







Sondagens elétricas verticais na cartografia da vulnerabilidade à contaminação do Aquífero Adamantina, em Urânia, São Paulo

Vertical electrical soundings in the mapping of vulnerability to contamination of the Adamantina aquifer in Urânia, São Paulo, Brazil

Marina Fernandes Sanches Barros¹ , Vinicius Hector Abud Louro^{1,2} , Rafael Kenji Terada² ,
Carlos Henrique Gil Marques² , Fernando Augusto Saraiva² , Ricardo Hirata² 

¹Universidade de São Paulo - USP, Instituto de Geociências, Rua do Lago, 562,
Butantã, CEP 05508-080, São Paulo, SP, BR (marinafernandes@usp.br)

²Universidade de São Paulo - USP, Instituto de Geociências, Centro de Pesquisas de Águas Subterrâneas - CEPAS, São Paulo,
SP, BR (vilouro@usp.br; rafael.terada@usp.br; carlos.henrique.marques@usp.br; fasaiva@usp.br; rhirata@usp.br)

Recebido em 14 de agosto de 2020; aceito em 1º de fevereiro de 2021

Resumo

A cidade de Urânia enfrenta problemas de contaminação do Aquífero Adamantina desde a década de 1970, assim como muitas áreas urbanas paulistas. Uma das ferramentas fundamentais para o planejamento territorial é a cartografia da vulnerabilidade à contaminação de aquíferos. Uma das limitações de tal técnica é o difícil acesso ao aquífero, para o estabelecimento dos níveis aquíferos e das características litológicas da zona não saturada. Assim, este trabalho identificou as áreas de recarga do aquífero na região que são mais susceptíveis à degradação antrópica, a partir de uma técnica geofísica de sondagem elétrica vertical. Os resultados foram obtidos por meio das sondagens elétricas verticais e dos poços de monitoramento, e o índice de vulnerabilidade foi definido por meio do parâmetro de condutância longitudinal de Dar Zarrouk, aliado às características do aquífero, como o tipo de aquífero, o nível d'água e a litologia da zona não saturada. A partir do mapa de vulnerabilidade, foi possível indicar a área sudeste da região de estudo como a mais propensa à contaminação em razão do material geológico permeável e da pouca espessura da zona não saturada.

Palavras-chave: Resistividade; Condutância longitudinal; Contaminação de aquífero.

Abstract

The municipality of Urânia has faced problems with contamination of the Adamantina aquifer since the 1970s, as well as many urban areas in São Paulo State. One of the fundamental tools for territorial planning is the mapping of vulnerability to aquifer contamination. One of the limitations of such technique is the difficult access to the aquifer for defining aquifer levels and the lithological characteristics of the unsaturated zone. Thus, the present article identifies the aquifer recharge areas that are most susceptible to anthropogenic degradation, using a geophysical technique of vertical electrical sounding (VES). The results were obtained through VES and shallow monitoring wells. The vulnerability index was defined by the parameter of the longitudinal conductance of Dar Zarrouk, combined with the characteristics of the aquifer. The vulnerability map indicated the southeast study area as the most prone to contamination due to the permeable geological material and the low thickness of the unsaturated zone.

Keywords: Resistivity; Longitudinal conductance; Aquifer contamination.

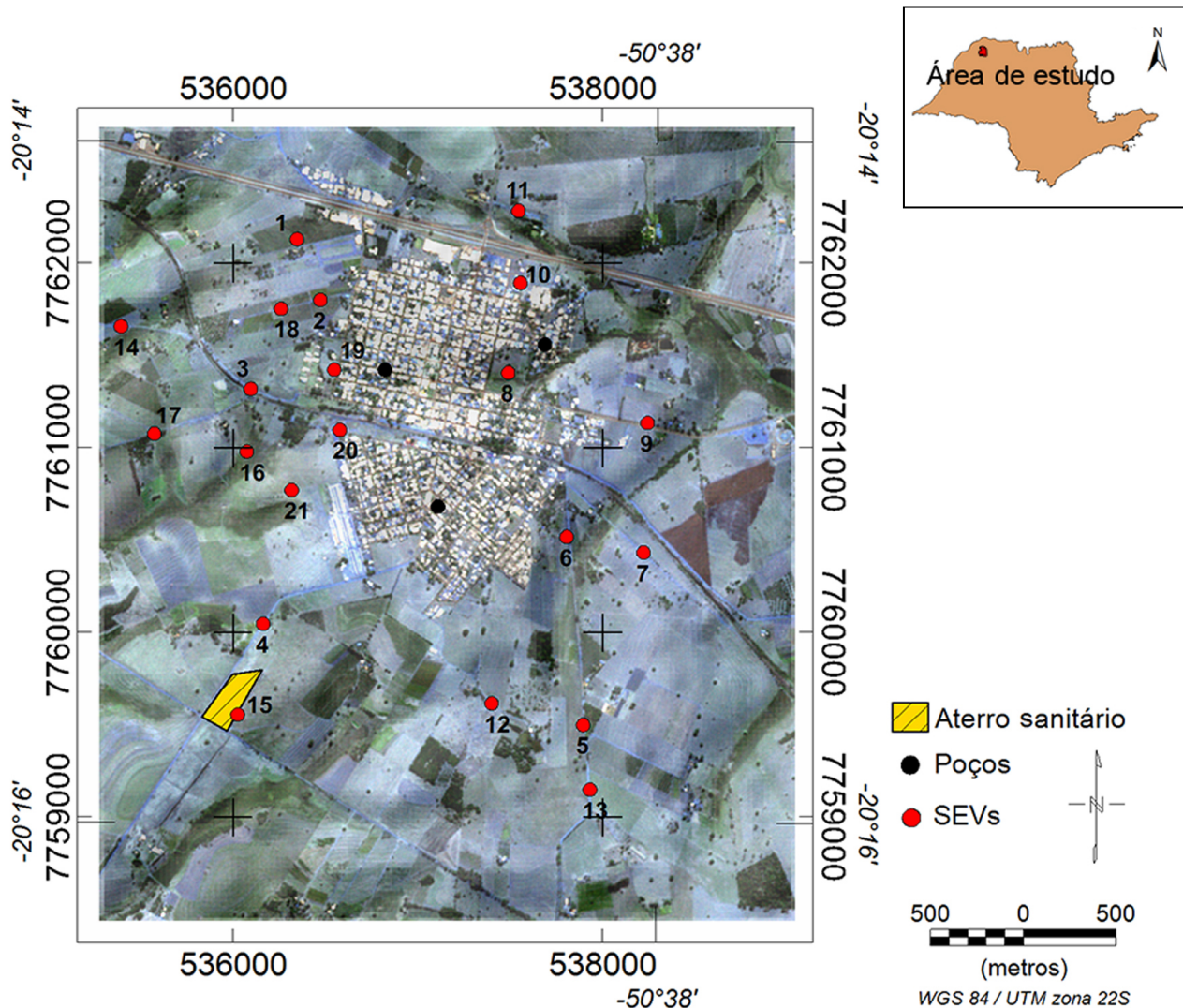
INTRODUÇÃO

A concentração populacional e o conseqüente aumento na produção de resíduos domésticos e industriais são algumas das principais fontes de contaminação do solo e do sistema hídrico. O tratamento inadequado de resíduos e sua deposição incorreta podem levar à infiltração de substâncias contaminantes nos aquíferos, comprometendo a sua qualidade.

Na cidade de Urânia, São Paulo (Figura 1), o Aquífero Adamantina encontra-se contaminado por nitrato nas zonas rasas, até 21 m de profundidade, e nas zonas intermediárias, de 57 a 104 m de profundidade (Cagnon, 2003; Marques et al., 2019) — as maiores concentrações estão localizadas na zona rasa. A pluma contaminante de nitrato se estende por toda

a zona urbana, e em alguns locais, supera $150 \text{ mgL}^{-1} \text{NO}_3^-$. O Ministério da Saúde considera que águas com concentrações maiores que $45 \text{ mgL}^{-1} \text{NO}_3^-$ são impróprias para o consumo humano (Brasil, 2017). Ademais, essa contaminação encontra-se associada a concentrações elevadas de cloreto e outros íons (Cagnon, 2003).

