



## Detecção e monitoramento de área de infiltração controlada de vinhaça utilizando o método da eletrorresistividade

Walter Malagutti Filho, DGA/IGCE/UNESP – Rio Claro; José Ricardo Melges Bortolin, Pós-Graduação em Geociências/IGCE/UNESP – Rio Claro; César Augusto Moreira, DGA/IGCE/UNESP – Rio Claro; Alice Marques Pereira, Pós-Graduação em Geociências/IGCE/UNESP – Rio Claro.

Copyright 2014, SBGf - Sociedade Brasileira de Geofísica

*Este texto foi preparado para a apresentação no VI Simpósio Brasileiro de Geofísica, Porto Alegre, 14 a 16 de outubro de 2014. Seu conteúdo foi revisado pelo Comitê Técnico do VI SimBGf, mas não necessariamente representa a opinião da SBGf ou de seus associados. É proibida a reprodução total ou parcial deste material para propósitos comerciais sem prévia autorização da SBGf.*

### Resumo

Um projeto de infiltração controlada de vinhaça e posterior detecção e monitoramento da pluma de contaminação foi desenvolvido em uma área de estudos situada sobre sedimentos predominantemente arenosos da Formação Pirambóia. Três diferentes volumes de vinhaça (60, 300 e 900 litros) foram infiltrados e o comportamento do contaminante em subsuperfície foi monitorado por meio de diversos métodos geofísicos. O volume mínimo a ser infiltrado foi estabelecido com base nas características químicas do solo do local e da vinhaça. Os resultados obtidos com o método da eletrorresistividade (ER) revelam a eficácia do método para esta finalidade e o qualificam como uma opção expedita e de baixo custo operacional para o diagnóstico ambiental de áreas impactadas. A intensidade das anomalias observadas é diretamente proporcional ao volume de vinhaça infiltrado, devido à maior quantidade de substâncias eletricamente condutoras transferidas ao solo.

### Introdução

Desde o período colonial, a agricultura constitui uma das bases da economia brasileira. Atualmente, a cana-de-açúcar representa um dos mais importantes produtos agrícolas do país.

O Brasil é o maior produtor mundial de cana-de-açúcar, de açúcar obtido a partir da cana e, também, o maior exportador mundial de açúcar (ISO, 2009). Somente o Estado de São Paulo concentra 52,07% da área cultivada nacional, tornando-se responsável por 56,15% de toda a cana colhida no país. Na safra 2012/2013, as usinas paulistas produziram 23.351.700 toneladas de açúcar e 12.198.507.700 litros de etanol (Conab, 2013).

Dentre os resíduos do processo de produção do etanol, destaca-se a vinhaça, substância líquida gerada na proporção aproximada de 13 litros de vinhaça para cada litro de etanol. No Brasil, este resíduo é utilizado como fertilizante em lavouras de cana-de-açúcar, pois é rico em nutrientes minerais (principalmente  $K^+$ ,  $Na^+$ ,  $Mg^{2+}$  e  $Ca^{2+}$ ). Entretanto, o excesso de vinhaça pode causar contaminação do solo e da água subterrânea, fato recorrente no país e que requer estudos que conduzam a uma metodologia de detecção e monitoramento do volume ideal a ser disposto no meio.

De um modo geral, investigações da influência da vinhaça em solos e águas subterrâneas são efetuadas por meio de

análises físico-químicas em amostras coletadas em áreas de cultivo de cana-de-açúcar, onde é praticada a fertirrigação – Ludovice (1997); Lyra, Rolim e Silva (2003); Silva et al. (2006); Brito, Rolim e Pedrosa (2007) – ou em áreas de sacrifício, onde é feita a infiltração – Hassuda (1989).

Entretanto, os métodos tradicionais de investigação acabam por encarecer e aumentar demasiadamente o tempo de execução de estudos em grandes áreas, já que se torna necessário coletar e analisar um grande número de amostras, ou ainda, construir inúmeros poços de monitoramento, de modo que possam abranger toda a extensão da área em questão.

Por outro lado, os métodos geofísicos mostram-se como uma opção eficiente e interessante para a investigação de áreas que tenham sido contaminadas pela infiltração da vinhaça. Uma das principais vantagens destes em relação aos métodos tradicionais de investigação de subsuperfície é a rapidez na avaliação de grandes áreas com custo relativamente menor. Além disso, são de natureza não invasiva, o que significa que, a priori, não alteram o meio físico.

