



## O método eletromagnético (domínio da frequência) aplicado na detecção e monitoramento de área de infiltração controlada de vinhaça

José Ricardo Melges Bortolin, Pós-Graduação em Geociências/IGCE/UNESP – Rio Claro; Walter Malagutti Filho, DGA/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

Em uma área de estudos situada sobre sedimentos predominantemente arenosos da Formação Pirambóia foram infiltradas três diferentes doses de vinhaça (60, 300 e 900 litros) e o comportamento do contaminante em subsuperfície foi monitorado por meio de diversos métodos geofísicos. Neste trabalho são apresentados os resultados obtidos com o método eletromagnético (domínio da frequência – FEM). O volume mínimo a ser infiltrado foi estabelecido com base nas características químicas do solo do local e da vinhaça. O método EM mostrou-se eficaz na detecção dos três diferentes volumes. 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 início da colonização, a agricultura é uma das bases da economia brasileira. Atualmente, a cana-de-açúcar representa um dos mais importantes produtos agrícolas do país, principalmente para a produção do etanol, combustível amplamente utilizado nos automóveis brasileiros.

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.

Tradicionalmente, investigações da influência da vinhaça em solos e águas subterrâneas são efetuadas por meio de análises físico-químicas em amostras de solos e de águas 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) – ou em áreas de sacrifício onde é feita a infiltração – Hassuda (1989).

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 eletromagnético (domínio da frequência).

### 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).



Figura 1: Localização da área de estudos.

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.

*Método Eletromagnético (domínio da frequência – FEM)*

Este método baseia-se no princípio de indução eletromagnética para medir a condutividade elétrica em subsuperfície. A condutividade elétrica ( $\sigma$ ) é um parâmetro físico que indica a facilidade que um determinado material possui para transmitir uma corrente elétrica. Sua unidade de medida é o S/m. Fisicamente, é o inverso da resistividade elétrica ( $\rho$ ), e podem ser assim relacionados.

No método FEM, adotado neste trabalho, faz-se circular uma corrente elétrica alternada (utilizando-se uma ou mais frequências) por uma bobina transmissora (Tx), resultando em um campo eletromagnético primário ( $H_p$ ). A propagação deste campo no subsolo – meio condutor assumido como homogêneo – induz correntes elétricas secundárias, que produzem um campo eletromagnético secundário ( $H_s$ ) proporcional à corrente induzida. Uma parte do campo secundário induz correntes elétricas em uma bobina receptora (Rx), posicionada dentro da área de influência dos campos primário e secundário. A diferença de potencial (d.d.p.) associada à corrente elétrica induzida na bobina receptora é diretamente proporcional à condutividade elétrica do terreno.

Admitindo que a razão entre  $H_s$  e  $H_p$  seja linear, é possível efetuar leituras diretas da condutividade elétrica dos materiais em subsuperfície, a partir da medição dos valores de ambos os campos (McNeill, 1990), pela Equação (1):

$$\sigma = \frac{4}{(2\pi f)\mu_0 s^2} \left( \frac{H_s}{H_p} \right) = \frac{4}{\omega\mu_0 s^2} \left( \frac{H_s}{H_p} \right) \quad (1)$$

onde  $f$  = frequência da corrente elétrica que circula na bobina (Tx), em Hz,  $\omega$  = frequência angular, em rad/s;  $\mu_0$  = permeabilidade magnética do vácuo, em H/m;  $s$  = espaçamento entre as bobinas Tx e Rx, em m.

Efetou-se a aquisição dos dados com um condutímetro Geonics EM-31 MK2, utilizando a técnica do Imageamento Eletromagnético (IEM), com 2 níveis de investigação, referentes às possíveis orientações dos campos magnéticos: Dipolo Magnético Horizontal (DMH) e Dipolo Magnético Vertical (DMV).

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 (Figura 2); **(2) pós-infiltração:** repetição sistemática dos ensaios, objetivando estabelecer um monitoramento temporal da área de estudo após sua contaminação controlada por vinhaça (Figura 3). A Tabela 1 resume as características dos IEM executados.

## Resultados

### Pré-infiltração

Os valores de condutividade elétrica à profundidade de 3m (DMH) são relativamente menores aos observados a 6m (DMV) (Figura 4). Atribui-se este comportamento à maior quantidade de eletrólitos existentes em profundidade próximas ao nível freático. Assim, o maior número de

partículas eletricamente condutoras facilita o fluxo de correntes elétricas (no caso do método EM, gerada por indução pelo condutímetro).

### 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 (Figura 3), pois os dados mostraram contrastes restritos ao entorno das valas. A largura da área não sofreu alterações.

A Figura 5 apresenta os mapas de condutividade elétrica referentes aos dados coletados no dia imediatamente posterior à infiltração de 60L de vinhaça na vala A e de 300L na vala B.