Considerando o crescimento da área urbana de Urânia, assim como as atividades agrícolas na área rural, é de extrema importância avaliar áreas mais susceptíveis à contaminação antrópica. Dessa forma, é possível preservar determinadas regiões frente a atividades potencialmente poluidoras. O termo “vulnerabilidade à contaminação de aquífero” representa o nível de proteção natural relacionado ao acesso hidráulico, à capacidade de atenuação de contaminantes na zona não



SEVs: sondagens elétricas verticais.

Figura 1. Área de estudo, incluindo sombreamento da topografia, localizações de poços sondagens elétricas verticais.

saturada e à produção de um mapa de vulnerabilidade que envolve simplificações das condições geológicas e dos processos hidrológicos (Foster et al., 2013).

Aquisições geofísicas são poderosas ferramentas em projetos ambientais, pela rápida produção de informações, por suas naturezas não invasivas, podendo alcançar grandes profundidades de investigação e um vasto número de medidas em um intervalo reduzido de tempo (Souza e Gandolfo, 2012).

A técnica de sondagem elétrica vertical (SEV) indica contrastes em uma dimensão (vertical) de resistividades elétricas em materiais no meio investigado. Esses contrastes podem estar relacionados às alterações litológicas, às características petrofísicas e à saturação do meio. A variação da saturação de água em uma rocha, por exemplo, tenderá a causar uma redução em sua resistividade elétrica. A partir disso, é possível inferir a profundidade e o nível freático de um aquífero (espessura da camada não saturada), e, desses dados, elaborar um mapa do fluxo das águas subterrâneas.

A resistividade elétrica auxilia na identificação do material geológico, em que os valores indicam áreas com maiores ou menores porcentagens de material permeável (areia). Os materiais mais permeáveis têm menor capacidade de retenção por adsorção de contaminantes (Braga, 2008). A partir da relação entre espessura da camada e sua resistividade, é possível calcular a condutância longitudinal (Orellana, 1972). Esse parâmetro pode ser utilizado na estimativa da vulnerabilidade do aquífero à infiltração de poluentes, visto que, quanto maior a espessura da camada, mais tempo o contaminante leva para chegar ao aquífero. Quando aplicado ao estudo de proteção de aquíferos livres, essa propriedade revelou resultados satisfatórios nos trabalhos de Braga et al. (2006) e Monteiro et al. (2014), nos quais foram identificadas litologias definidas por camadas de argila e areia e indicadas áreas de riscos prováveis de contaminação. Utilizando a condutância longitudinal

aliada às características do aquífero, como o tipo de aquífero, o nível d'água e a litologia da zona não saturada, foi possível construir um mapa de vulnerabilidade para os arredores do núcleo urbano no município de Urânia. Poços de monitoramento da base de dados de Marques et al. (2019) foram utilizados com o objetivo de apurar os resultados obtidos pelo método da resistividade.

CONTEXTO HIDROGEOLÓGICO

A região de estudo está inserida na porção centro-norte da Bacia Vulcano-Sedimentar do Paraná. Essa bacia é caracterizada por uma fossa tectônica no escudo pré-cambriano, preenchida por sedimentos continentais e marinhos da Formação Adamantina, depositados de forma direta e discordante sobre basaltos da Formação Serra Geral (IPT, 1981). A Formação Adamantina pertence ao Grupo Bauru, Cretáceo (Fernandes e Coimbra, 2000), apresenta bancos de arenitos com espessuras variando de 2 a 20 m, granulação fina a muito fina e com estratificações cruzadas. Os arenitos se dispõem intercalados a bancos de lamitos, siltitos e arenitos lamíticos, maciços ou com acamamento plano-paralelo (Soares et al., 1980). Essa formação é a unidade de maior distribuição em superfície no estado de São Paulo, aflorando na cidade de Urânia.

Os sedimentos da Formação Adamantina são compostos de quartzo, feldspato e argilominerais como caulinita, montmorilonita e palygorskita (Brandt Neto, 1984). Análises macroscópicas de amostras coletadas na cidade de Urânia foram descritas como areia fina siltosa a muito argilosa, de cor marrom, variando para tonalidades de vermelho (Almodovar, 2000). Bertolo et al. (2011) elaboraram uma descrição macroscópica do Aquífero Adamantina em relação à profundidade (Tabela 1).

Tabela 1. Descrição macroscópica do Aquífero Adamantina.

Profundidade (m)	Material	Descrição
0,0 – 1,20	Solo – Horizonte A	Areia fina argilosa-siltosa marrom-escura, com matéria orgânica, raízes e macroporos verticais.
1,20 – 4,50	Solo – Horizonte B	Areia fina argilosa-siltosa, marrom-escura a avermelhada do topo para a base. Quantidades de matéria orgânica, raízes e macroporos diminuem do topo para a base.
4,50 – 10	Rocha mãe alterada – Horizonte C	Areia fina argilosa-siltosa, com seixos dispersos de caulinita e laterita. Presença de camadas finas de areia fina a média. A cor varia de avermelhado a vermelho-escuro do topo para a base. A compactação do material geológico aumenta com a profundidade.
Lençol freático 10 – 30 30 – ~100	Arenito	Areia muito fina a fina, bem selecionada e sem cimento carbonático. Areia predominantemente fina, moderadamente selecionada, com intercalações de areia muito fina a média. Cimento de carbonato predominante e, localmente, observa-se a presença de concreções carbonáticas. A cor varia de avermelhado a marrom-arroxeadado.
> ~100	Basalto	

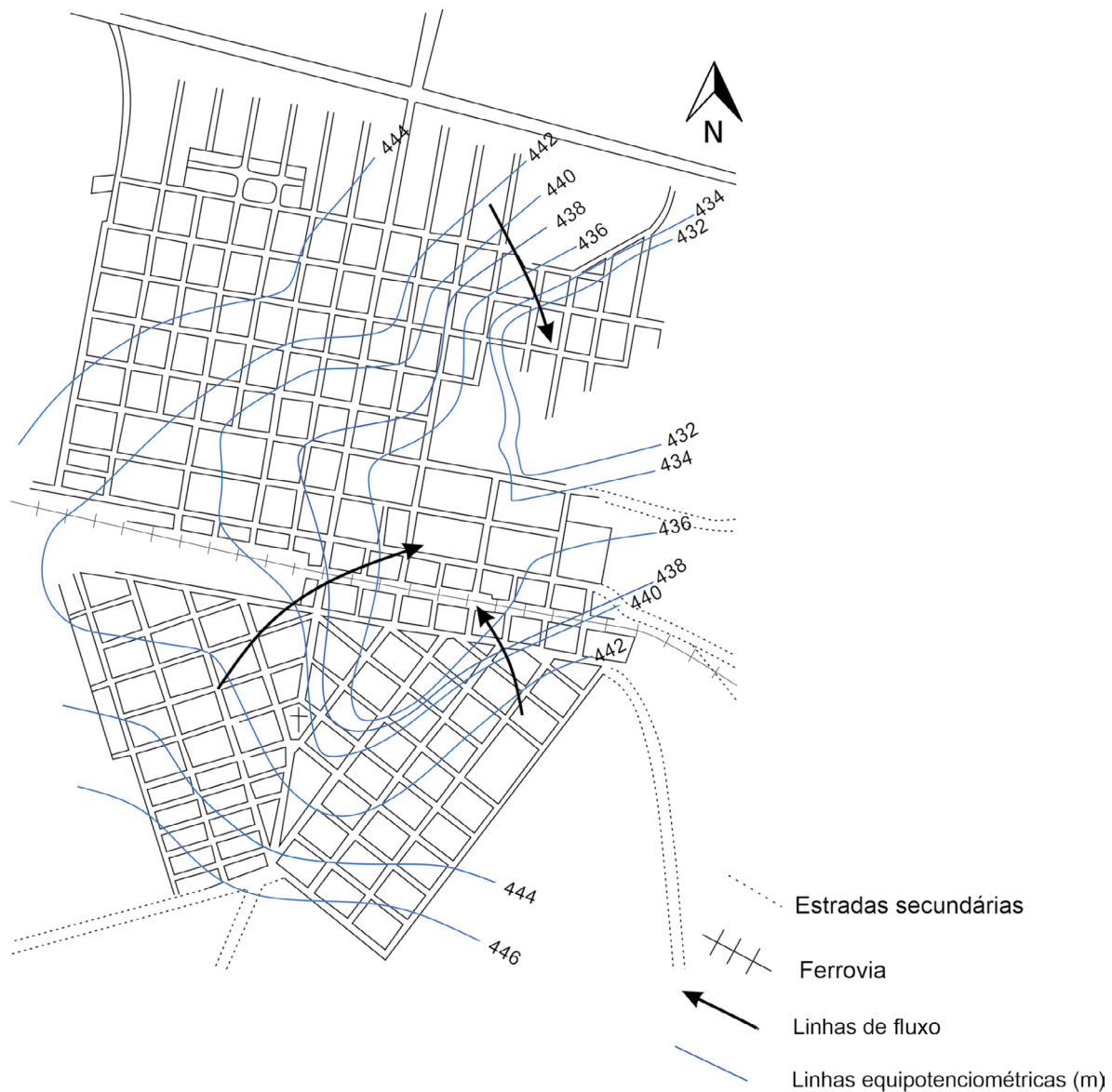
Fonte: Bertolo et al. (2011).