Porém, são escassas as propostas metodológicas envolvendo métodos geofísicos, tanto como ferramenta auxiliar quanto como principal, na investigação de contaminação causada pela disposição irregular de vinhaça – Mendes (1987), Gloeden et al. (1991) e Cruz (2008).

Assim, a principal proposta deste trabalho é caracterizar o tipo de anomalia geofísica inerente à infiltração controlada de vinhaça em uma área de sedimentos arenosos e monitorar a pluma do contaminante, mediante a utilização do método da eletrorresistividade.

### Metodologia

Uma área de estudos de 100m<sup>2</sup> (10m x 10m) e com declividade aproximado de 34° foi selecionada em uma propriedade da zona rural do município de Corumbataí (SP) (Figura 1).

Localmente, ocorrem sedimentos pertencentes à Formação Pirambóia (período triássico), a qual é constituída basicamente por arenitos médios e finos, podendo ocorrer intercalações de finas camadas de argilitos e siltitos. Sotoposta a esta, ocorre a Formação Corumbataí (período permiano superior), regionalmente representada por argilitos e siltitos de diversas colorações.

No local, foram abertas duas valas medindo, aproximadamente, 0,45m x 0,45m x 2,00m (volume total aproximado = 405 litros), por onde foi executada a infiltração

controlada do contaminante. A área escolhida não apresenta histórico de infiltração de vinhaça.

A vala A foi posicionada no extremo esquerdo da área de estudos, enquanto que a vala B ocupou a porção central. A distância entre elas é de 2m e ambas localizam-se 5m à jusante do limite superior da área.



Figura 1: Localização da área de estudos.

#### Método da Eletrorresistividade (ER)

O método da eletrorresistividade (ER) baseia-se no fato de que diferentes materiais, geológicos ou não, apresentam diferentes valores de resistividade elétrica ( $\rho$ ), parâmetro intrínseco dos materiais que indica a maior ou menor dificuldade encontrada por uma corrente elétrica para se propagar em um meio. Esse coeficiente depende, entre outras coisas, da natureza e do estado físico do corpo considerado.

Para se determinar o valor de resistividade elétrica que caracteriza um meio geológico é necessário submetê-lo a um campo elétrico. Especificamente para este método, utiliza-se o procedimento galvânico, onde um par de eletrodos metálicos (A e B) é disposto na superfície terrestre e conectados a uma fonte de corrente – contínua ou variável. Surge, então, um campo eletromagnético em subsuperfície que gera uma diferença de potencial, a qual pode ser medida entre outro par de eletrodos (M e N) (Telford, .

A aquisição dos dados foi feita com um resistivímetro ABEM Terrameter SAS 4000. Duas técnicas foram empregadas neste trabalho: Sondagem Elétrica Vertical (SEV) e Imageamento Elétrico (IE).

A técnica da SEV (investigação da variação da resistividade elétrica, em profundidade, a partir de medidas efetuadas na superfície do terreno) foi desenvolvida empregando-se o arranjo Schlumberger. Neste arranjo, a distância entre os eletrodos de corrente (**AB**) e os eletrodos de potencial (**MN**) deve obedecer à relação geométrica (Equação (1)):

$$MN \leq \frac{AB}{5} \quad (1)$$

O fator geométrico ( $K_S$ ) para esse arranjo é dado pela Equação (2):

$$K_S = \pi \frac{(AM \cdot AN)}{MN} \quad (2)$$

A técnica do IE, neste caso, envolve a medição de valores de resistividade elétrica e de cargabilidade a partir da superfície terrestre e ao longo de uma seção a uma ou mais profundidades determinadas.

Para a aquisição dos dados, optou-se pelo arranjo Dipolo-Dipolo, com 8 níveis de investigação ( $n$ ). Neste arranjo, os eletrodos de corrente (**A** e **B**) e os eletrodos de potencial (**M** e **N**) são dispostos sobre uma mesma linha reta imaginária e o espaçamento entre os eletrodos obedece à relação  $x=AB=MN$ . Os pontos de investigação correspondem ao cruzamento de segmentos de reta que partem do centro geométrico de **AB** e de **MN**, com inclinação de 45° em relação à superfície.

