

Estudo da vulnerabilidade à contaminação na porção norte da Bacia Hidrográfica do Ribeirão Claro, SP

Study of vulnerability to contamination of the Ribeirão Claro hydrographic basin's northern portion, SP, Brazil

Felipe Pereira de Sisto¹, Fábio Augusto Gomes Vieira Reis², Lucília do Carmo Giordano², Alan de Oliveira²

¹Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho" - UNESP, Pós-Graduação em Geociências e Meio Ambiente, Rua João Canciano, 70, CEP 13735-043, Mococa, SP, BR (felipe.psisto@gmail.com)

²Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho" - UNESP, Instituto de Geociências e Ciências Exatas - IGCE, Departamento de Geologia Aplicada, Rio Claro, SP, BR (fabio@ecogeologia.com.br; lcg@ecogeologia.com.br; labgeot@rc.unesp.br)

Recebido em 15 de agosto de 2017; aceito em 23 de julho de 2018

Resumo

Pelo fato de o Aquífero Rio Claro ser um aquífero livre e de estar relativamente próximo da superfície, acaba se tornando suscetível à infiltração de contaminantes das mais variadas fontes. O presente artigo apresenta um estudo sobre a vulnerabilidade das camadas superficiais dos perfis de alteração da Formação Rio Claro na porção norte da Bacia Hidrográfica do Ribeirão Claro. Como produto principal, foi gerado um mapa de vulnerabilidade à contaminação, na escala 1:50.000, que correlaciona a geologia e o uso e ocupação do solo na área. Além disso, foram realizados ensaios geotécnicos *in situ* com o permeâmetro de Guelph e a coleta de amostras deformadas e indeformadas de solos pertencentes à Formação Rio Claro para a realização de ensaios geotécnicos para obtenção dos índices físicos e de granulometria e sedimentação. Com os resultados obtidos foi possível observar uma heterogeneidade nos valores de condutividade hidráulica nos solos da Formação Rio Claro, reflexo de sua composição também variada. A vulnerabilidade à contaminação observada neste estudo foi, em geral, alta para toda a área do aquífero.

Palavras-chave: Vulnerabilidade; Aquífero Rio Claro; Ensaio geotécnicos; Condutividade hidráulica.

Abstract

Because it is an unconfined aquifer and is relatively close to the surface, Rio Claro Aquifer becomes an easy target for infiltration of contaminants from various sources. The present paper aims to study the vulnerability of the upper layers of the soils on the Ribeirão Claro hydrographic basin's north section. A contamination vulnerability map was created, relating the geology and the use and occupation of the soil in the area. Furthermore, *in situ* geotechnical testing was performed using the Guelph Permeameter, alongside with the collect of deformed and undeformed soil samples of the Rio Claro Formation, in order to perform laboratory geotechnical testing and obtain material physical parameters and its grain size, as well as its sedimentation rate. With the obtained results, it can be concluded that the hydraulic conductivity of the Rio Claro Formation's soils is heterogeneous, a reflex of its composition. The contamination vulnerability for the aquifer area obtained in this paper is, in general, high.

Keywords: Vulnerability; Rio Claro Aquifer; Geotechnical testing; Hydraulic conductivity.

INTRODUÇÃO

De acordo com Foster et al. (2002), durante os anos 1970 e 80, quando se começou a utilizar a palavra vulnerabilidade nos estudos de aquíferos, o termo era utilizado para se referir à susceptibilidade relativa dos aquíferos quanto à poluição por atividades antrópicas. Com o tempo, e a falta de uma definição formal, o termo passou a possuir diferentes significados para diferentes autores. Para Foster et al. (2002), a melhor definição para o termo vulnerabilidade estaria associada às características físicas intrínsecas dos aquíferos, enquanto que o perigo de contaminação das águas subterrâneas seria a probabilidade da porção superior de um aquífero ser contaminado por atividades relacionadas ao uso e ocupação do solo, com essas sendo definidas como a carga potencial contaminante.

Essa distinção também é adotada por Ribeira (2004) e Kemerich et al. (2011), que se baseiam na definição proposta por Vrba e Zaparozec (1994), na qual a vulnerabilidade natural ou intrínseca dos aquíferos é relacionada a diversas características referentes ao solo e aos parâmetros hidráulicos. Já a vulnerabilidade específica seria a capacidade de um aquífero suportar um tipo de contaminante ou impacto, dentro de um contexto socioeconômico. Desse modo, assim como adotado por Kemerich et al. (2011), neste artigo o termo vulnerabilidade (específica) é compreendido como a susceptibilidade à contaminação do aquífero.

A vulnerabilidade em aquíferos, de acordo com Braga (2008), pode ser entendida como um conjunto de características que regulam o quanto o aquífero poderá ser afetado por uma atividade contaminante. Para o autor, essas características são: o tipo, a profundidade do nível d'água e as características das camadas acima do aquífero.

Em aquíferos livres, a recarga sempre ocorre de maneira direta (ABAS, 2005), ou seja, a água é adicionada por percolação direta e vertical na zona insaturada, atingindo o aquífero (Vries e Simmers, 2002). Desse modo, um aquífero livre é mais susceptível à contaminação em comparação a um aquífero confinado, pois além de possuir o nível d'água geralmente mais próximo à superfície, esse tipo de aquífero muitas vezes está em contato direto com a fonte de contaminantes.

Pelo fato de estar localizado, em parte, sob áreas residenciais e industriais, o Aquífero Rio Claro, associado à formação geológica com a mesma denominação, pode vir a ser alvo de contaminantes. Na região, inclusive, já são conhecidas e mapeadas, pela Companhia Ambiental do Estado de São Paulo (CETESB), algumas ocorrências de áreas contaminadas, devido, principalmente, a resíduos industriais e vazamentos em postos de combustível. Soma-se a esse cenário o fato de que a água do aquífero é utilizada pelo município de Rio Claro para abastecimento (Oliva et al., 2010).

Desse modo, é de grande importância que as áreas de recarga do aquífero e as camadas superficiais de solo sejam preservadas. Santos (2012) afirma que essas camadas, aliadas à vegetação, funcionam como um selo, dificultando a passagem de fluidos para as camadas mais profundas, onde geralmente os aquíferos se localizam. No caso das camadas superficiais de solo da Formação Rio Claro e seu aquífero associado, isso se torna ainda mais importante, visto que qualquer problema na qualidade da água do aquífero será refletido diretamente na saúde de parte da população, que utiliza suas águas. Um problema desse tipo também afetaria as áreas de recarga do Rio Corumbataí e do Ribeirão Claro, que são as principais drenagens superficiais que cortam o município, usadas para abastecimento público.

A realização de ensaios geotécnicos, tanto *in situ* como em laboratório, para o estudo das camadas superficiais de solo tem como propósito a obtenção de parâmetros físicos e de características do material a ser estudado. De acordo com Nogueira et al. (1981), a confiabilidade desses ensaios depende da qualidade e da representatividade das amostras retiradas, tomando os cuidados necessários durante sua coleta.

O principal objetivo do presente artigo foi o estudo da vulnerabilidade das camadas superficiais do perfil de alteração da Formação Rio Claro na porção norte da Sub-Bacia Hidrográfica do Ribeirão Claro, município de Rio Claro, centro do estado de São Paulo, pela integração das características geológico-geotécnicas e do uso e ocupação do solo.