O Aquífero Adamantina pertence ao Sistema Aquífero Bauru, na cidade de Urânia, e é caracterizado como livre a semiconfinado, lateralmente homogêneo e isotrópico, possuindo espessura média de 60 a 120 m (Rivera, 2002). A recarga desse aquífero ocorre naturalmente pela infiltração da chuva em sua área de afloramento, que junto às áreas de descarga e à geomorfologia da área, controlam a superfície potenciométrica (DAEE, 1976). O fluxo de água subterrânea ocorre em direção nordeste da cidade, onde o Córrego Comprido atua com área de descarga (Almodovar, 2000).

Poços tubulares instalados em Urânia mostram espessura saturada média de 100 m. Almodovar (2000) classificou as

águas subterrâneas do município de Urânia em três zonas: zona profunda, a partir de 150 m; zona intermediária, de 21 a 150 m; e zona rasa, de até 21 m. A zona profunda representa as águas mais antigas do aquífero, em que predominam as águas bicarbonatadas cálcicas e magnesianas. Na zona intermediária, predominam as famílias das águas bicarbonatadas cálcicas ou magnesianas e das cloro-nitratadas cálcicas ou magnesianas. E, por último, na zona rasa, recarga do aquífero, predominam as águas cloro-nitratadas cálcicas ou magnesianas.

A partir das cotas dos níveis de água estáticos, Cagnon (2003) confeccionou um mapa potenciométrico (Figura 2),



Fonte: Cagnon (2003).

Figura 2. Mapa potenciométrico – outubro de 2001.

estabelecendo as direções principais de fluxo de água subterrânea na área urbana da cidade de Urânia. De acordo com o mapa, a direção preferencial do fluxo aponta para a área nordeste da cidade, onde está localizado o Córrego Comprido.

METODOLOGIA

Métodos elétricos se baseiam na variação do fluxo de corrente elétrica em subsuperfície em função da condutividade elétrica de solos e rochas. Esses métodos utilizam fenômenos puramente galvânicos, nos quais a corrente pode ser introduzida no terreno por meio de eletrodos, com a diferença de potencial medida por outro par de eletrodos (Orellana, 1972). A resistividade elétrica é dada pela resistência oferecida por um material ao fluxo de corrente elétrica quando submetido a um campo elétrico externo. A resistividade elétrica depende de aspectos dos materiais geológicos, como composição mineral, porosidade, salinidade, temperatura do meio e grau de saturação de água (Loke, 2004; Tabela 2).

Se o meio for homogêneo, a resistividade será igual em qualquer local e independentemente da posição dos eletrodos. Porém, existindo heterogeneidades, a resistividade não será constante. O valor calculado é denominado de resistividade elétrica aparente, que é adquirida durante a aquisição geoeletrica (Equação 1), sendo utilizada para calcular a resistividade elétrica verdadeira por meio de algoritmos de inversão.

$$\rho = \frac{\Delta V}{i} k \quad (1)$$

Em que:

ρ = resistividade, em ohm.m;

ΔV = diferença de potencial, em volt;

i = corrente elétrica em A, em ampère;

k = fator geométrico do arranjo, em m.

A SEV é uma técnica geoeletrica usada para determinar a profundidade do nível d'água, assim como identificar litologias e estimar suas espessuras. Trata-se de uma investigação indireta, pontual, na qual são usados quatro eletrodos alinhados em relação a um ponto central. Durante o levantamento, o aumento da distância entre os eletrodos permite maior profundidade de investigação.

Neste trabalho, foi utilizado um resistivímetro Terrameter SAS em arranjos *Schlumberger*. O arranjo *Schlumberger* possui uma configuração composta de quatro eletrodos: dois responsáveis pela injeção de corrente elétrica no solo (eletrodos A e B), e dois, por captar a variação do potencial elétrico (eletrodos M e N). O ponto de investigação será verticalmente coincidente com o ponto central do arranjo. Os espaçamentos entre os eletrodos devem ser fixos, suas movimentações simultâneas e de mesmo valor métrico.

Vinte e uma SEVs foram realizadas no município de Urânia (Figura 1). As sondagens contaram com aberturas MN/2 de 0,5 a 5,0 m, e com AB/2 variando de 1,5 m ao espaçamento máximo de 200 m. O *software* Ipi2win foi utilizado para realizar inversões dos dados das SEVs. Para ajustar a curva de resistividade aparente com a curva calculada, o número de camadas foi inserido manualmente, baseado em observações de descrições de perfis geológicos de três poços de monitoramento (Tabela 3). O ajuste lateral controla a espessura da camada, enquanto o ajuste vertical influencia na resistividade. O número de camadas e as espessuras foram, então, invertidas, minimizando o erro quadrático médio (RMS) entre as curvas de resistividades aparente e calculada.

Com base no espaçamento médio das SEVs (aproximadamente 500 m) e na abertura de seus arranjos, foram

Tabela 2. Propriedades elétricas para diferentes materiais geológicos.

Rocha	Resistividade (ohm.m)	Condutividade (mS/m)
Argila (úmida e seca)	1 – 100	10 – 1.000
Areia (úmida e seca)	1 – 10.000	0,1 – 1.000
Água doce (20°C)	80	12,5
Água subterrânea	0,5 – 300	3,3 – 2.000

Fonte: Telford et al. (1990).

Tabela 3. Características dos poços de monitoramento.

Poço	X	Y	Diâmetro do tubo	Posição do filtro (m)	Comprimento do filtro (m)	Prof. (m)	Nível d'água (m)
1	537689	7761559	4"	34 – 40	6	40	10,41
2	537110	7760681	4"	24 – 30	6	30	11,56
3	536823	7761421	4"	26 – 32	6	32	11,18

definidos os parâmetros para a interpolação e a plotagem dos mapas de resistividade, potenciométrico e de vulnerabilidade. O algoritmo de interpolação utilizado foi o de mínima curvatura, disponível no *software* Seequent Oasis, com células de 100 m e corte do mapa para distâncias acima de 500 m da SEV mais próxima.

Um mapa potenciométrico foi elaborado por meio da interpolação dos níveis d'água vinculada às resistividades aparentes e aos poços de monitoramento (Figura 1). Os níveis d'água nos três poços (Tabela 3) foram determinados a partir de um medidor elétrico de nível d'água modelo HSNA da Hidrosuprimentos, com cabo de 100 m. As medições foram realizadas simultaneamente às SEVs. Os poços contam com filtros de 6 m, espaço anular preenchido, pré-filtro instalado envolta da seção filtrante, selo de bentonita e uma mistura de sedimento nativo e bentonita para prevenir a mistura de água subterrânea por migração vertical.

Para cada ponto de observação, foi registrada a cota topográfica obtida por meio do GPS e o nível da água indicado pela SEV (Anexo 1). Os valores adquiridos pelo GPS em campo foram comparados com modelos de elevação obtidos pela plataforma *Shuttle Radar Topography Mission* (SRTM), com células de 30 m, resolução vertical de aproximadamente 6,2 m e resolução horizontal de 9 m (para a América do Sul; Rodriguez, 2005), com o objetivo de confirmar e complementar as informações.