O fator geométrico ( $K_{DD}$ ) para o arranjo Dipolo-Dipolo é dado pela Equação (3):

$$K_{DD} = 2\pi x \frac{1}{\left(\frac{1}{n} - \frac{2}{n+1} + \frac{1}{n+2}\right)} \quad (3)$$

onde o coeficiente  $n$  representa o nível de investigação e pode assumir somente valores inteiros ( $n = 1, 2, 3, \dots$ ).

Os ensaios geofísicos foram divididos em duas etapas: **(1) pré-infiltração**: desenvolvida de modo a se conhecer valores característicos do ambiente natural isento de contaminação por vinhaça e testar os procedimentos de campo de modo a otimizar a coleta de dados na fase posterior; **(2) pós-infiltração**: repetição sistemática dos ensaios, objetivando estabelecer um monitoramento temporal da área de estudo após sua contaminação controlada por vinhaça. A Tabela 1 resume as características dos ensaios executados.

Tabela 1: Ensaios geofísicos realizados nas Áreas 1 e 2 (etapa pré-infiltração).

Etapa	Ensaio	Quantidade
Pré-infiltração	SEV	3 com AB/2 máximo de 100m
	IE	5 linhas com $x = 3m$ 1 linha com $x = 5m$
Pós-infiltração	SEV	-
	IE	3 linhas com $x = 2m$

## Resultados

### Pré-infiltração

As SEV permitiram inferir a profundidade do nível freático regional entre 6 e 11m. Especificamente na área de estudos, este situa-se a, aproximadamente, 8,6m. Além

destas informações, por meio das SEV foi possível identificar 7 camadas geoeletricas, das quais as 5 primeiras (1ª: sedimentos compactados; 2ª: evapotranspiração; 3ª: retenção; 4ª: capilar; 5ª: nível freático) foram interpretadas como uma seqüência de sedimentos predominantemente arenosos da Formação Pirambóia e as camadas 6 e 7 foram associadas aos sedimentos predominantemente silto-argilosos da Formação Corumbataí.

Os resultados dos IE (Figuras 2 e 3) sugerem um cenário idêntico ao identificado com as SEV, sendo possível identificar 3 zonas: (a) evapotranspiração: associada aos valores da ordem de 500Ω.m que ocorrem superficialmente; (b) retenção: porção onde  $500\Omega.m \leq \rho \leq 10.000\Omega.m$ ; (c) saturada: faixa onde  $\rho \leq 100\Omega.m$  na porção basal da seção.

#### Pós-infiltração

A fase pós-infiltração foi iniciada no dia imediatamente posterior à infiltração de 60L de vinhaça na vala A e de 300L na vala B. Durante as três primeiras semanas do monitoramento, os ensaios geofísicos estenderam-se ao longo dos 20m do eixo maior da área (Figura 2). Após este período, o comprimento da área de estudos foi reduzido para os primeiros 10m do mesmo eixo, pois os dados mostraram contrastes restritos ao entorno das valas. A largura da área não sofreu alterações.

Os ensaios geofísicos pós-infiltração consistiram em 3 IE e 6 IEM, conforme a Figura 3. No caso dos IE, as Linhas A e B (as quais interceptam as valas homônimas) foram repetidas sistematicamente, enquanto que a Linha de referência foi executada somente uma vez.

A Figura 4 apresenta algumas seções representativas dos resultados obtidos com a técnica de IE. Na Figura 4a, correspondente à seção da Linha de referência executada em local isento de contaminação, observa-se a predominância de valores de  $\rho \geq 500\Omega.m$ , associados aos sedimentos predominantemente arenosos da Fm. Pirambóia. Na porção basal da seção, ocorre uma faixa de  $\rho \leq 100\Omega.m$  que, no contexto da área, corresponde ao início da zona saturada.

A Figura 4b corresponde à seção da Linha A executada 1 dia após a infiltração de 60L de vinhaça na vala em questão. Os valores de resistividade das adjacências da vala A mantiveram-se sempre acima de 500Ω.m, tal como na seção da Linha de referência. Aparentemente, o volume infiltrado não impactou o meio natural a ponto de gerar uma região de contrastes, detectável pelo método ER.