ÁREA DE ESTUDO

Aspectos gerais

A área de estudo localiza-se na porção norte da Bacia Hidrográfica do Ribeirão Claro, de sua nascente até a captação da Estação de Tratamento de Água I (ETA I) do município de Rio Claro, no estado de São Paulo (Figura 1). A área compreende as folhas Rio Claro (SF-23-M-I-4), Corumbataí (SF-23-Y-A-I-2) e Araras (SF-23-M-II-3), entre as coordenadas UTM 234.500 e 246.000 m E e 7.519.500 e 7.542.000 m N. A Bacia Hidrográfica do Ribeirão Claro é uma das cinco sub-bacias que formam a Bacia do Rio Corumbataí, que por sua vez é uma sub-bacia para o Rio Piracicaba.

O município de Rio Claro possui área de pouco mais de 498 km², com população de aproximadamente 202 mil habitantes — segundo estimativa do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE) para 2017 — e densidade demográfica de 373 habitantes/km² (IBGE, 2010). O município faz divisa a sul com Piracicaba, a sudeste com Santa Gertrudes; a leste faz divisa com Araras, e Leme a nordeste; a norte, noroeste e oeste, o município de Rio Claro faz divisa com Corumbataí, Itirapina e Ipeúna, respectivamente.

Rio Claro localiza-se a 176 km da cidade de São Paulo, por meio das BR-050 e BR-364. As principais vias de acesso para o município são a SP-191, que na direção oeste liga Araras, Rio Claro e Ipeúna; as rodovias SP-310 e SP-316 para Santa Gertrudes e Cordeirópolis (direção sudeste); e SP-127, na direção sul, para Piracicaba.

Aspectos geológicos

A área de estudo encontra-se na porção leste da Bacia do Paraná, representada na região pelas formações Corumbataí, Piramboia e Rio Claro, além de intrusões de diabásio correlatas à Formação Serra Geral.

A porção inferior da Formação Corumbataí (Permiano) teve sua deposição em ambiente marinho com águas gradativamente mais rasas em condições redutoras, enquanto sua porção superior foi depositada em um ambiente mais raso, oxidante e com influência de marés (Zaine, 1994). Em sua maioria, a unidade é composta por siltitos arroxeados e marrom-avermelhados, com intercalações de arenitos finos amarelados, calcarenitos e camadas lamíticas. Em menor escala, coquinas e silexitos podem ser encontrados (Brito e Bertini, 1982; Schneider et al., 1974; Zaine, 1994).

A Formação Piramboia (Triássico) é formada por arenitos finos a médios, amarelados, esbranquiçados e avermelhados, com estratificações cruzadas. Há ainda intercalações com

siltitos e argilitos e alguns níveis conglomeráticos (Zaine, 1994). De acordo com Brighetti e Caetano-Chang (1995a, 1995b), a deposição da Formação Piramboia se deu por sistemas fluviais com influência eólica crescente ao topo da unidade, o que indica um paleoambiente cada vez mais árido. Para Dias (2006), a deposição da formação ocorreu através de lençóis de areia eólicos, sucedidos pela formação de dunas e interdunas.

As soleiras e diques de diabásio presentes na área de estudo são correlatos à Formação Serra Geral (Cretáceo), tendo sido intrudidas em falhamentos e juntas, presentes nas rochas da Bacia do Paraná. A Formação Serra Geral é composta de espessos derrames de basaltos toleíticos com coloração cinza escuro a pretos, comumente com amígdalas formadas por escape de gases nas porções mais superiores da unidade (Cordani e Vandroos, 1967).

Para Perinotto et al. (2006) e Zaine (1994), a Formação Rio Claro (Quaternário) é predominantemente formada por arenitos mal consolidados com coloração esbranquiçada, amarelada e rósea, com intercalações de argilitos e níveis conglomeráticos em sua base. A deposição dessa unidade ocorreu principalmente em ambiente fluvial, com as camadas de conglomerados na base da unidade depositadas através de leques aluviais. As camadas de argila mais expressivas, de acordo com Zaine (1994) teriam se formado pela ocorrência de lagoas.

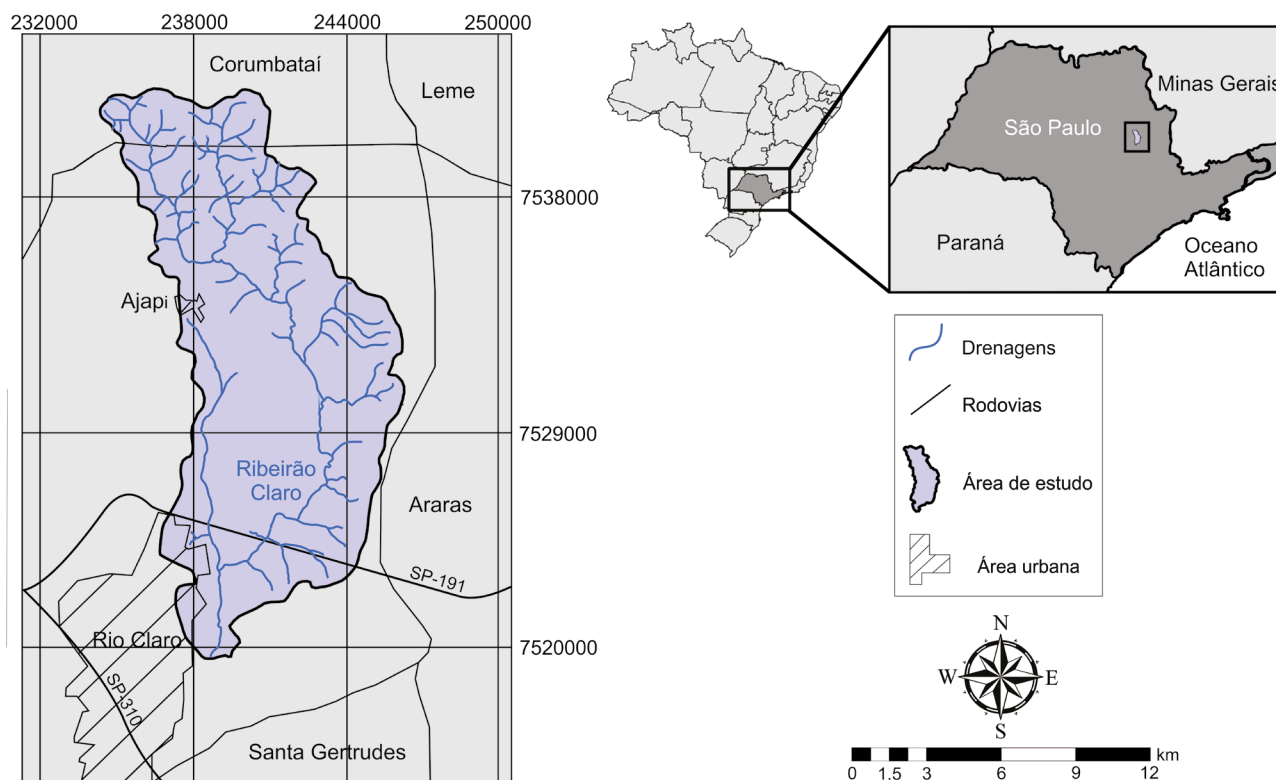


Figura 1. Localização da área de estudo.