Parâmetros de Dar Zarouk

A interpretação de modelos geoeletricos pode ser complementada pelos parâmetros de Dar Zarouk, cujos produtos permitem estimar a proteção natural de um aquífero a partir da zona não saturada (Braga, 2016). Esses parâmetros se caracterizam pela combinação da espessura e da resistividade de cada camada geoeletrica, por meio de multiplicação (resistência transversal) ou divisão (condutância longitudinal). A corrente elétrica, quando aplicada no subsolo, segue perpendicular ou paralelamente à estratificação da camada (Figura 3). No fluxo perpendicular, as camadas se comportam como condutores em série, em que as resistências serão somadas.

No fluxo paralelo à estratificação, as resistências não podem ser somadas. Portanto, é necessário utilizar a condutância longitudinal da camada (S_i ; Equação 2), dada em siemens:

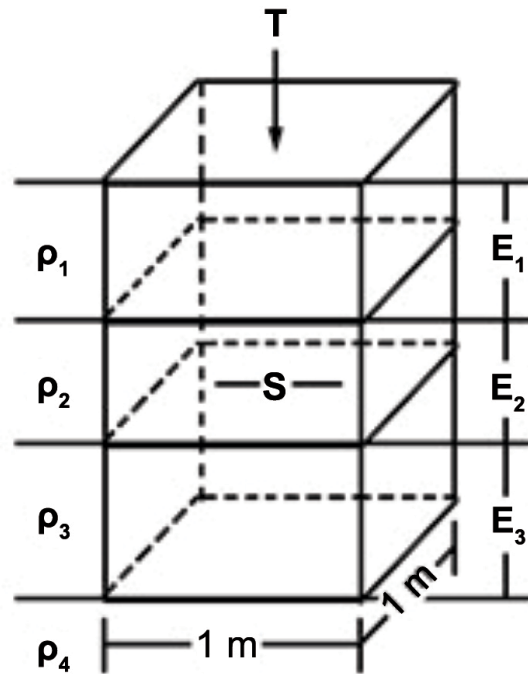
$$S_i = \frac{E_i}{\rho_i} \quad (2)$$

Em que:

E_i = espessura da camada, em metros;

ρ_i = resistividade da camada, em ohm.m.

A condutância longitudinal é utilizada em estudos da vulnerabilidade à contaminação de aquíferos. Quanto maior



T: resistência transversal; ρ : resistividade da camada; E: espessura de cada camada; S: condutância longitudinal.

Fonte: Orellana (1972).

Figura 3. Fluxo de corrente elétrica nas camadas.

o valor da condutância longitudinal na zona não saturada, maior será o grau de proteção do aquífero. Isso se deve à relação em que, quanto maior a espessura da camada, mais tempo o poluente irá demorar para atingir a zona saturada. Quanto menor o valor de resistividade, mais argiloso e, portanto, mais impermeável (Braga, 2016).

O valor de resistividade da zona não saturada requer um ajuste, já que a porção de solo apresenta grandes variações de resistividade, não necessariamente refletindo a geologia local. O ajuste utiliza a Lei de Archie (Orellana, 1972), e considera o grau de saturação, a porosidade da rocha e a resistividade elétrica da água de percolação (Braga, 2016). A porosidade e o grau de saturação podem ser estimados por meio dos valores de resistividade das camadas saturadas e não saturadas. A Equação 3 possibilita estimar uma resistividade ajustada (ρ_{aj}):

$$\rho_{aj} = \left[0,54 \left(\frac{\rho_{sat}}{\rho_{insat}} \right)^{-2.25} \left(\frac{\rho_{insat}}{\rho_{sat}} \right)^{-2} \right] \rho_{sat} \quad (3)$$

Em que:

ρ_{sat} = resistividade saturada;

ρ_{insat} = resistividade insaturada (os valores de resistividade são dados em ohm.m).

Com o valor de p_{ap} , é possível calcular o parâmetro de condutância longitudinal (Tabela 4). Os parâmetros de Dar Zarouk só devem ser aplicados em áreas não contaminadas, pois a existência do contaminante modifica os valores naturais de resistividade (Braga, 2016). Os parâmetros foram empregados apenas em locais onde não foram encontrados indícios de contaminação segundo Cagnon (2003), o que foi confirmado pelos valores de resistividade dentro do normal para água subterrânea (Telford et al., 1990).

A classificação da vulnerabilidade do aquífero pode ser caracterizada pela acessibilidade da zona saturada à penetração hidráulica de contaminantes e pela capacidade de atenuação resultante de retenção e degradação bio-físico-química (Foster et al., 2013). Para estimar o índice de vulnerabilidade natural do aquífero (Figura 4; Tabela 5), foi utilizada a sequência elaborada por Braga (2008).

RESULTADOS E DISCUSSÃO

O mapa potenciométrico (Figura 5), construído a partir das SEVs e dos poços de monitoramento, mostra que o fluxo de água segue a topografia do terreno, convergindo para a parte nordeste da cidade. O Córrego Comprido está localizado no baixo topográfico dessa parte de Urânia, para onde a água subterrânea flui, comportando-se, assim, como área de descarga. O mapa abrange uma área maior do que o mapa potenciométrico proposto por Cagnon (2003); entretanto, ambos apontam a região do Córrego Comprido como área de descarga.

A caracterização litológica, e por extensão da permeabilidade do meio, é um dos parâmetros mais difíceis de ser obtido em estudos de vulnerabilidade à contaminação de aquíferos (Foster et al., 2002; Foster et al., 2013). Para auxiliar

nessa questão, foram elaborados mapas de resistividade das zonas saturadas e das não saturadas (Figura 6) a partir dos resultados das SEVs. Os valores de resistividade tanto nas zonas saturadas quanto nas zonas não saturadas indicam uma variação na porcentagem entre areia e argila em diferentes partes da cidade. Parte da área noroeste da região de estudo conta com resistividades mais baixas quando comparada à área sudeste, indicando maiores concentrações de argila.

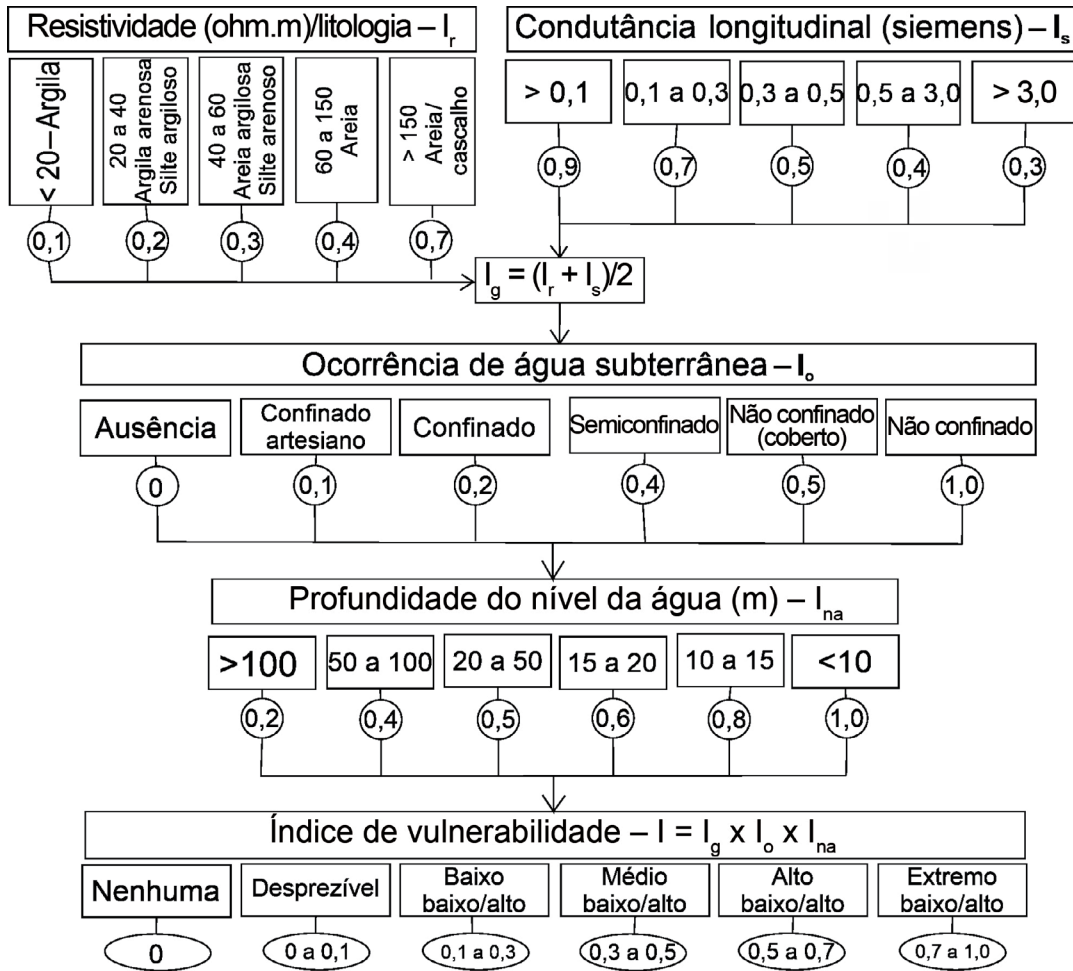
Estimativa de vulnerabilidade à contaminação do aquífero

