidrogeologia**. Tese (Doutoramento em Recursos Minerais e Hidrogeologia). Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo. São Paulo, 244p. 1997.
- HVORSLEV, M.J. Time Lag and Soil Permeability in Ground-
Water Observations, **Bull. 36, Waterways Exper. Sta. Corps of Engrs.**, U.S. Army, Vicksburg, Mississippi, p. 1-50. 1951.
- INSTITUTO GEOLÓGICO (IG). **Subsídios para o planejamento regional e urbano do meio físico na porção média da Bacia do Rio Piracicaba, SP.** IG/SMA. São Paulo. 4 v. 1995.
- JAMES, S. R., SCREATON, E. J., RUSSO, R. M., PANNING, M. P., BREMNER, P. M., STANCIU, A. C., FARRELL, M. E. Hydrostratigraphy characterization of the Floridan aquifer system using ambient seismic noise. **Geophysical Journal International**, v. 209, n. 2, p. 876-889, 2017.
- JOHNSON, N.M.; DREISS, S.J. Hydrostratigraphic interpretation using indicator geostatistics. **Water Resources**

- Research**, v. 25, n. 12, p. 2501-2510, 1989.
- JOURNEL, A.G. Nonparametric estimation of spatial distributions. **Journal of the International Association for Mathematical Geology**, v. 15, n. 3, p. 445-468, 1983.
- MELO, M.S. **A Formação Rio Claro e depósitos associados: sedimentação neocenozóica na Depressão Periférica Paulista, São Paulo**. Tese de Doutorado, Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo. São Paulo, 144p. 1995.
- MELO, M.S.; COIMBRA, A.M.; CUCHIERATO, G.. Fácies sedimentares da Formação Rio Claro, neocenozóico da depressão periférica paulista. **Revista do Instituto Geológico**, v. 18, n. 1-2, p. 49-63, 1997.
- PROCE, C.J.; RITZI, R.W.; DOMINIC, D.F.; DAI, Z. Modeling multiscale heterogeneity and aquifer interconnectivity. **Groundwater**, v. 42, n. 5, p. 658-670, 2004.
- SALMAZO, G. O. **Estudo geocronológico de sedimentos correlatos à Formação Rio Claro**. Tese de Doutorado (Ciências dos Materiais). Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira, Universidade Estadual Paulista, Ilha Solteira, SP. 110p. 2015.
- SANTOS, M.A; OLIVEIRA, M.E. Evidências paleoclimáticas e paleoecológicas, segundo dados paleobotânicos e mineralógicos, dos argilitos neógenos de Jaguariúna (SP), correlatos à Formação Rio Claro. **Revista Geociências-UnG**, v. 6, n. 1, p. 80-106, 2008.
- SMINCHAK, J. R.; DOMINIC, D.F.; RITZI, R.W. Indicator geostatistical analysis of sand interconnections within a till. **Groundwater**, v. 34, n. 6, p. 1125-1131, 1996.
- SOARES, P.C.; LANDIM, P.M.B.. Depósitos cenozóicos na região centro sul do Brasil. **Notícia Geomorfológica**, v. 16, n. 31, p. 17-39, 1976.
- TERAMOTO, E.H.; CHANG, H.K. Caracterização hidrogeológica e simulação numérica em área do distrito industrial de Paulínia. **Águas Subterrâneas**. V. 22, N.1, p. 129-144. 2008.
- TERAMOTO, E.H.; ALFARO, M.A.S.; PEDE, M.A.Z.; ALFARO, E.M.; CHANG, H.K. Modelo Empírico para estimativa de Condutividade Hidráulica a partir de dados granulométricos. **Geotecnia**, n. 119, p. 41-53, 2010
- TERAMOTO, E.H. **Estudo da efetividade da atenuação natural de compostos BTEX em uma área contaminada por querosene de aviação**. Tese de Doutorado (Programa de Pós-Graduação em Geociências, Área de Concentração em Geociências e Meio Ambiente). Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Universidade Estadual Paulista, Rio Claro, SP. 238p.. 2015.
- TERAMOTO, E.H.; CHANG, H. K.; CAETANO-CHANG, M.R. Transporte de solutos em diferentes cenários geológicos gerados por modelos estocásticos de cadeias de Markov. **Águas Subterrâneas**, v. 31, n. 4, p. 316-326, 2017.
- TREVISANI, S.; FABBRI, P. Geostatistical modeling of a heterogeneous site bordering the Venice lagoon, Italy. **Groundwater**, v. 48, n. 4, p. 614-623, 2010.

*Submetido em 22 de março de 2017
Aceito em 26 de janeiro de 2019*