A Figura 4c corresponde à seção da Linha B executada 3 dias após a infiltração de 300L de vinhaça na vala em questão. Nela, observa-se uma anomalia posicionada logo abaixo da vala, que atinge cerca de 1,4m de profundidade e, aproximadamente, 2,5m de extensão lateral, onde  $\rho_{min} = 150\Omega.m$ .

Na Figura 4d, correspondente à seção da Linha B executada 8 dias após a infiltração de 900L de vinhaça na respectiva vala, é possível observar uma anomalia

situada abaixo da vala, com  $\rho_{min} = 50\Omega.m$ , profundidade máxima em torno de 1,9m e, aproximadamente, 5,0m de extensão lateral.

#### Discussão e Conclusões

Relativamente ao *background* da área, as regiões anômalas exibem menor resistividade, atingindo o mínimo de 100Ω.m. Resultados semelhantes obtiveram Cruz et al. (2008), que caracterizaram a influência da vinhaça no solo por reduzidos valores de resistividade. Segundo os autores, os baixos valores de resistividade são atribuídos à influência dos sais e à retenção de água pela matéria orgânica, ambos presentes em elevadas quantidades na vinhaça.

No caso de sedimentos arenosos, como na Área 2, a adsorção dos cátions  $Ca^{2+}$ ,  $Mg^{2+}$ ,  $K^+$  e  $Na^+$  é significativamente reduzida devido à proporcionalmente baixa capacidade de troca catiônica (CTC). Deste modo, a propagação de correntes elétricas injetadas é facilitada pela presença de partículas eletricamente condutoras. Por isso, quanto maior é o volume de vinhaça infiltrado, mais intensas são as anomalias, devido à maior quantidade de substâncias eletricamente condutoras transferidas ao solo.

#### Agradecimentos

Os autores agradecem à Fundação de Amparo à Pesquisa Científica do Estado de São Paulo – FAPESP pelo suporte financeiro (processo 2011/21659-5).

#### Referências

- Brito, F. L.; Rolim, M. M.; Pedrosa, E. M. R., 2007. Concentração de cátions presentes no lixiviado de solos tratados com vinhaça. **Revista Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v. 27, n. 3: 773-781.
- Conab – Companhia Nacional de Abastecimento, 2013. **Acompanhamento da safra brasileira: cana-de-açúcar: safra 2012/2013**. Disponível em: <[http://www.conab.gov.br/OlalaCMS/uploads/arquivos/13\\_04\\_09\\_10\\_30\\_34\\_boletim\\_cana\\_portugues\\_abril\\_2013\\_4o\\_Iev.pdf](http://www.conab.gov.br/OlalaCMS/uploads/arquivos/13_04_09_10_30_34_boletim_cana_portugues_abril_2013_4o_Iev.pdf)>. Acessado em: 16 abr. 2013.
- Cruz, J. I., 2008. **Detecção da influência da vinhaça na resistividade do solo através da análise de dados geofísicos**: um estudo de caso no assentamento Sepé – Tiarajú – SP. Dissertação (Mestrado em Geociências) – Instituto de Geociências, Universidade Estadual de Campinas, Campinas.
- Cruz, J. I. et al., 2008. Detecção de contaminação de solo por vinhaça através de análise de dados de eletrorresistividade. **Revista Brasileira de Geofísica**. v.26, n.4: 481-492.
- Gloeden, E.; Cunha, R. C. A.; Fraccaroli, M. J. B.; Cleary, R. W., 1991. The behaviour of vinasse constituents in the unsaturated and saturated zones in the Botucatu aquifer

recharge area. **Water Science Technology**, v. 24, n. 11: 147-157.

Hassuda, S., 1989. **Impactos da infiltração da vinhaça de cana no Aquífero Bauru**. Dissertação (Mestrado). Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, São Paulo.

ISO – International Sugar Organization, 2008. **Sugar Year Book 2008**. Disponível em: <<http://www.isosugar.org/PDF%20files/SUGAR%20YEAR%20BOOK%20-%20sample.pdf>>. Acessado em 16 abr. 2013.

Ludovice, M. T. F., 1997. **Estudo do efeito poluente da vinhaça infiltrada em canal condutor de terra sobre lençol freático**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Estadual de Campinas, Campinas.