MATERIAIS E MÉTODOS

Materiais

Neste artigo, foram utilizadas folhas topográficas do IBGE na escala 1:50.000: Corumbataí (SF-23-Y-A-I-2), Leme (SF-23-Y-A-II-1), Araras (SF-23-M-II-3) e Rio Claro (SF-23-M-I-4). Também foram utilizados mapas geológicos do Instituto Geológico (IG) das folhas Corumbataí (IG, 1984), Leme (IG, 1980), Araras (IG, 1987) e Rio Claro (Zaine, 1994). Para a realização dos ensaios geotécnicos *in situ* e em laboratório, foram utilizados: trado manual, permeâmetro de Guelph, amostrador e anéis para coleta de solo indeformado, balança de precisão, cápsulas metálicas, bquer de 500 mL, balão volumétrico de 1 L, bomba de vácuo, bateria de peneiras, provetas graduadas de 1 L e placas de Petri.

Etapas da pesquisa

Levantamento bibliográfico e cartográfico

Durante essa primeira etapa, foram feitas buscas de teses, dissertações e trabalhos acadêmicos em bancos de dados bibliográficos de universidades, tais como Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho” (UNESP), Universidade de São Paulo (USP), Universidade Estadual de Campinas (UNICAMP), dentre outras; e também em sites especializados, para obtenção de artigos e relatórios técnicos nacionais e internacionais com relação à temática do artigo. Para isso, foram utilizadas as palavras-chave: “Rio Claro”, “aquíferos” e “ensaios geotécnicos”.

A base cartográfica, por sua vez, foi obtida por meio de *download* no banco de dados do IBGE.

Confecção da base cartográfica, mapa geológico e de uso e ocupação do solo

Inicialmente, as cartas topográficas e os mapas geológicos foram georreferenciados no *software* ArcGIS 10.4.1, utilizando quatro pontos de controle para cada arquivo. Adotou-se o Datum SIRGAS 2000 neste artigo.

Em seguida, os dados vetoriais das cartas topográficas do IBGE foram exportados para o formato *shapefile* e, ainda no *software* ArcGIS 10.4.1, foram extraídos os dados referentes às curvas de nível, drenagens, lagos, represas, rodovias e limites urbanos.

Em relação ao mapa geológico, os dados como as estruturas e os contatos entre as unidades na área de estudo foram extraídos dos mapas geológicos do Instituto Geológico (1980, 1984, 1987) e de Zaine (1994), também tendo sido exportados para o formato *shapefile*.

O mapa de uso e ocupação dos solos foi confeccionado utilizando imagens de satélite obtidas com o *software* Google

Earth Pro 7.1. As seguintes classes de uso e ocupação foram definidas para a área: cultura perene, cultura sazonal, mineração, área industrial, área residencial, mata, campo sujo, pastagem e lagoa/represa.

Tanto no mapa geológico quanto no de uso e ocupação dos solos, optou-se por delimitar uma área maior do que apenas a porção norte da Bacia Hidrográfica do Ribeirão Claro, no intuito de contextualizar melhor as unidades geológicas e o uso do solo na região, incluindo grande parte da área urbana de Rio Claro.

Mapa de vulnerabilidade à contaminação

Para o mapa de vulnerabilidade à contaminação da Formação Rio Claro, foram utilizados os mapas geológico e de uso e ocupação dos solos. Primeiramente, converteu-se, no ArcGis® 10.4.1, os dois mapas para o formato *raster*, com a utilização da ferramenta *polygon to raster*. Posteriormente foi utilizada a ferramenta *reclassify*, que permitiu que fosse atribuído, para cada unidade geológica ou classe de uso e ocupação do solo, um valor ou peso relacionado à sua vulnerabilidade à infiltração de contaminantes, definidos nas Tabelas 1 e 2, respectivamente.

Os critérios utilizados para definir a vulnerabilidade intrínseca para cada unidade geológica estão ligados, principalmente, à sua permeabilidade, reflexo da composição dos seus litotipos, e foi obtida inicialmente por dados bibliográficos. A Formação Corumbataí, por exemplo, é composta basicamente por argilitos e siltitos, que dificultam a passagem de fluidos, tendo, portanto, baixa permeabilidade. Seguindo essa lógica, as formações Rio Claro e Piramboia

Tabela 1. Relação entre o peso das classes de vulnerabilidade e a unidade geológica.

Peso das classes em relação à sua vulnerabilidade	Unidade geológica
1 - Baixa	Corumbataí
2 - Média	Serra Geral
3 - Alta	Rio Claro; Piramboia
4 - Muito alta	Depósitos aluvionares

Tabela 2. Relação entre o peso das classes de vulnerabilidade e o uso e ocupação do solo da área.

Peso das classes em relação à sua vulnerabilidade	Uso e ocupação do solo
1 - Baixa	Campo sujo; mata nativa
2 - Média	Pastagem
3 - Alta	Cultura perene; cultura sazonal; lagoa/represa; área residencial
4 - Muito alta	Mineração; área industrial

foram definidas como de alta vulnerabilidade intrínseca, por serem compostas, em sua maioria, por arenitos, refletindo em perfis de solo mais arenosos. Os depósitos aluvionares, por serem formados por material inconsolidado, foram definidos como possuindo alta vulnerabilidade. Por fim, foi atribuída vulnerabilidade média para as soleiras e os diques de diabásio da área, por formarem solos argilosos e de baixa permeabilidade, mas ao mesmo tempo possuírem fraturas que permitem a percolação de fluidos.

Em relação ao uso e ocupação dos solos, o principal fator utilizado para definir a vulnerabilidade de classe foi a interferência humana, ou seja, a presença de possíveis contaminantes presentes em cada atividade, e a retirada de vegetação nativa. O grau baixo de vulnerabilidade foi dado às áreas de mata e de campo sujo (vegetação herbácea e/ou arbustiva de pequeno porte e espaçada entre si), por não possuírem intervenção humana intensa. As áreas de pastagem, apesar de terem sofrido com a retirada da mata nativa, acabam por utilizar pouco ou nenhum agrotóxico, sendo assim, definidas como de média vulnerabilidade. Áreas de plantação perene e sazonal foram definidas como de alta vulnerabilidade pelo uso, em maior ou menor grau, de agrotóxicos. As áreas residenciais e de lagoa/represa, por apresentarem atividade humana intensa, além de despejo de lixo e vazamentos, também foram definidas como áreas de alta vulnerabilidade. Mineração e áreas industriais, por comumente utilizarem substâncias altamente contaminantes ao meio, foram definidas como áreas de vulnerabilidade muito alta.

Obteve-se como produto um mapa de vulnerabilidade a contaminantes para as formações geológicas e outro para as classes de uso do solo. Com a ferramenta *weighted overlay* foi possível sobrepor tais mapas, colocando pesos de 50% para cada um, resultando em um mapa de vulnerabilidade final, que correlaciona as informações presentes nesses dois mapas. O resultado final dessa correlação foi baseado nos pesos adotados para cada um dos mapas iniciais, como apresentado nas Tabelas 1 e 2.