Na região da vala A, à profundidade de investigação de 3m (DMH), é possível notar uma discreta elevação da condutividade elétrica na estação de medida n.º 4 da Linha 1 (5,02mS/m) e outra, mais pronunciada, que abrange as estações n.º 5 e 6 da Linha 2, com valores respectivos de 5,08mS/m e 5,24mS/m. Aos 6m de profundidade (DMV), nota-se um discreto pico de redução de  $\sigma$  na estação n.º 5 da Linha 1 (8,01mS/m) e outro, mais intenso, na mesma estação, porém da Linha 2 (8,20mS/m).

Na região da vala B, notam-se algumas anomalias, em ambas as profundidades de investigação, sendo que a estação de medida n.º 5 registra as mais intensas anomalias da Linha 3: 5,61mS/m (DMH) e 8,40mS/m (DMV). Na Linha 4, a anomalia engloba as estações n.º 4 – 5,84mS/m (DMH) e 8,13mS/m (DMV) – e n.º 5 – 5,68mS/m (DMH) e 8,16mS/m (DMV).

Na Figura 6, são apresentados os mapas de condutividade elétrica gerados a partir dos dados obtidos 6 dias após a infiltração de 900L de vinhaça na vala B.

Nas Linhas 3 e 4, com a orientação DMH (Dipolo Magnético Horizontal), registrou-se uma discreta anomalia condutiva no entorno da vala B, com valores típicos de 5,28mS/m e de 5,63mS/m. Na mesma região da área de estudos, com a orientação DMV (Dipolo Magnético Vertical), nota-se uma anomalia de baixa condutividade e valores típicos entre 6,96mS/m e 7,11mS/m.

Justificadas pelos valores apresentados e pela localização, todas estas anomalias podem ser associadas à influência da vinhaça no solo.

## Discussão e Conclusões

Devido à baixa Capacidade de Troca Catiônica (CTC) dos sedimentos arenosos, somente uma pequena parcela dos cátions da vinhaça é adsorvida pelo solo. O restante mantém-se em dissolução na água da vinhaça (elemento que representa cerca de 93% de sua composição),

favorecendo o fluxo de correntes elétricas na região impactada pelo contaminante.

O comportamento da condutividade elétrica observado na região impactada pela vinhaça ( $\sigma_{imp}$ ) sugere que esta porção de sedimentos tenha adquirido um valor intermediário, relativamente aos valores de *background* ( $\sigma_{back}$ ) em cada profundidade de investigação. Assim, conclui-se que, à profundidade de 3m,  $\sigma_{imp} > \sigma_{back}$  e a anomalia é dita condutiva; por outro lado, à profundidade de 6m,  $\sigma_{imp} < \sigma_{back}$  e, nesta condição, a anomalia é dita resistiva.

Além disso, 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

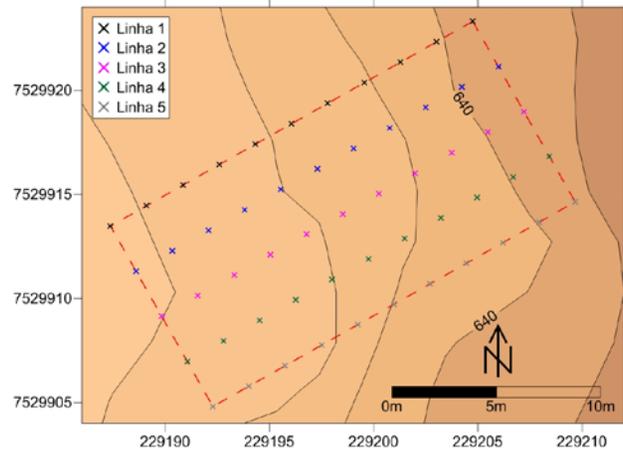
- Cruz, J. I., 2008. **Deteção da influência da vinhaça na resistividade do solo através da análise de dados geofísicos**: um estudo de caso no assentamento Sepé – Tiarajú – SP. Dissertação (Mestrado em Geociências) – Instituto de Geociências, Universidade Estadual de Campinas, Campinas.
- Gloeden, E.; 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.
- 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. Toposequência 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.

McNeill, J. D., 1990. Use of electromagnetic methods for groundwater studies. In: Ward, S. H. **Geotechnical and environmental geophysics**. Society of Exploration Geophysicists, Tulsa, Oklahoma: 191-218.

