

## Emprego de técnicas geofísicas no estudo de solos e sua correlação com métodos laboratoriais

Everson Cezar<sup>1</sup>  
Marcos Rafael Nanni<sup>1</sup>  
Marcelo Luiz Chicati<sup>1</sup>  
Roney Berti de Oliveira<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Universidade Estadual de Maringá - UEM  
Av. Colombo, 5790, CEP 87020-900 - Maringá - PR, Brasil  
eversoncezar@yahoo.com.br  
mrnanni@uem.br  
mlchicati@yahoo.com.br  
roneyberti@yahoo.com.br

**Abstract** – The GPR uses indirect technique for investigation of subsurface structures, characterized as non-invasive method, which allows to extract information throughout the soil profile without drilling, probing or digging. This work aims at evaluating physical attributes using georadar associated to the CRIM equation, as well as its correlation with laboratory methods. We collected deformed and not deformed soil samples from two transects, one at the lines and the other at the interlines of the crop, at depths of 0-0.1 m; 0.1-0.2 m; 0.2-0.3 m; 0.3-0.4 m and 0.4-0.5 m, for determining the soil volumetric humidity and total porosity using laboratorial methods. At the same places and depths, georadar investigations were carried out, to determine the soil dielectric constant (k), which was applied the semi-empirical CRIM equation to determine the total porosity and subsequently volumetric humidity by geophysical methods. The statistical analysis, carried out by the t test, showed a significant difference at a level of 5% between the results for total porosity and volumetric humidity obtained by laboratorial methods and by the geophysical methods. The latter were influenced by the high level of clay and potassium in solution from the fertilizer and vinasse application. The co-relation between the methods was low ( $r = 0.58$  for total porosity and  $r = 0.59$  for volumetric humidity), showing the difficulty in determining physical attributes through such geophysical techniques.

**Palavras-chave:** dielectric constant, georadar, total porosity, volumetric humidity, constante dielétrica, georadar, porosidade total, umidade volumétrica.

### 1. Introdução

A cana-de-açúcar é uma gramínea que possui grande importância econômica para o Brasil, sendo esta uma das principais fontes de divisas para o país (AQUINO LEMOS FILHO et al., 2008). No entanto, a produtividade obtida nos canaviais brasileiros encontra-se abaixo do real potencial que a cultura pode oferecer. Assim, faz-se fundamental a pesquisa para que o setor produtivo explore melhor o potencial da planta e do ambiente de produção, diminuindo suas limitações e elevando assim sua produtividade.

Dentre as limitações a que requer elevado grau de atenção encontra-se relacionada ao solo. O manejo inadequado da camada de interesse por longos períodos leva a degradação química e física do solo prejudicando o desenvolvimento radicular da cultura.

A distribuição e penetração das raízes são fundamentais para o estabelecimento e o desenvolvimento da cultura. O crescimento da cana-de-açúcar na parte aérea é o reflexo da sua capacidade em explorar os primeiros centímetros do solo. Eventuais restrições impostas ao sistema radicular causadas por formação de camadas compactas no perfil cultural acarretam em limitações de produtividade devido à falta de aeração no solo e absorção de água e nutrientes.

Desta forma, faz-se necessário o monitoramento dos solos com vista à preservação da sua qualidade para que seja proporcionada produção contínua (FIALHO et al., 2006). A determinação de parâmetros físicos como a umidade no momento do preparo do solo, plantio e colheita, assim como a porosidade na área durante o desenvolvimento da cultura, são

informações importantes, uma vez que indicam qual deverá ser o manejo aplicado para evitar ou diminuir as possíveis restrições ao desenvolvimento radicular. Porém, os métodos atuais para determinação de ambos os parâmetros são destrutivos e trabalhosos, exigindo mão-de-obra treinada, tempo e infraestrutura própria, fugindo à realidade da maioria das usinas brasileiras.