A confecção do mapa de vulnerabilidade à contaminação teve o intuito de definir, dentro da área de estudo, áreas mais interessantes e com maior grau de vulnerabilidade com base nos critérios definidos no artigo e prioritárias para a realização de estudos mais detalhados, com a finalidade de permitir ações de planejamento territorial relativas à conservação da qualidade das águas desse importante aquífero para o município de Rio Claro.

Ensaio geotécnicos in situ

Os ensaios geotécnicos foram realizados primeiramente *in situ*, com a utilização do permeâmetro de Guelph, para se obter os valores de condutividade hidráulica dos solos da Formação Rio Claro, na área de estudo.

Inicialmente, com a utilização do trado manual, foi formado um furo com a retirada de aproximadamente 70 cm de solo, onde o permeâmetro foi inserido. Dependendo do tipo de solo, deve-se optar por um dos dois reservatórios do permeâmetro, sendo que o de maior volume é para solos arenosos, e o menor, para solos argilosos e de menor permeabilidade. Depois da averiguação do tipo de solo e de qual reservatório deve ser utilizado, uma válvula foi aberta, permitindo que a água infiltrasse no solo. Foi necessário um tempo para que o fluxo de água se estabilizasse para um valor regular. Quando o fluxo se estabilizou, foi iniciada a medição do volume de água que infiltrava no solo, pela diminuição de dado volume no reservatório. Foram definidos intervalos regulares para a medição, baseando-se no tipo de solo.

Todos os dados obtidos foram registrados em uma tabela no *software* Microsoft Excel, que fornece o valor da condutividade hidráulica a partir das Equações 1 e 2.

$$K = [(0,0041) \times (X) \times (R_2) - (0,0054) \times (X) \times (R_1)] \quad (1)$$

$$K = [(0,0041) \times (Y) \times (R_2) - (0,0054) \times (Y) \times (R_1)] \quad (2)$$

Em que:

K = condutividade hidráulica (cm/s);

R₁ e R₂ = taxas de infiltração estabilizadas correspondentes a H1 (x cm) e H2 (y cm) respectivamente (cm/s);

X e Y = constantes correspondentes à área do tubo (reservatório de água) utilizado (cm³).

Ensaio geotécnicos em laboratório

O ensaio geotécnico para obtenção de índices físicos foi realizado seguindo a norma NBR 6458:2016, versão corrigida 2:2017, da Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT). Para uma melhor representatividade, o ensaio foi feito com três amostras para cada ponto de coleta.

Os dados obtidos nesse ensaio também foram registrados em uma tabela do Microsoft Excel. A partir desses dados, os índices físicos de cada amostra puderam ser calculados. Dentre eles, foram obtidos os índices de vazios, porosidade, grau de saturação, massa específica seca e massa específica dos sólidos.

O ensaio de granulometria e sedimentação foi realizado com base na norma NBR 7181:2016, versão corrigida 2:2018, da ABNT. O ensaio foi realizado em diversas etapas, sendo a amostra inicialmente misturada com 125 mL de uma solução de água e 45,7 g de hexametáfosfato de sódio, que serve como defloculante, ajudando na separação dos grãos e na posterior lavagem em peneira de 270 mesh, com abertura de 0,053 mm. O intuito da realização dessas etapas é de separar, da melhor maneira possível, a fração areia do material mais fino, composto por silte e argila. O material de maior granulometria, retido na peneira, foi separado e colocado para secar em estufa.

Para o ensaio de granulometria, o material já seco foi colocado em uma bateria de peneiras, seguindo a norma NBR NM ISO 3310-1:2010 da ABNT, com seus diâmetros de abertura indicados na Tabela 3. Para uma melhor separação dos grãos, a bateria de peneiras foi colocada em uma mesa vibratória por 15 minutos. Após esse tempo, o material retido em cada peneira foi pesado e registrado em uma planilha do Microsoft Excel.

Para o ensaio de sedimentação foram utilizadas provetas graduadas de 1 L com a solução formada por defloculante + finos + água. Inicialmente, o material foi agitado por dois minutos para sua homogeneização completa na proveta. Em seguida, foi colocado um densímetro incolor calibrado para 1 g/cm^3 à temperatura de 20°C , em intervalos pré-definidos de 2, 4, 8, 15, 30, 60, 120, 240 e 480 minutos, possibilitando a medida da densidade do material em suspensão em cada um desses momentos. A densidade de uma solução com apenas água e defloculante foi também obtida ao mesmo tempo, já que o defloculante altera o valor real da densidade, e isso deve ser corrigido posteriormente no cálculo final. Esses valores de densidade foram colocados na mesma tabela do Microsoft Excel que os dados do ensaio de granulometria, juntamente com a temperatura da solução no momento e a altura de queda, que é a diferença entre a superfície da água e uma marca no densímetro.

Com os dados obtidos nos ensaios geotécnicos de granulometria e sedimentação foi possível criar curvas granulométricas para cada amostra de solo da Formação Rio Claro através do *software* Grapher 12.

RESULTADOS

Mapa de vulnerabilidade à contaminação

No mapa de vulnerabilidade, nota-se que a Formação Rio Claro, em sua maioria, é representada pela cor laranja, indicando alta vulnerabilidade, o que já era esperado devido à

Tabela 3. Identificação e diâmetro das peneiras utilizadas.

Malha (#)	Diâmetro (mm)
4	4,76
10	2,00
16	1,19
30	0,59
40	0,42
50	0,297
60	0,250
100	0,149
200	0,074
270	0,053
Prato	< 0,053

alta condutividade hidráulica do solo, no geral. Aliado a isso, há também o fato de que, por serem regiões de topo e mais planas, os solos nessa unidade são utilizados, principalmente, para plantações sazonais, como a cana-de-açúcar, de alta vulnerabilidade. Junto às plantações sazonais, as plantações perenes ocupam a maior parte da área de estudo, como pode ser observado no mapa de uso e ocupação do solo (Figura 2), sendo que essas áreas também ficaram representadas como tendo alta vulnerabilidade, já que ambos os tipos de plantação fazem uso de agrotóxicos.

Por fim, a cidade de Rio Claro, que está quase em sua totalidade sobre a unidade geológica homônima, também oferece riscos ao aquífero por eventuais vazamentos e despejo de lixo e resíduos, reflexo da intensa atividade humana, fato que pode ser observado pelas diversas ocorrências de áreas contaminadas, plotadas tanto no mapa de uso e ocupação quanto no mapa de vulnerabilidade a contaminantes.

Localizada a norte da cidade, a área industrial de Rio Claro também se encontra sobre a Formação Rio Claro (Figura 3), porém, como essa classe de uso e ocupação foi definida como possuindo vulnerabilidade muito alta, devido aos tipos de produtos utilizados pela atividade, e sempre havendo o risco de vazamentos, essa área ficou representada com a cor vermelha no mapa, indicando uma vulnerabilidade à contaminação superficial muito alta.