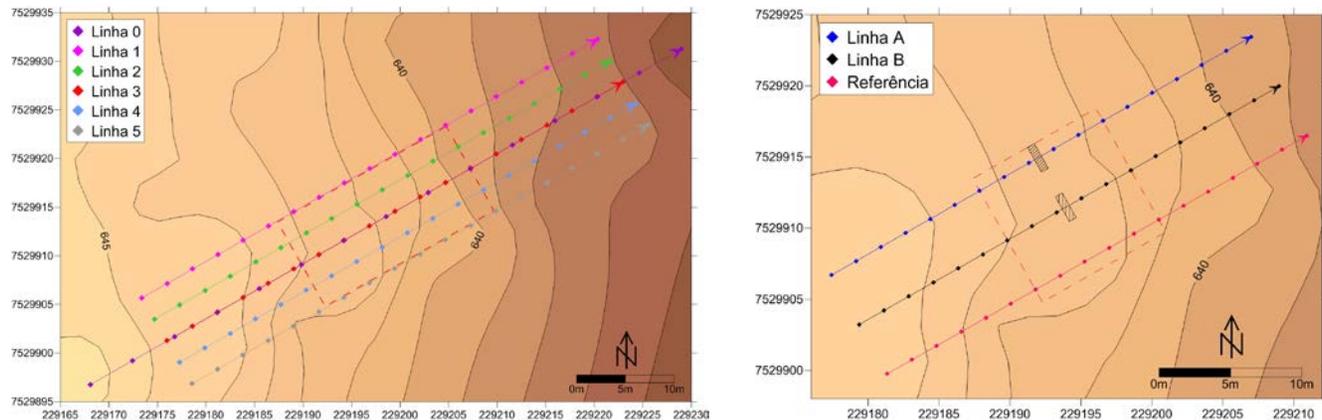
Lyra, M. R. C. C.; Rolim, M. M.; Silva, J. A. A., 2003. Toposeqüência de solos fertigados com vinhaça: contribuição para a qualidade das águas do lençol freático.

**Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 7, n. 3: 525-532.

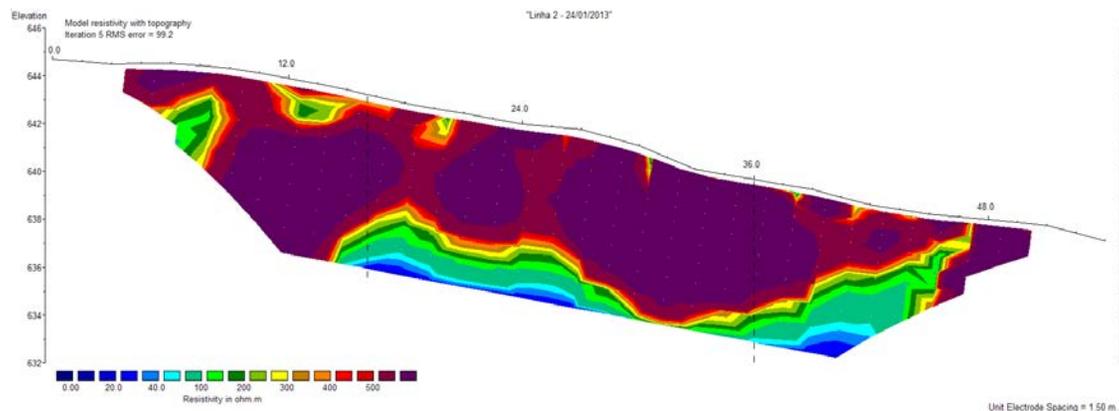
Mendes, J. M. B., 1987. **Técnicas geofísicas aplicadas no mapeamento e monitoramento de poluição e contaminação de águas subterrâneas**. 196f. Tese (Doutorado em Geociências) – Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, São Paulo.

Silva, A. J. N.; Cabeda, M. S. V.; Carvalho, F. G.; Lima, J. F. W. F., 2006. Alterações físicas e químicas de um Argissolo amarelo sob diferentes sistemas de uso e manejo. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 10, n. 1: 76-83.