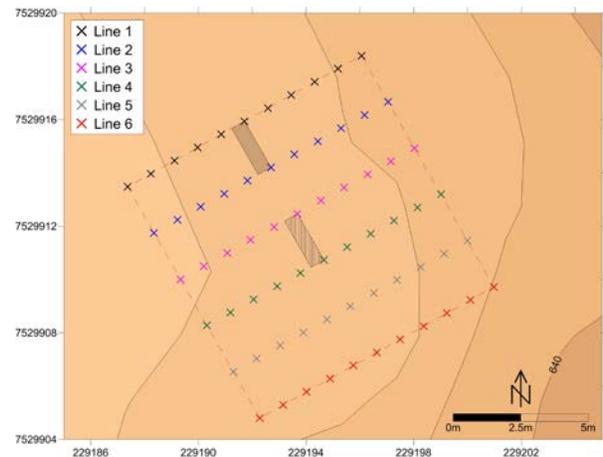
Mendes, J. M. B., 1987. **Técnicas geofísicas aplicadas no mapeamento e monitoramento de poluição e contaminação de águas subterrâneas**. 196f. Tese

(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.



**Figura 2:** Mapa de localização dos Imageamentos Eletromagnéticos pré-infiltração.



**Figura 3:** Mapa de localização dos Imageamentos Eletromagnéticos pós-infiltração.

**Tabela 1:** Dados gerais dos IEM.

Etapa	Quantidade de linhas	Espaçamento entre linhas (m)	Espaçamento entre estações de medida consecutivas (m)
Pré-infiltração	5	2,5	2
Pós-	6	2	1

infiltração

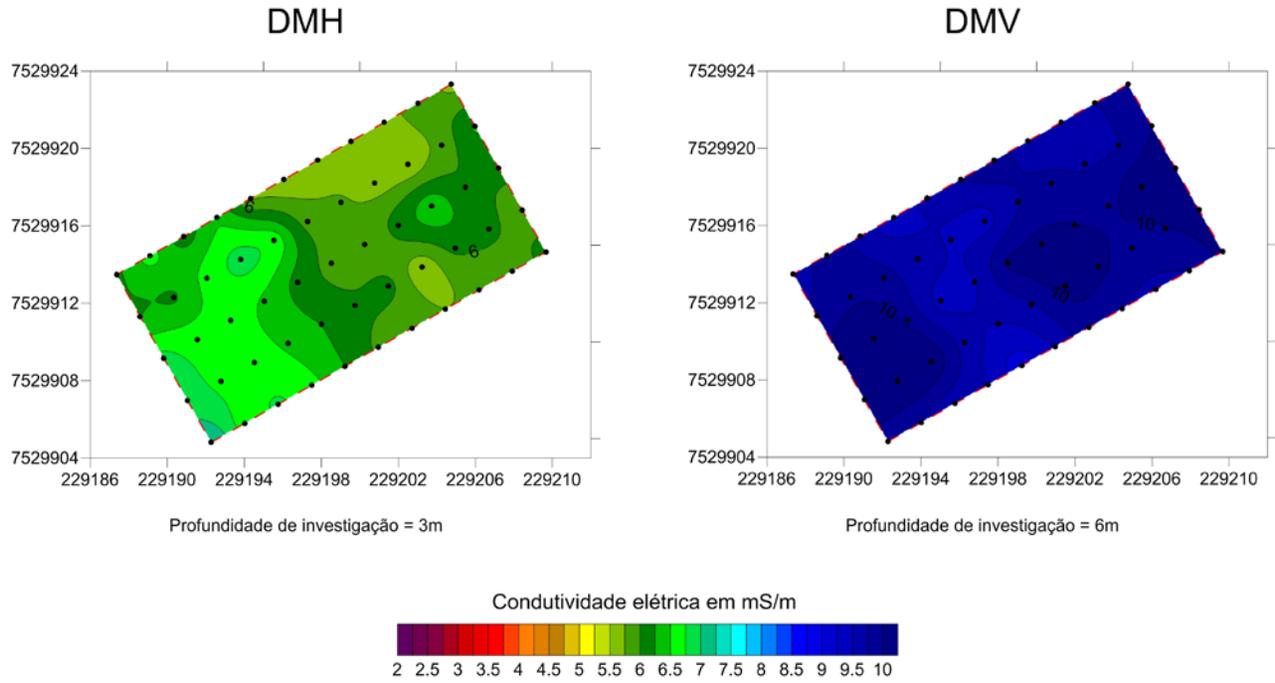


Figura 4: Mapas de condutividade elétrica pré-infiltração.