Surge desta forma a necessidade de desenvolver metodologias que sejam mais rápidas e menos onerosas para os estudos investigativos dos solos. Existem diversos relatos na literatura, sobre o uso do GPR (Ground Penetrating Radar) e o emprego de ondas diretas no solo para estimar a umidade volumétrica (HUBBART et al., 2002; GROTE et al., 2003; GALAGEDARA e PARKIN, 2003; HUISMAN e BOUTEN, 2003; HUISMAN et al., 2003).

Paixão et al. (2006) utilizaram o georadar para determinação da umidade volumétrica do solo, empregando a equação de Topp et al. (1980), a qual estabelece uma relação empírica entre a constante dielétrica ( $k$ ) e a umidade com base em volume, fundamentada em dados experimentais de laboratório.

Assim como a umidade, a determinação da porosidade do solo por meio do georadar vem sendo estudada por diversos pesquisadores. Greaves et al. (1996), por exemplo, apresentam relações entre as velocidades intervalares e o conteúdo de água em amostras de solo ou rochas permitindo inferir porosidade em solos arenosos.

Além da técnica geofísica que envolve o emprego do GPR para determinação de atributos de solo por meio de reflexão, vários pesquisadores têm utilizado o Método Indexado de Refração Complexa (CRIM) (WYLLIE e GREGORY, 1953), para determinar a constante dielétrica do solo, permitindo assim, fazer inferências sobre as propriedades do mesmo.

De acordo com Junior e Medeiros (2008), o modelo CRIM é comumente usado na interpretação de perfis geofísicos de poços para determinar a velocidade das ondas acústicas em meios porosos. Posteriormente, este método foi expandido e adaptado para ondas eletromagnéticas.

Assim, este trabalho foi desenvolvido com o objetivo de avaliar atributos físicos em área cultivada com cana-de-açúcar utilizando o georadar associado à equação CRIM, assim como, sua correlação com os métodos laboratoriais convencionais.

## 2. Metodologia de Trabalho

O trabalho foi desenvolvido no município de Bom Sucesso, estado do Paraná, em área utilizada há 15 anos com a cultura da cana-de-açúcar, limitada pelas coordenadas UTM 51° W.G., 422150 m – 422450 m e 7381350 m – 7381550 m do Equador. Sua altitude média é de 580 metros. O solo estudado foi classificado como LATOSSOLO VERMELHO eutroférico (LVef) textura argilosa/muito argilosa, segundo Embrapa (2006), apresentando 681 g kg<sup>-1</sup> de argila no horizonte A e 794 g kg<sup>-1</sup> no horizonte B.

O clima da região é classificado, segundo Köppen, como Cfa, sendo subtropical úmido mesotérmico com verões quentes e geadas menos frequentes que outras regiões do estado e tendência de concentração das chuvas nos meses de verão, sem estação época de seca definida. A precipitação anual situa-se em torno de 1500 a 1700 mm e a temperatura média entre 20 e 22 °C.

Foi delimitada na área de cana-de-açúcar uma parcela experimental com dimensão de 1 ha, onde foram estabelecidos dois transectos, sendo um na entrelinha de plantio, onde o tráfego de máquinas é mais intenso, e outro na linha de cana-de-açúcar, onde não há tráfego. Em cada transecto foram demarcados 10 pontos para coleta das amostras de solo indeformadas, respeitando espaçamento de 10 m entre pontos. Após terem sido realizadas estas amostragens, nestes mesmos pontos foram realizadas amostragens de solo deformadas para determinação da umidade gravimétrica e a investigação com o sistema GPR.

A amostragem indeformada para determinação da densidade e porosidade total do solo foi realizada utilizando-se amostrador de solo e cilindros volumétricos com 5 centímetros de altura e diâmetro, nas profundidades de 0-0,1 m, 0,1-0,2 m, 0,2-0,3 m, 0,3-0,4 m e 0,4-0,5 m. Foram obtidas 50 amostras de solo nas linhas da cultura e 50 nas entrelinhas.