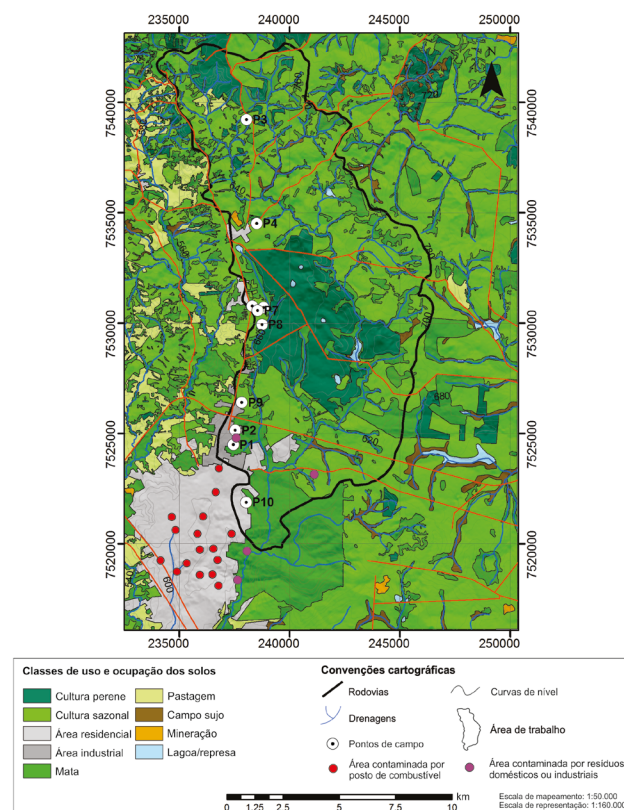


Figura 2. Mapa de uso e ocupação dos solos.

Os resultados obtidos no mapa de vulnerabilidade a contaminantes (Figura 4) para a Formação Rio Claro apresentam resultados semelhantes ao mapa das áreas potencialmente críticas para a utilização das águas subterrâneas do estado de São Paulo, disponibilizado na Resolução da Secretaria de Estado do Meio Ambiente nº 14, do dia 06 de março de 2010, que define a área do Aquífero Rio Claro como de alta vulnerabilidade.

Outro trabalho que apresenta resultados semelhantes é o de Zanetti (2012), que na utilização do método GOD (*Groundwater occurrence, Overall aquifer class and Depth to groundwater table*), define o Aquífero Rio Claro como de alta vulnerabilidade e com pequenas áreas de baixa ou extrema vulnerabilidade. Na aplicação do método DRASTIC (*Depth to groundwater, Recharge, Aquifer characteristic, Soil media, Topography, Impact of the insaturate zone, Conductivity hydraulic*) a autora obteve resultados um pouco diferentes, pois o aquífero, em sua maioria, foi classificado como de baixa a média vulnerabilidade.

As outras áreas em laranja do mapa estão também associadas a solos mais arenosos e porosos, como no caso dos depósitos aluvionares no entorno de algumas drenagens, e na Formação Piramboia, nas regiões norte e sudeste do mapa. Nos depósitos aluvionares, vale notar, são observadas várias áreas em vermelho, o que indica que junto a esses sedimentos inconsolidados, e aqui definidos como

possuindo alta vulnerabilidade, o solo é utilizado em atividades de alto risco, como as plantações sazonais e perenes. Essa situação, devido ao uso de produtos químicos, pode ser bastante perigosa aos rios da região, principalmente em trechos do Ribeirão Claro e do Rio Corumbataí. Áreas definidas no mapa de uso e ocupação do solo como sendo de mineração, e associadas com a Formação Rio Claro, ficaram vermelhas pelo alto risco associado, pois comumente expõem o lençol freático ao ar livre.

As áreas em amarelo do mapa, de média vulnerabilidade, estão em sua maioria associadas à Formação Corumbataí e a intrusões de diabásio, de baixa e média vulnerabilidade, respectivamente. Apesar de serem intensamente utilizadas para plantação perene e sazonal, de alta vulnerabilidade, os solos argilosos de ambas as formações não favorecem a infiltração, portanto, essas áreas foram definidas como de média vulnerabilidade.

Não muito comuns dentro da porção estudada da Bacia Hidrográfica do Ribeirão Claro, as áreas de pastagens e de lagoas/reservas tiveram um resultado bastante variado no mapa de vulnerabilidade, indo desde áreas de baixa vulnerabilidade a de alta, sendo que isso está ligado à unidade geológica em que ocorrem.

Com baixa vulnerabilidade, as áreas verdes do mapa são representadas pelas regiões de mata nativa e campo sujo, onde a ausência de atividade humana apresenta baixos riscos.

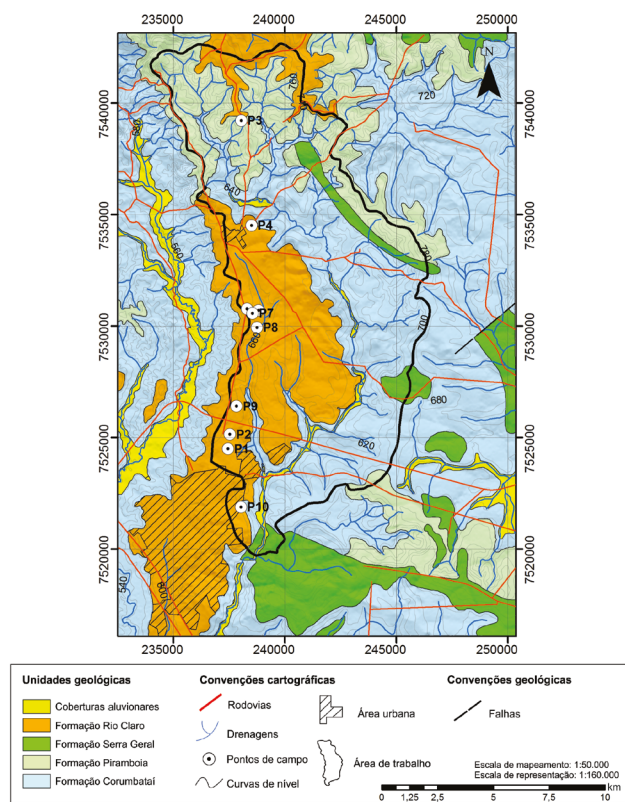


Figura 3. Mapa geológico.

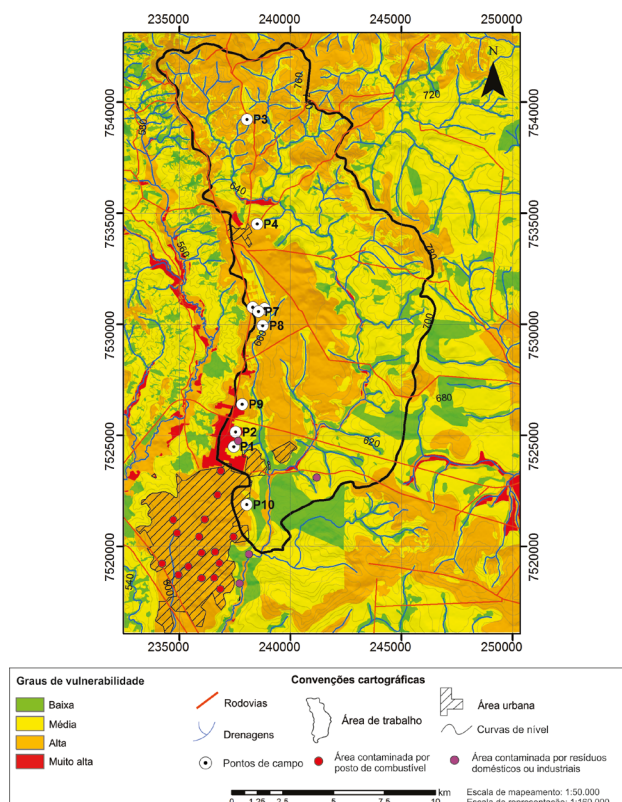


Figura 4. Mapa de vulnerabilidade.