O conjunto de SEVs 1, 2, 3, 11, 14, 16, 17 e 18 foi usado para o estudo de vulnerabilidade natural à contaminação do Aquífero Adamantina na área rural não contaminada da cidade de Urânia. Os altos valores de resistividade da zona não saturada, atingindo até 6.414 ohm.m, foram atribuídos a arenitos com porcentagens de argila que podem variar de um ponto para o outro (Figura 7A). As resistividades da zona saturada variaram de 1 a 179 ohm.m, sendo compatíveis com a literatura para água subterrânea, que admite valores entre 0,5 e 300 ohm.m (Telford et al., 1990; Figura 7B).

As SEVs 5, 6, 7, 12 e 13 foram realizadas em um alto topográfico na parte sudeste da área de estudo, fora do perímetro urbano. As medidas de resistividade desse conjunto apresentam valores mais altos quando comparado às outras SEVs (Figuras 8 e 9), tanto nos horizontes saturados quanto nos não saturados. Isso indica uma porcentagem menor de argila e uma maior de areia, o que altera a capacidade de retenção de contaminantes na zona não saturada. Não foram constatadas anomalias de baixa resistividade ($< 0,5$ ohm.m; Telford et al., 1990) que indiquem contaminantes que modifiquem os valores naturais de resistividade,

Tabela 4. Resistividades saturadas, insaturadas e ajustadas utilizadas na estimativa de vulnerabilidade natural do aquífero. Espessura da zona não saturada em água e condutância calculada para a camada.

	Resistividade saturada (ohm.m)	Resistividade insaturada (ohm.m)	Resistividade ajustada (ohm.m)	Espessura (m)	Condutância (S)
SEV 1	23,40	386	25,47	6,91	0,27
SEV 2	1,90	923	4,82	7,54	1,56
SEV 3	6,29	152	7,53	14,45	1,92
SEV 5	33,40	3.385,50	57,23	2,84	0,05
SEV 6	105,00	1.669	113,21	2,86	0,02
SEV 7	179,00	6.414	236,49	2,07	0,01
SEV 11	10,70	347	13,79	8,71	0,63
SEV 12	31,30	4.500	58,53	3,89	0,07
SEV 13	4,15	620	7,83	3,00	0,38
SEV 14	5,67	139	6,81	3,07	0,45
SEV 16	0,65	139	1,34	2,82	2,10
SEV 17	2,26	138	3,41	3,54	1,04
SEV 18	13,50	327	16,17	5,82	0,36



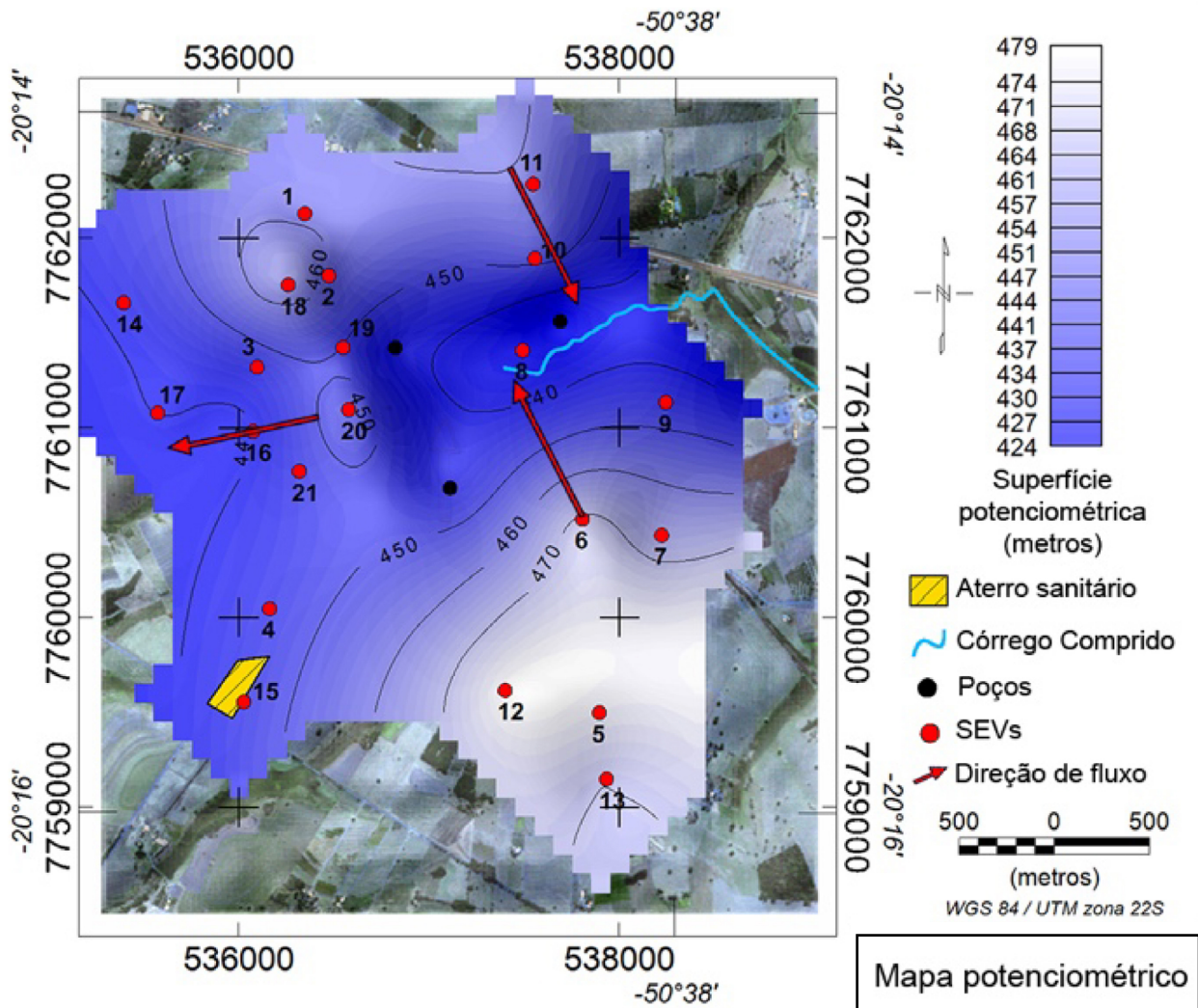
Fonte: Braga (2008).

Figura 4. Índice de vulnerabilidade do aquífero.

Tabela 5. Parâmetros para a estimativa do índice de vulnerabilidade natural de aquífero.