Para determinação da umidade do solo no momento da leitura pelo georadar, foram realizadas amostragens com trado tipo holandês em todas as profundidades investigadas. As amostras foram acondicionadas em embalagens plásticas e armazenadas em caixas térmicas para evitar perda de água, sendo posteriormente enviadas ao laboratório. A umidade gravimétrica foi determinada segundo Embrapa (1997). Posteriormente, a umidade gravimétrica foi convertida em umidade volumétrica por meio da densidade do solo utilizando-se a expressão:

$$\theta = u * ds \quad (1)$$

onde:

$\theta$  = umidade volumétrica ( $m^3 m^{-3}$ )

$u$  = umidade gravimétrica ( $kg_{\text{água}} kg_{\text{solo}}^{-1}$ )

$ds$  = densidade do solo ( $Mg m^{-3}$ );

A determinação da porosidade total foi realizada segundo Embrapa (1997) utilizando-se mesa de tensão (-0,006 MPa) para a drenagem das amostras indeformadas. A densidade do solo foi determinada de acordo com Embrapa (1997).

Para obtenção dos dados geofísicos foi utilizado o aparelho GPR Ramac - X3M da empresa Mala GeoScience composto por antena blindada de  $5,0 \times 10^8$  Hz, unidade de controle e computador portátil para geração dos radargramas.

Os trabalhos de campo com o georadar foram realizados nas mesmas profundidades investigadas com trado e cilindro volumétrico, para posterior avaliação de correlação com os resultados de umidade e porosidade total do solo, determinados pelo laboratório. Os dados foram adquiridos com antena blindada, sendo esta deslocada sobre a superfície do terreno, em contato direto com os pontos de aquisição das amostras indeformadas.

Em cada profundidade investigada foi necessário produzir uma reflexão (hipérbole) com o auxílio de um cilindro de aço maciço de 0,07 m de diâmetro e 0,1 m de altura, de forma a indicar, na seção GPR, a velocidade de propagação da onda para posterior cálculo da constante dielétrica (K) pela seguinte expressão:

$$v = c/\sqrt{k} \quad (2)$$

no qual:

$v$  = velocidade da onda eletromagnética no meio (solo) determinada pelo GPR;

$c$  = velocidade da onda eletromagnética no espaço livre ( $3,0 \times 10^8$  m s<sup>-1</sup>);

$k$  = constante dielétrica para o solo.

A utilização do cilindro fez-se necessária uma vez que a falta de variação na constante dielétrica do meio com a profundidade representou interfaces de baixa refletividade, sem a geração, ou com a geração de reflexões fracas, conforme descrito por Prado (2000).

Para obter a maior razão sinal/ruído e a melhoria dos registros durante a aquisição dos perfis GPR em campo, foram utilizados 512 Stacks (empilhamento). Esta escolha foi baseada em comparações entre registros obtidos com diferentes números de empilhamentos de sinais na área experimental.

O número de amostras coletadas foi de 512, com uma janela de tempo de  $7,6 \times 10^{-8}$  s, intervalo de amostragem de 0,05 m e frequência de amostragem de  $6,718 \times 10^9$  Hz. Após a

aquisição dos dados brutos, utilizando-se o software Ramac Groundvision, estes foram processados por meio do software Reflexw versão 4.5.5.

O tratamento dos radargramas consistiu na aplicação do filtro subtract-DC-shift para recuperação dos sinais em termos visuais, devido às perdas energéticas e espectrais decorrentes da propagação da onda até o seu registro no receptor (PRADO, 2000). No entanto, nenhum ganho foi aplicado durante o processamento dos dados, em face de não terem sido observadas diferenças na resolução ou profundidade de investigação quando comparadas à seção original obtida com a antena de  $5,0 \times 10^8$  Hz, e a seção resultante da aplicação de ganho.