Perfis de solo

Observou-se na Formação Rio Claro, em geral, solos de coloração marrom-avermelhado areno-argilosos (Figura 5), sendo que a quantidade de argila e areia em cada ponto se mostrou

variável. O solo encontrado é semelhante aos descritos na bibliografia, como no caso de Zaine (1994), que descreve o material como um Latossolo vermelho-amarelo areno-argiloso, e de Perinotto et al. (2006), que descreve o solo da formação como arenoso, de espessura métrica e coloração amarronzada.

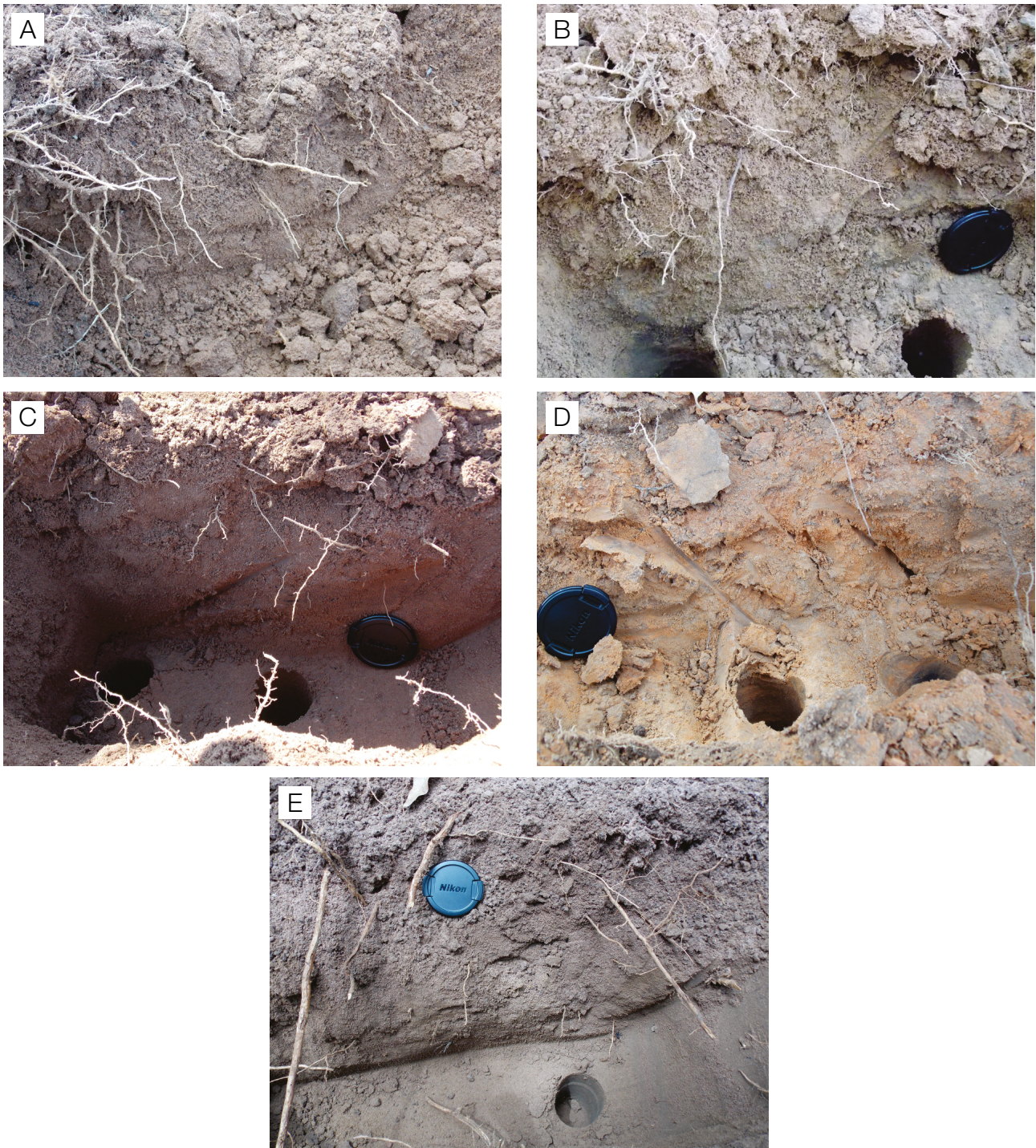


Figura 5. Perfis de solo da Formação Rio Claro. As fotografias são correspondentes aos pontos P1 em A, P2 em B, P3 em C, P4 em D e P6 em E.

Através das perfurações realizadas com o trado manual para a colocação do permeâmetro de Guelph, notou-se que os solos da Formação Rio Claro, na área de estudo, possuem espessuras superiores a um metro e não foram encontrados vestígios de rocha, na espessura trabalhada. Além disso, os perfis se mostravam, em sua maioria, homogêneos, com exceção nas camadas mais superficiais do perfil, que geralmente se apresentavam mais escuras devido à matéria orgânica presente. Além disso, as camadas superiores geralmente apresentam maior interferência de atividades antrópicas, como agricultura ou movimentação de terra devido à construção de estradas ou loteamentos, aumentando a compactação e reduzindo a permeabilidade.

Condutividade hidráulica

Os resultados de condutividade hidráulica obtidos com o permeâmetro de Guelph para a Formação Rio Claro foram variados, partindo de $1,49 \times 10^{-4}$ até $6,645 \times 10^{-3}$ cm/s (Tabela 4). Essa grande variação se deve ao fato de a unidade, apesar de composta de arenitos em sua maioria, possuir intercalações com camadas de argilitos, refletindo em perfis de solo no geral arenosos, mas com porções mais ou menos argilosas, ocasionando variações dos valores de condutividade hidráulica, pelo fato da presença de material impermeável.

Como comparação, Rollo (2012), utilizando o método dos cilindros concêntricos para encontrar a condutividade hidráulica da Formação Rio Claro, utilizou o valor

de $7,78 \times 10^{-3}$ cm/s como valor médio para encontrar a velocidade que um fluido demoraria para se infiltrar desde a superfície até o nível freático. Levando em conta que esse é o valor médio adotado, os valores de condutividade hidráulica encontrados pelo autor foram muito superiores aos encontrados neste artigo, o que pode ser explicado pelas grandes variações laterais em relação à variação composicional que os solos da Formação Rio Claro possuem.

Também utilizando o permeâmetro de Guelph, e em uma área aproximadamente a mesma, Oliva (2006) obteve valores mais próximos aos obtidos neste artigo. No trabalho da autora, o valor da condutividade hidráulica na Formação Rio Claro variou entre $1,23 \times 10^{-5}$ e $1,17 \times 10^{-2}$ cm/s. Tais resultados corroboram a ideia da grande variação da condutividade hidráulica na Formação Rio Claro, sendo que a autora obteve variações ainda maiores, por trabalhar em uma área mais ampla e com maior número de ensaios.