	I_r	I_s	$I_g = (I_r + I_s)/2$	I_o	I_{na}	$I_g \times I_o \times I_{na}$	Índice de vulnerabilidade à contaminação
SEV 1	0,2	0,7	0,45	1	1	0,45	Médio
SEV 2	0,1	0,4	0,25	1	1	0,25	Baixo
SEV 3	0,1	0,4	0,25	1	0,8	0,20	Baixo
SEV 5	0,3	0,9	0,60	1	1	0,60	Alto
SEV 6	0,4	0,9	0,65	1	1	0,65	Alto
SEV 7	0,7	0,9	0,80	1	1	0,80	Extremo
SEV 11	0,1	0,4	0,25	1	1	0,25	Baixo
SEV 12	0,3	0,9	0,60	1	1	0,60	Alto
SEV 13	0,1	0,5	0,30	1	1	0,30	Médio
SEV 14	0,1	0,5	0,30	1	1	0,30	Médio
SEV 16	0,1	0,4	0,25	1	1	0,25	Baixo
SEV 17	0,1	0,4	0,25	1	1	0,25	Baixo
SEV 18	0,1	0,5	0,30	1	1	0,30	Médio

I_r : resistividade; I_s : condutância longitudinal; I_g : índice geofísico; I_o : ocorrência da água subterrânea; I_{na} : profundidade do nível da água.



SEVs: sondagens elétricas verticais.

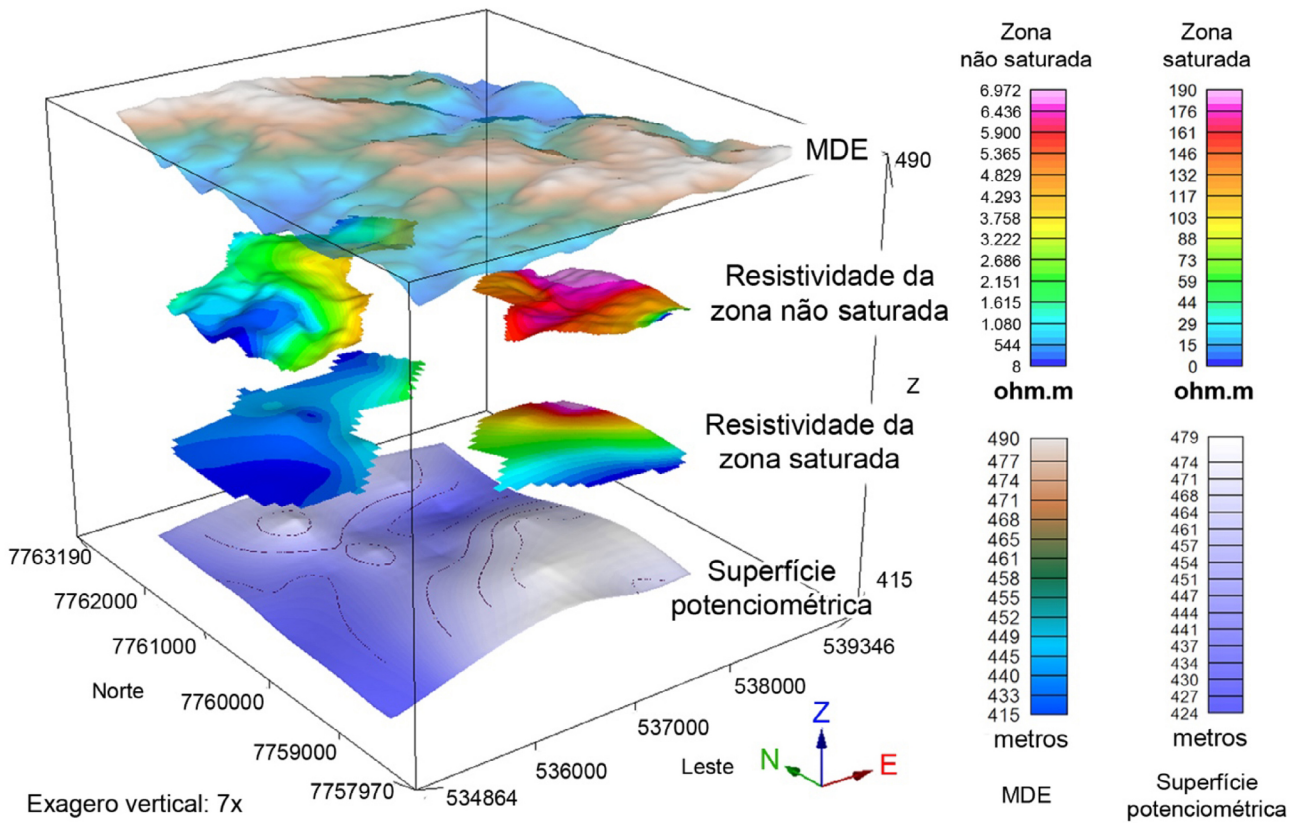
Figura 5. Potenciometria do aquífero na área urbana de Urânia, a partir de dados de sondagem elétrica vertical e poços de monitoramento. As setas indicam o sentido do fluxo subterrâneo.

viabilizando o emprego dessas SEVs no cálculo de índice de vulnerabilidade.

A partir do método proposto por Braga (2008), a condutância longitudinal foi calculada a partir da espessura da camada e da p_{aj} (Tabela 4). Aliada ao tipo de aquífero, a profundidade do nível da água e a resistividade da zona não saturada foram utilizadas para classificar o índice de cada ponto (Tabela 5). O índice de ocorrência de água subterrânea (I_o) não sofre variações, pois o aquífero se apresenta de forma não confinada em toda a área estudada. A profundidade do nível de água (I_{na}), em sua maioria, é menor que 10 m, com exceção da SEV 3, em que se registra profundidade de 14 m. O índice de resistividade (I_r) varia entre os

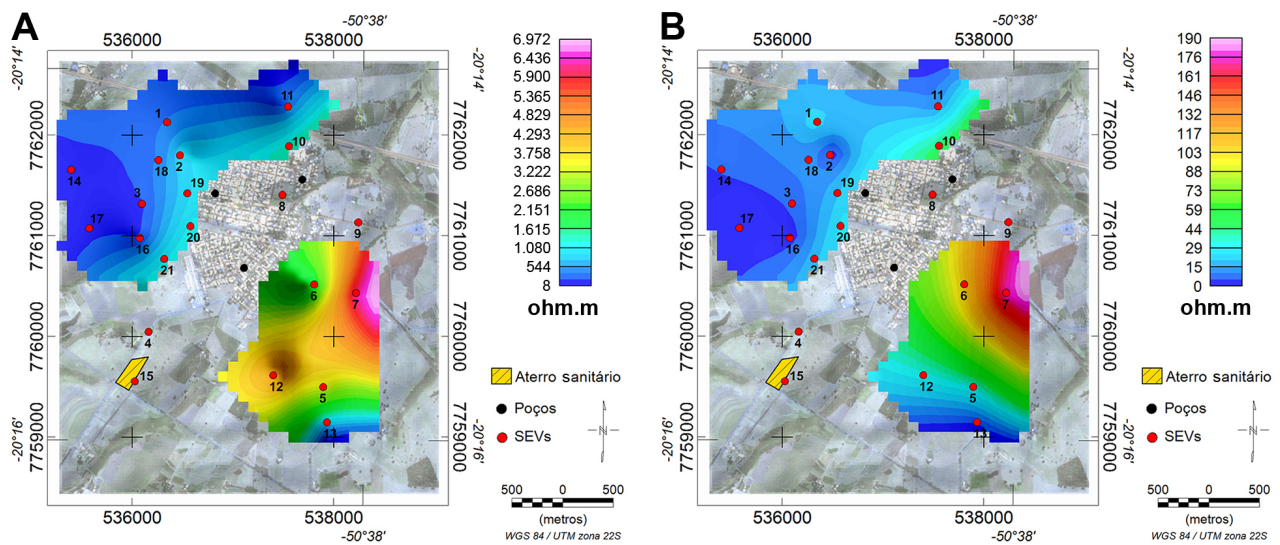
valores mínimos e máximos da classificação em razão da diferença de porcentagem de areia e argila em cada ponto. O índice de condutância longitudinal (I_s) foi obtido por meio da divisão da espessura da camada não saturada por sua p_{aj} . Com base nos índices calculados, foi construído um mapa de vulnerabilidade à contaminação (Figura 10).