Após a determinação da constante dielétrica ( $k$ ), esta foi aplicada na equação semi-empírica CRIM para estimativa da porosidade total ( $n$ ). No caso da mistura trifásica formada por grão de argila, ar e água, o modelo resulta na seguinte expressão (GUÉRGUEN e PALCIAUSSKAS, 1994).

$$\sqrt{k} = nS_r \sqrt{k_f} + (1-n)\sqrt{k_g} + n(1-S_r)\sqrt{k_{ar}} \quad (3)$$

no qual:

$k$  = constante dielétrica relativa ao solo determinada pela expressão 2;

$k_f$ ,  $k_g$  e  $k_{ar}$  = constantes dielétricas do fluido dos poros (água), do grão mineral e do ar, respectivamente;

$n$  = porosidade total preenchida por água;

$S_r$  = saturação da amostra por água (fração de espaço dos poros preenchida com água) determinada pela expressão:

$$S_r = \frac{\theta}{P_t} \times 100 \quad (4)$$

no qual:

$\theta$  = umidade volumétrica ( $m^3 m^{-3}$ ) obtida pela expressão 1;

$P_t$  = porosidade total ( $m^3 m^{-3}$ ) obtida de acordo com Embrapa (1997).

Os valores da constante dielétrica para água ( $k_f = 81$ ), constante dielétrica para o ar ( $k_{ar} = 1$ ) e constante dielétrica do grão mineral ( $k_g = 5$ ) foram definidos conforme Davis e Annan (1989).

Em seguida, após a determinação da porosidade total ( $n$ ), foi possível utilizar este valor para estimar indiretamente a umidade volumétrica por meio da expressão 5, proposta por Junior e Medeiros (2008):

$$\theta = S_r * P_t \quad (5)$$

no qual:

$P_t$  ( $n$ ) = porosidade total do solo determinada pela expressão 3.

$S_r$  = Saturação da amostra determinada pela expressão 4.

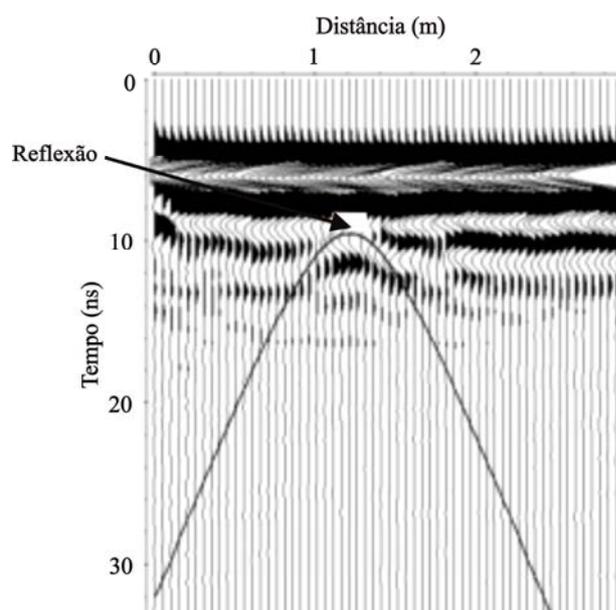
Assim, os resultados de  $P_t$  e  $\theta$  estimados por meio de técnicas geofísicas foram correlacionados com os obtidos em laboratório pelos métodos tradicionais.

A análise estatística aplicada aos resultados estimados (métodos geofísicos) e obtidos em laboratório foi realizada por meio do confronto de médias, duas a duas, utilizando-se o teste t de Student a 5% de probabilidade. A correlação entre ambos os métodos foi realizada no programa estatístico SAS (SAS, 1999).

### 3. Resultados e Discussão

Os resultados obtidos por meio do georadar mostraram que o mesmo não obteve resposta satisfatória nas investigações rasas até a profundidade de 0,4 m, seja pela baixa frequência da antena, pela textura muito argilosa do solo ou pela zona rasa de interferência que acabaram interferindo nos dados, tornando-os confusos.

A profundidade que melhor atendeu as investigações foi o intervalo de 0,4 a 0,5 m, sendo esta, portanto, utilizada para a discussão dos dados. Nesta profundidade, as reflexões geradas pelo cilindro de aço no formato de hipérbolas mostraram-se mais nítidas, possibilitando a determinação das velocidades de propagação das ondas, as quais por meio da expressão 2 deram origem as constantes dielétricas do solo (Figura 1).