Índices físicos

Neste artigo foram obtidos os seguintes índices físicos: teor de umidade, massa específica seca, massa específica dos sólidos, índices de vazios, porosidade e grau de saturação (Tabela 5). Os valores apresentados aqui são uma média das três amostras obtidas em cada ponto.

Os valores dos índices físicos obtidos ajudam a explicar a grande diferença na condutividade hidráulica nos solos da Formação Rio Claro, já que alguns deles, como os índices de vazios, porosidade, teor de umidade e grau de saturação, são diretamente relacionados à condutividade hidráulica. Notou-se que, quanto maior a condutividade hidráulica no solo, o índice de vazios e a porosidade também são maiores, visto que quando mais poroso for o solo, mais rápida e fácil é a infiltração de fluidos. Outro fator importante, e que deve ser levado em conta, é que os graus de saturação e umidade foram menores à medida que a condutividade hidráulica do solo aumentou, o que pode ter facilitado a capacidade do solo em permitir a percolação de fluidos.

Como exemplo disso, o ponto P2, que possui o menor valor de condutividade hidráulica medido na área, com $1,49 \times 10^{-4}$ cm/s, possui valores de umidade, índice de vazios, porosidade e grau de saturação baixos. De modo contrário, no ponto P4, com condutividade hidráulica de

Tabela 4. Valores de condutividade hidráulica obtidos.

Ponto	Valor de condutividade hidráulica (cm/s)
P1	0,003111
P2	0,000149
P3	0,002055
P4	0,006645
P5	0,001233
P6	0,005342
P7	0,001808
P8	0,005031
P9	0,001708
P10	0,000986

Tabela 5. Valores de índices físicos obtidos.

Ponto	P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7	P8	P9	P10
Teor de umidade (%)	11,21	12,23	10,51	5,82	8,53	9,71	9,93	8,34	9,91	9,70
Massa específica seca (g/cm ³)	1,65	1,73	1,64	1,59	1,52	1,63	1,74	1,69	1,68	1,67
Massa específica dos sólidos (g/cm ³)	2,64	2,64	2,64	2,64	2,64	2,63	2,63	2,64	2,64	2,64
Índice de vazios	0,58	0,52	0,60	0,65	0,82	0,60	0,50	0,55	0,57	0,57
Porosidade (%)	37,33	34,30	37,60	39,48	45,12	37,66	33,53	35,88	36,35	36,54
Grau de saturação (%)	49,66	61,86	46,39	23,61	28,86	42,36	51,78	39,31	45,88	44,49

$6,645 \times 10^{-3}$ cm/s, os valores dos mesmos índices físicos são visivelmente mais elevados, o que ajuda a explicar o contraste de condutividade hidráulica.

Granulometria e sedimentação

As amostras de solo da Formação Rio Claro apresentaram leves diferenças em suas curvas granulométricas (Figura 6). Isso se deve, principalmente, às variações em quantidades de argila e areia.

De uma maneira geral, esses solos podem ser classificados como sendo bem selecionados, apresentando altos valores da fração areia, responsável por 70 a 85% do volume total dos sólidos. A quantidade de argila ficou abaixo dos 15%, com exceção apenas da amostra P2, que chega a quase 20%, e que ajudaria, junto aos índices físicos, a explicar o valor baixo de condutividade hidráulica obtido nesse ponto.

As curvas granulométricas que não apresentam a fração de argila e silte são referentes às amostras em que não foi realizado o ensaio de sedimentação, por apresentarem pouca quantidade de finos e, desse modo, nessas amostras apenas o ensaio de granulometria, realizado com a fração areia, foi representado nas curvas.

CONCLUSÃO

A metodologia do presente artigo demonstrou ser de simples aplicação e pouco dispendiosa em termos financeiros, podendo ser usada na avaliação preliminar de áreas municipais em termos de vulnerabilidade à contaminação.

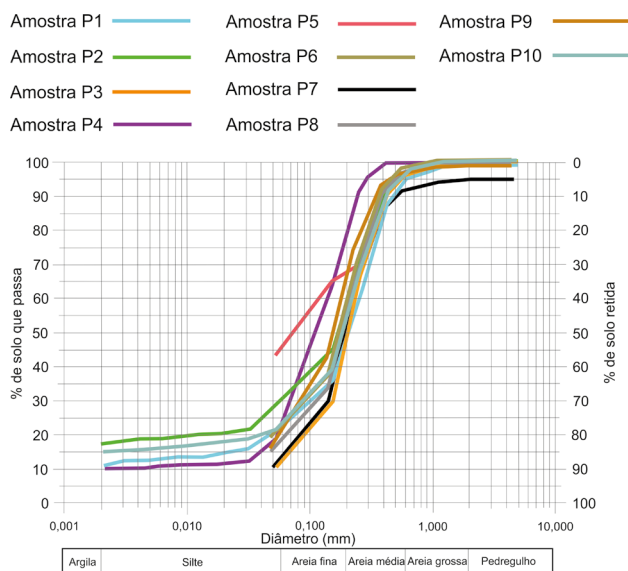


Figura 6. Curvas granulométricas obtidas para os solos da Formação Rio Claro.

O mapa de vulnerabilidade à contaminação demonstrou que a expansão territorial do município de Rio Claro foi mal conduzida, sem uma avaliação pretérita dos atributos associados à contaminação de aquíferos, conduzindo à implantação de um distrito industrial em área de recarga do Aquífero Rio Claro e a montante das principais fontes de captação de água para abastecimento público. Desse modo, o mapa de vulnerabilidade à contaminação elaborado demonstra as áreas onde devem ser priorizadas ações de conservação da qualidade das águas.

Os resultados dos ensaios com o permeâmetro de Guelph se mostraram confiáveis e de fácil e rápida aplicação, dando valores de condutividade hidráulica próximos aos observados na bibliografia, citando, como exemplos, os valores encontrados por Rollo (2012), que adotou $7,78 \times 10^{-3}$ cm/s como valor médio para a Formação Rio Claro, e de Oliva (2006), que encontrou valores entre $1,23 \times 10^{-5}$ e $1,17 \times 10^{-2}$ cm/s, mostrando as diferenças nos valores de condutividade hidráulica para a Formação Rio Claro, conforme a localização do perfil de alteração. Esse fato estaria ligado à não homogeneidade dos perfis de alteração dessa unidade, visto que apresentam variações em seus teores de argila e areia, como observado nas curvas granulométricas, que indicaram que em solos mais arenosos e com maior porosidade, os valores de condutividade hidráulica tendem a ser maiores, e o contrário ocorre nos solos mais argilosos, menos porosos e com maiores teores de umidade.

No entanto, é válido notar que alguns fatores podem atrapalhar e alterar os resultados dos ensaios com o permeâmetro de Guelph, entre eles, as diferenças texturais e estruturais do solo da superfície e em profundidade, além do fato de que a influência de raízes e escavações de insetos e outros animais podem alterar para mais o valor de condutividade hidráulica obtido, pois agem como um conduto para os fluidos. A própria escavação do furo para a realização do ensaio, se mal realizada, pode compactar o solo em volta, dificultando a infiltração de água.