O noroeste da região de estudo foi classificado com índices baixos e médios, entre os três pontos com índice médio (SEVs 1, 14 e 18), dos quais dois contam com espessuras da zona não saturada entre 6 e 7 m, porém com resistividades maiores que 15 ohm.m. No terceiro ponto, a zona não saturada é menos espessa, porém a resistividade também é mais baixa. Dessa forma, quanto menor a espessura da camada



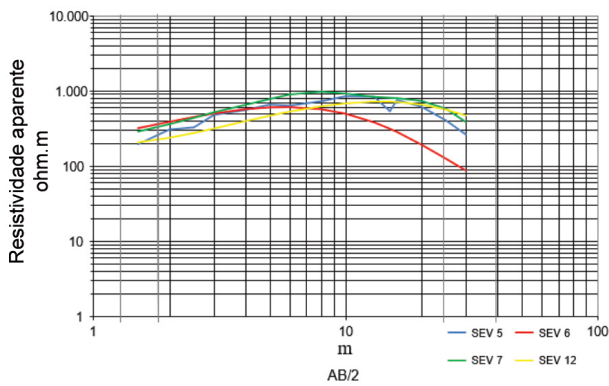
MDE: Modelo digital de elevação.

Figura 6. Cotas topográficas (mapa superior) e superfície potenciométrica (mapa inferior), indicando as resistividades nas zonas não saturada e saturada.



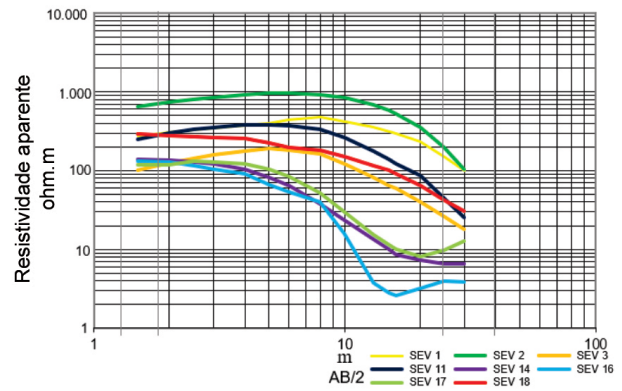
SEVs: sondagens elétricas verticais.

Figura 7. Resistividade da (A) zona não saturada e da (B) zona saturada na área externa à urbanização de Urânia.



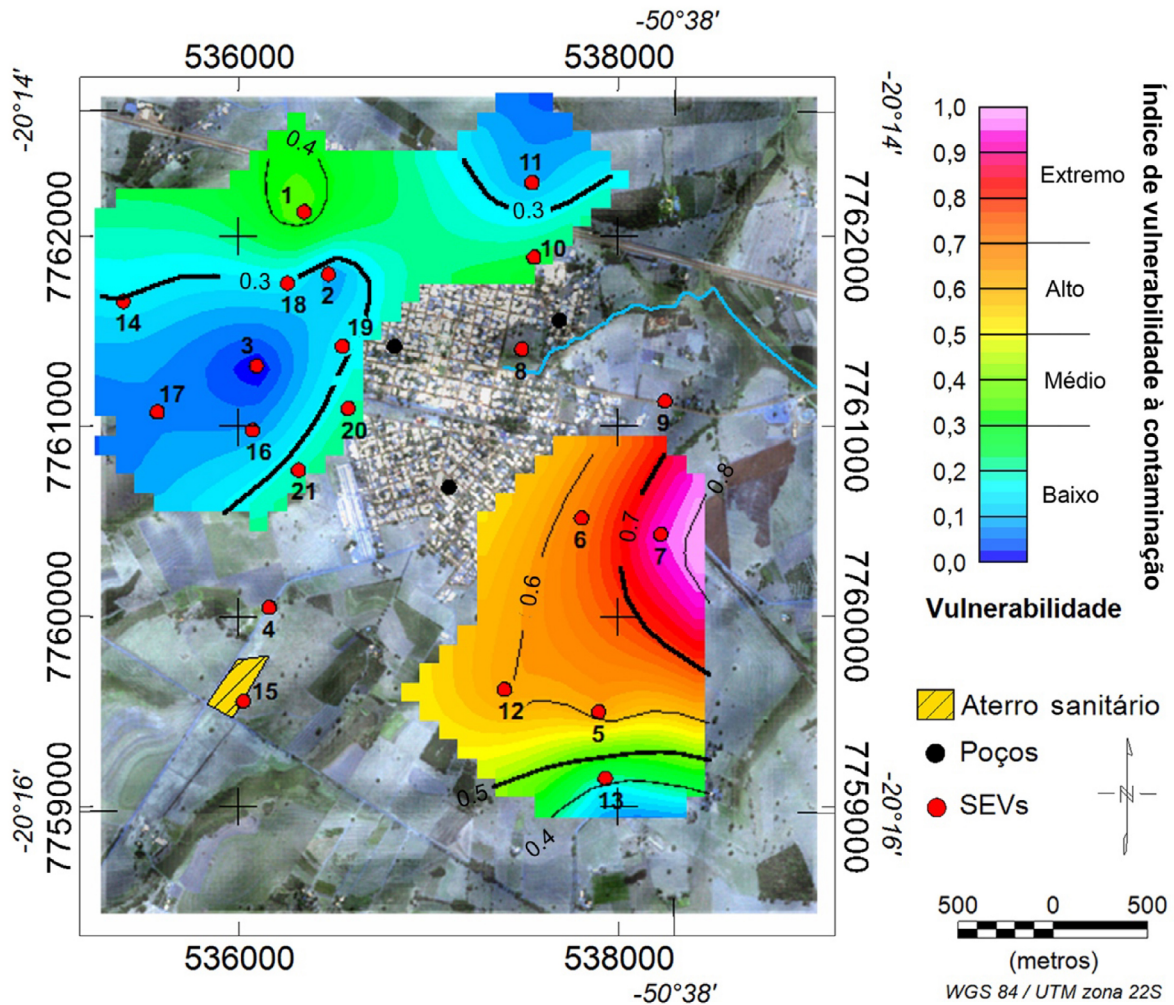
SEV: sondagem elétrica vertical.

Figura 8. Curvas de resistividade aparente do conjunto de sondagens elétricas verticais 5, 6, 7 e 12.



SEV: sondagem elétrica vertical.

Figura 9. Curvas de resistividade aparente do conjunto de sondagens elétricas verticais 1, 2, 3, 11, 14, 16, 17 e 18.



SEVs: sondagens elétricas verticais.

Figura 10. Vulnerabilidade natural à contaminação do Aquífero Adamantina nos arredores da cidade de Urânia.

não saturada e maior sua resistividade, menor a proteção frente a contaminantes.

A área com maior vulnerabilidade encontra-se estabelecida em um alto topográfico a sudeste, onde a zona não saturada tem espessura de 2 a 4 m, indicando pouca proteção frente aos contaminantes, pois o nível da água está muito próximo à superfície. Resistividades entre 57 e 236 ohm.m registram a existência de um material mais arenoso que permite que a água flua com maior facilidade para a zona saturada, carregando consigo possíveis contaminantes.

Os índices de vulnerabilidade à contaminação mais altos são caracterizados por apresentarem material geológico mais arenoso na zona não saturada, o que aponta a importância da definição da litologia no estudo.

CONCLUSÕES

O método de SEV mostrou-se eficiente na determinação do nível d'água, com o qual foi possível construir um mapa de fluxo de água subterrânea. O fluxo de água subterrânea converge para a região do Córrego Comprido, concordando com trabalhos anteriores realizados por monitoramento de poços. Os valores de resistividade também foram eficazes na identificação da litologia da zona saturada e da zona não saturada. A partir desses dados, foi possível indicar áreas mais vulneráveis frente a contaminantes. A caracterização litológica e a permeabilidade da zona não saturada são parâmetros difíceis de serem obtidos em estudos de vulnerabilidade. Geralmente, a simplificação que os profissionais adotam é assumir que a litologia da zona saturada seja igual à da zona não saturada. Assim, o uso de SEV nesse intento avança na precisão dos estudos de vulnerabilidade de aquíferos.