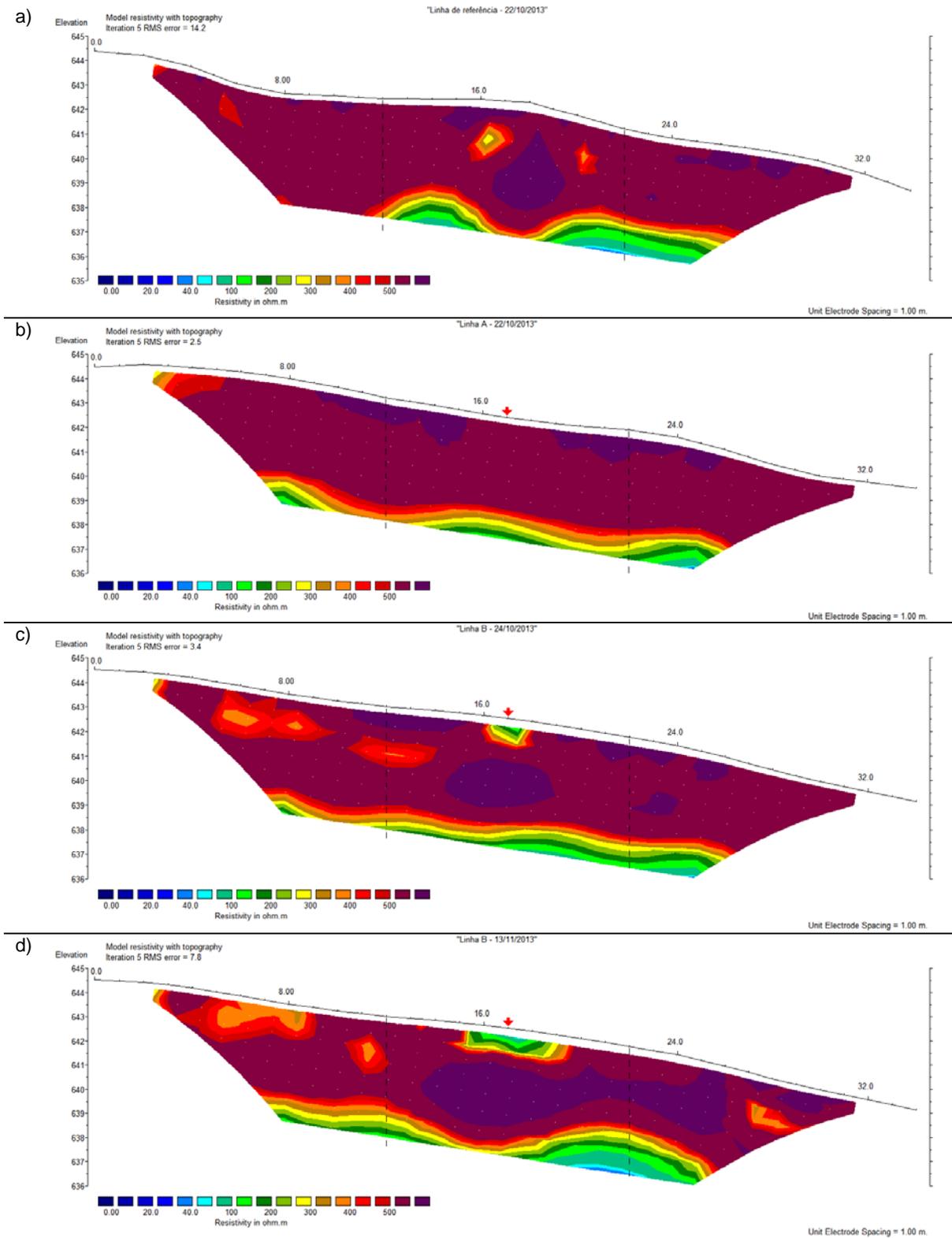
Telford, W. M.; Geldart, L. P.; Sheriff, R. E., 1990. **Applied Geophysics**. 2. ed., University Press, Cambridge.



**Figura 2:** Mapa de localização dos Imageamentos Elétricos. À esquerda: pré-infiltração. À direita: pós-infiltração.



**Figura 3:** Seção típica de resistividade elétrica pré-infiltração.



**Figura 4:** Seções de resistividade representativas das linhas de IE. A seta vermelha indica a posição das valas. As linhas pretas pontilhadas definem os limites da área de estudos.