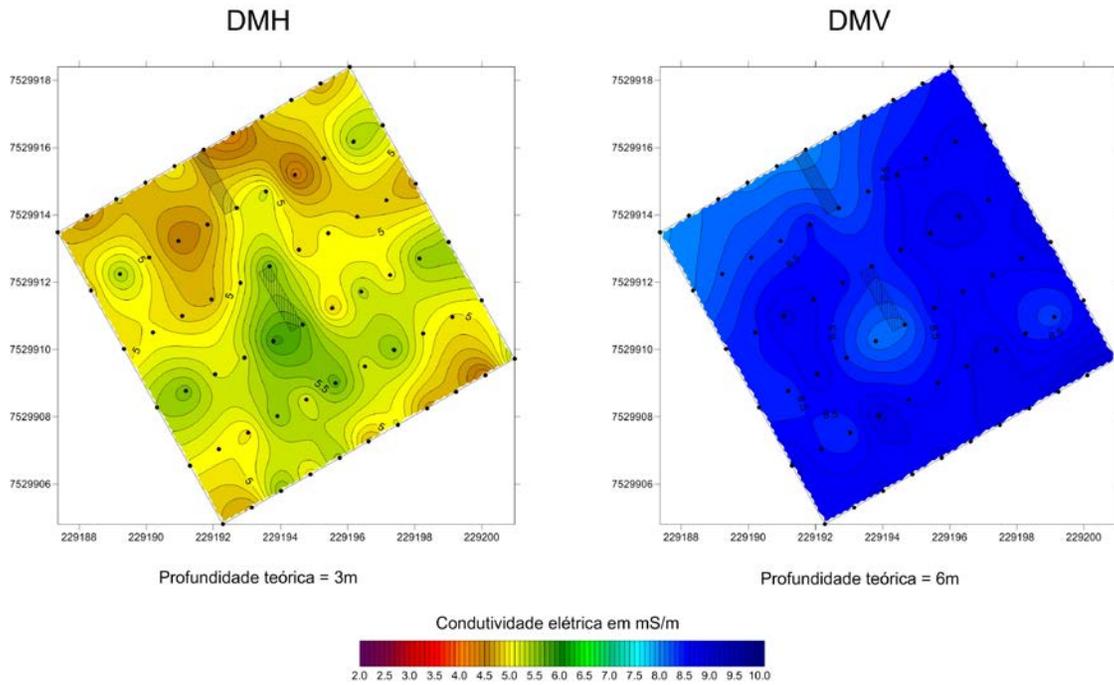
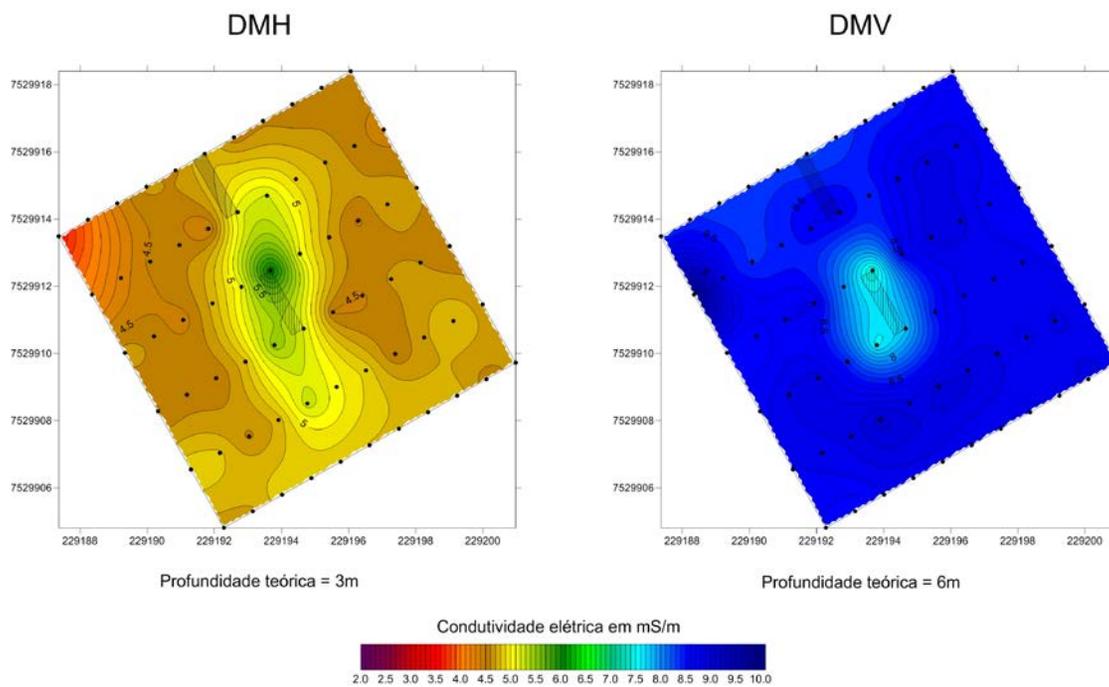


Figura 5: Mapas de condutividade elétrica referentes aos dados coletados 1 dia após a infiltração de 60 litros na vala A e 300 litros na vala B.



**Figura 6:** Mapas de condutividade elétrica referentes aos dados coletados 6 dias após a infiltração de 900 litros na vala B.