Os valores de resistividade elétrica mostraram que a área a sudeste possivelmente dispõe de materiais mais arenosos do que a região noroeste nas zonas saturada e não saturada, o que influencia na permeabilidade da zona não saturada. A região sudeste, além de possuir material mais arenoso e portar mais material permeável, conta ainda com profundidades do nível d'água menores que 5 m. O material permeável aliado a um nível d'água muito próximo à superfície aponta a região sudeste com detentor de um alto índice de vulnerabilidade a contaminantes, o que requer atenção especial para atividades potencialmente poluidoras.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem o apoio do Centro de Pesquisas de Águas Subterrâneas do Instituto de Geociências da Universidade de São Paulo (CEPAS/USP), da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior — CAPES (Processo 88882.461730/2019-01), da Fundação

de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo — FAPESP (Processos 2019/20544-1, 2015/038061) e do Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico — CNPq (Processo 422501/2016-6). Agradecemos também aos técnicos Paulo Rodrigues de Lima e Samuel Pedro Egidio o envolvimento neste trabalho.

REFERÊNCIAS

Almodovar, M. L. N. (2000). *A origem natural da poluição por cromo no aquífero Adamantina, município de Urânia (SP)*. Tese (Doutorado). São Paulo: Instituto de Geociências – USP. <https://doi.org/10.11606/T.44.2000.tde-12022015-143410>

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. <https://doi.org/10.1590/S0102-261X2008000100005>

Braga, A. C. O. (2016). *Geofísica aplicada: métodos geoeletricos em hidrologia*. São Paulo: Oficina de Textos.

Braga, A. C. O., Malagutti Filho, W., Dourado, J. C. (2006). Resistivity (DC) method applied to aquifer protection studies. *Revista Brasileira de Geofísica*, 24(4), 573-581. <https://doi.org/10.1590/S0102-261X2006000400010>

Brandt Neto, M. (1984). *O Grupo Bauru na região centro-norte do Estado de São Paulo*. Tese (Doutorado). São Paulo: Instituto de Geociências – USP. <https://doi.org/10.11606/T.44.1984.tde-22072015-085122>

Brasil. (2017). Ministério da Saúde. Gabinete do Ministro. Portaria de Consolidação nº 5, de 28 de setembro de 2017. Consolidação das normas sobre as ações e os serviços de saúde do Sistema Único de Saúde. *Diário Oficial da União*. Disponível em: <<https://portalarquivos2.saude.gov.br/images/pdf/2018/marco/29/PRC-5-Portaria-de-Consolida----o-n--5-de-28-de-setembro-de-2017.pdf>>. Acesso em: 1º fev. 2021.

Bertolo, R., Bourotte C., Marcolan L., Oliveira S., Hirata R. (2011). Anomalous content of chromium in a Cretaceous sandstone aquifer of the Bauru Basin, state of São Paulo, Brazil. *Journal of South American Earth Sciences*, 31(1), 69-80. <https://doi.org/10.1016/j.jsames.2010.10.002>

Cagnon, F. A. (2003). *Origem e hidroquímica do nitrato nas águas subterrâneas do aquífero Adamantina em Urânia, SP*. Dissertação (Mestrado). São Paulo: Instituto de Geociências – USP. <https://doi.org/10.11606/D.44.2003.tde-25092015-144139>

- Departamento de Águas e Energia Elétrica (DAEE). (1976). *Estudo de Águas Subterrâneas*. Região Administrativa 7, 8 e 9, Bauru, São José do Rio Preto e Araçatuba. São Paulo: DAEE. 4 v. Disponível em: <http://revistadae.com.br/artigos/artigo_edicao_108_n_1538.pdf>. Acesso em: 1º fev. 2021.
- Fernandes, L. A., Coimbra, A. M. (2000). Revisão estratigráfica da parte oriental da Bacia Bauru (Neocretáceo). *Revista Brasileira de Geociências*, 30(4), 717-728. <https://doi.org/10.25249/0375-7536.2000304717728>
- Foster, S. S. D., Hirata, R., Andreo, B. (2013). The aquifer pollution vulnerability concept: aid or impediment in promoting groundwater protection? *Hydrogeology*, 21, 1389-1392. <https://doi.org/10.1007/s10040-013-1019-7>
- Foster, S. S. D., Hirata, R. C. A., Gomes, D., Dyelia, M., Paris, M. (2002). *Groundwater quality protection: a guide for water utilities, municipal authorities and environment agencies*. Washington, D.C.: The World Bank.
- Instituto de Pesquisas Tecnológicas (IPT). (1981). *Mapa geológico do Estado de São Paulo*. Escala 1:500.000. São Paulo: IPT.
- Loke, M. H. (2004). *A practical guide to 2-D and 3-D surveys*. Electrical imaging surveys for environmental and engineering studies.
- Marques, C. H. G., Terada, R., Galvão, P., Hirata, R. (2019). Evolução espacial e temporal da contaminação por nitrato no aquífero urbano de Urânia (SP). *Águas Subterrâneas*, 33(3), 258-269. <https://doi.org/10.14295/ras.v33i3.29524>
- Monteiro, A. R. O., Lucena, L. R. F., Souza, I. V. F., Nunes, L. M. G., Cavalcante, D. C. L. (2014). estimativa do grau de proteção natural do aquífero barreiras a partir do parâmetro geoeletrico condutância longitudinal - área da Bacia do Rio Catu-RN. In: Congresso Brasileiro de Águas Subterrâneas, 17. *Anais...*
- Orellana, E. (1972). *Prospeccion geoeletrica en corriente continua*. Madrid: Paraninfo.
- Rivera, M. I. P. (2002). *A numerical model as a tool to understand groundwater circulation in Urânia (SP, Brazil)*. Dissertação (Mestrado). Suécia: Universidade de Tecnologia de Lulea.
- Rodriguez, E. (2005). A Global Assessment of the SRTM Accuracy. *The Shuttle Radar Topography Mission: Data Validation and Applications Workshop*, Virginia.
- Soares, P. C., Landim, P. M. B., Fúlfaro, V. J., Sobreiro Neto, A. F. (1980). Ensaio de caracterização estratigráfica do cretáceo no Estado de São Paulo: Grupo Bauru. *Revista Brasileira de Geociências*, 10(3), 177-185. <https://doi.org/10.25249/0375-7536.1980177185>
- Souza, L. A. P., Gandolfo, O. C. B. (2012). Métodos geofísicos em geotecnia e geologia ambiental. *Revista Brasileira de Geologia de Engenharia e Ambiental*, 2(2), 9-27.
- Telford, W. M., Geldart, L. P., Sheriff, R. E. (1990). *Applied Geophysics*. Cambridge: Cambridge University Press.

Anexo 1. Localização das sondagens elétricas verticais, altitude, profundidade e cota do nível d'água.

Pontos	Longitude (m)	Latitude (m)	Cota topográfica (m)	Profundidade NA (m)	Cota NA (m)
SEV 1	536.347	7.762.128	465	7,0	458,0
SEV 2	536.474	7.761.800	465	7,5	457,5
SEV 3	536.097	7.761.318	455	10,6	444,4
SEV 4	536.163	7.760.046	456	10,9	445,1
SEV 5	537.895	7.759.498	479	2,8	476,7
SEV 6	537.806	7.760.517	475	2,9	472,1
SEV 7	538.222	7.760.432	468	2,1	465,9
SEV 8	537.491	7.761.406	438	2,9	435,1
SEV 9	538.244	7.761.133	451	5,7	445,3
SEV 10	537.556	7.761.891	461	7,4	453,6
SEV 11	537.546	7.762.282	468	8,7	459,3
SEV 12	537.400	7.759.615	483	3,9	479,1
SEV 13	537.932	7.759.148	473	3,0	470,0
SEV 14	535.395	7.761.657	445	3,1	441,9
SEV 15	536.026	7.759.555	452	7,0	445,0
SEV 16	536.075	7.760.979	442	2,8	439,2
SEV 17	535.575	7.761.076	444	3,5	440,5
SEV 18	536.260	7.761.752	473	5,8	467,2
SEV 19	536.548	7.761.422	460	10,8	449,2
SEV 20	536.578	7.761.095	460	5,7	454,3
SEV 21	536.318	7.760.770	445	-	-
Poço 1	537.689	7.761.559	441	10,4	430,6
Poço 2	537.110	7.760.681	455	11,6	443,4
Poço 3	536.823	7.761.421	453	11,2	441,8

NA: nível d'água.