Os ensaios geotécnicos de laboratório, além de serem utilizados para uma caracterização mais completa do solo, são essenciais para o entendimento dos resultados de condutividade hidráulica, já que estão diretamente ligados à granulometria e aos índices físicos como a porosidade e a saturação do solo, por exemplo.

Baseando-se na localização da Formação Rio Claro, próxima à área urbana e às fontes de contaminantes, e nos resultados de condutividade hidráulica obtidos, no geral altos, mesmo que com valores variados, é necessário salientar que a unidade geológica e seu aquífero associado estão em área de risco com relação à infiltração de fluidos contaminantes, o que sem dúvida pode se

tornar um problema para a parte da população que o utiliza diariamente.

Levando em conta que o foco deste artigo se deu apenas em estudar as camadas mais superficiais do manto de alteração da Formação Rio Claro, a metodologia empregada se mostrou adequada, tanto no tipo de coleta de amostras quanto no emprego dos ensaios geotécnicos em si.

REFERÊNCIAS

- Associação Brasileira de Águas Subterrâneas (ABAS). (2005). *Águas subterrâneas, o que são*. Disponível em: <<http://www.abas.org/educacao.php#ind21>>. Acesso em: 28 maio 2015.
- Braga, A. C. O. (2008). Estimativa da Vulnerabilidade Natural de Aquíferos: Uma Contribuição a Partir da Resistividade e Condutância Longitudinal. *Revista Brasileira de Geofísica*, 26(1), 61-68. <http://dx.doi.org/10.1590/S0102-261X2008000100005>
- Brighetti, J. M. P., Caetano-Chang, M. R. (1995a). Aspectos da bimodalidade em sedimentos eólicos da Formação Piramboia. *IV Simpósio de Geologia do Sudeste*. Boletim Resumos, p. 68. Águas de São Pedro: SBG.
- Brighetti, J. M. P., Caetano-Chang, M. R. (1995b). Fácies e Dunas e Lençóis de areia em sedimentos da Formação Piramboia na região de Rio Claro - SP. *IV Simpósio de Geologia do Sudeste*. Boletim Resumos, p. 67. Águas de São Pedro: SBG.
- Brito, I. M., Bertini, R. J. (1982). Estratigrafia da Bacia do Paraná III: O Grupo Passa Dois. *Anais da Academia Brasileira de Ciências*, 54(2), 460-461.
- Cordani, U. G., Vadoros, P. (1967). Basaltic rocks of the Paraná Basin: Problems in Brazilian gondwana geology. *Boletim Paranaense de Geografia*, 21(22), 207-231.
- Dias, K. D. N. (2006). *Análise Estratigráfica da Formação Piramboia, Permiano Superior da Bacia do Paraná, Leste do Rio Grande do Sul*. Dissertação (Mestrado). Porto Alegre: Instituto de Geociências – UFRGS.
- Foster, S., Hirata, R., Gomes, D., D'Elia, M., Paris, M. (2002). *Groundwater quality protection: a guide for water utilities, municipal authorities, and environment agencies*. Washington: The World Bank.
- Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE). (2010). *Censo demográfico 2010*. Disponível em: <<https://www.ibge.gov.br/estatisticas-novoportal/por-cidade-estado-estatisticas.html?t=destaques&c=3543907>>. Acesso em: 29 maio 2018.
- Instituto Geológico do Estado de São Paulo (IG). (1980). *Formações geológicas de superfície*: Folha Geológica Leme. Escala 1:50.000. São Paulo: IG. SF-23-Y-A-II-1.
- Instituto Geológico do Estado de São Paulo (IG). (1984). *Formações geológicas de superfície*: Folha Geológica Corumbatai. Escala 1:50.000. São Paulo: IG. SF-23-Y-A-I-2.
- Instituto Geológico do Estado de São Paulo (IG). (1987). *Formações geológicas de superfície*: Folha Geológica Araras. Escala 1:50.000. São Paulo: IG. SF-23-M-II-3.
- Kemerich, P. D. C., Silva, J. L. S., Descovi Filho, L. L. V., Volpato, F., Saucedo, E. M. (2011). Determinação da vulnerabilidade natural à contaminação da água subterrânea no bairro Nossa Senhora do Perpétuo Socorro em Santa Maria – RS. *Engenharia Ambiental: Pesquisa e Tecnologia*, 8(3), 85-98.
- Nogueira, J. B., Stancati, G., Vilar, O. M. (1981). *Ensaio de Laboratório em Mecânica dos Solos*. São Carlos: EESC/SGS.
- Oliva, A. (2006). *Estudo Hidrofaciológico do Aquífero Rio Claro no Município de Rio Claro – SP*. Tese (Doutorado). Rio Claro: Instituto de Geociências e Ciências Exatas – UNESP.
- Oliva, A., Chang, H. K., Seixas, W., (2010). Cálculo de Reservas Hídricas Subterrâneas do Aquífero Rio Claro Utilizando Simulação Monte Carlo. *Revista Águas Subterrâneas* 24(1), 13-30. <https://doi.org/10.14295/ras.v24i1.17842>
- Perinotto, J. A. J., Etchebehere, M. L. D. C., Zaine, J. E., Saad, A. R. (2006). Nova Contribuição ao Conhecimento da Formação Rio Claro (T) na Folha Rio Claro (SP). *Geociências*, 25(3), 297-306.
- Ribeira, F. (2004) Calidad, contaminación y protección de acuíferos. *III Curso Hispanoamericano de hidrología subterránea*. Montevideo: IMFIA.
- Rollo, R. T. (2012). *Mapeamento Geoestatístico da Permeabilidade Superficial no Entorno do Ribeirão Claro e Simulação de sua Contaminação*. Trabalho de Conclusão de Curso. Rio Claro: Instituto de Geociências e Ciências Exatas – UNESP.

Santos, A. R. (2012). A enorme importância da camada superficial de solos para a engenharia e a sociedade brasileira. *EcoDebate*. Disponível em: <<https://www.ecodebate.com.br/2012/07/23/a-enorme-importancia-da-camada-superficial-de-solos-artigo-de-alvaro-rodrigues-dos-santos/>>. Acesso em: 7 mar. 2018.

Schneider, R. L., Muhlmann, H., Tomassi, E., Medeiros, R. A., Daemon, R. F., Nogueira, A. A. (1974). Revisão Estratigráfica da Bacia do Paraná. *XXVIII Congresso Brasileiro de Geologia*, Anais, 1, p. 41-66. Porto Alegre: SBG.

Vrba, J., Zaparozec, A. (1994). *Guidebook on mapping groundwater vulnerability*. Hannover: H. Heise.

Vries, J. J., Simmers, I. (2002). Groundwater recharge: An overview of processes and challenges. *Hydrogeology Journal*, 10(1), 5-17. <https://doi.org/10.1007/s10040-001-0171-7>

Zaine, J. E. (1994). *Geologia da Formação Rio Claro na Folha Rio Claro* (SP). Dissertação (Mestrado). Rio Claro: Instituto de Geociências e Ciências Exatas – UNESP.

Zanetti, N. (2012). Estimativa da Vulnerabilidade Natural do Aquífero Livre no Município de Rio Claro (SP). *Revista Brasileira de Geologia de Engenharia e Ambiental*, 3(9), 9-20.