**Figura 1** . Reflexão produzida pelo cilindro de aço em cada profundidade de trabalho, para determinação da velocidade de propagação das ondas eletromagnéticas, as quais, posteriormente, proporcionaram a determinação da constante dielétrica do solo.

Os resultados de porosidade total e umidade volumétrica obtidos por meio das análises laboratoriais também foram avaliados no intervalo de profundidade de 0,4 a 0,5 m, para que pudessem ser correlacionados com os resultados obtidos pelas técnicas geofísicas.

A análise estatística realizada por meio do teste t mostrou que houve diferença significativa, em nível de 5% de probabilidade, entre a média de porosidade total determinada por métodos geofísicos (GPR + CRIM) e o método tradicional (laboratório). O mesmo resultado pôde ser observado para a umidade volumétrica no intervalo de profundidade 0,4-0,5 m (Tabela 1).

**Tabela 1** – Teste t para  $P_t$  e  $\Theta$  obtidas por métodos geofísicos e laboratoriais no intervalo de 0,4 a 0,5 m.

Variáveis	Profundidade (m)	Média $\pm$ Ep		Valor de p
		Laboratório	GPR+CRIM	
P. total ( $m^3 m^{-3}$ )	0,4~0,5	$0,576 \pm 0,005$	$0,482 \pm 0,021$	0,000135*
U. volumétrica ( $m^3 m^{-3}$ )	0,4~0,5	$0,419 \pm 0,012$	$0,363 \pm 0,013$	0,00259*

\* significativo a 5% de probabilidade pelo teste t de Student.

Ep: erro padrão da média.

Este resultado pode ser explicado pelas limitações encontradas quanto ao uso do equipamento nos trabalhos de campo. Pelo fato do georadar ser um aparelho muito sensível a presença de sais em solução, e, por tratar-se do quinto ano seguido de cultivo com a cultura da cana-de-açúcar sem renovação da área plantada, a adubação localizada nas linhas associada à aplicação anual de vinhaça, prejudicaram a pesquisa com o GPR.

O potássio presente nos adubos e na vinhaça, a qual, segundo Demattê et al. (2003) é rica neste nutriente pode aumentar a condutividade do meio devido aos íons dissolvidos nos poros, causando assim, forte atenuação das ondas eletromagnéticas, como observado por Pereira et al. (2003). O resultado da análise química na área de estudo mostrou conteúdo elevado de potássio segundo Van Raij et al. (1997), com valor médio de  $1,29 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$  nas linhas e  $0,76 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$  nas entrelinhas de cana-de-açúcar, corroborando assim, a discussão anterior.

Da mesma forma, a grande quantidade de argila encontrada nos horizontes A e B ( $680,5 \text{ g kg}^{-1}$  e  $794,4 \text{ g kg}^{-1}$  respectivamente) atenuou a propagação dos campos de ondas eletromagnéticas devido a sua elevada condutividade, reduzindo a profundidade de investigação com esse tipo de equipamento, estando em conformidade com Davis e Annan (1989) e Moura et al. (2006).

Estas características encontradas na área pesquisada levaram à imprecisão nos radargramas das velocidades de chegada da onda refletida no solo, que são utilizadas para o cálculo da constante dielétrica, gerando valor de constante dielétrica ( $k = 3,7$ ) não compatível com a realidade da área estudada ( $k = 5$  a  $40$ ) como preconizado por Davis e Annan (1989). Assim, a soma destes dois fatores (elevada quantidade de argila e presença de sais em solução principalmente potássio) no decorrer do perfil acabaram influenciando na determinação da constante dielétrica ( $k$ ).

Portanto, quando  $k$  foi aplicada na equação CRIM, os valores encontrados de porosidade total e, posteriormente, umidade volumétrica, foram mascarados, apresentando estimativa incorreta. Tal fato é confirmado pela baixa correlação existente entre os dados do georadar associados à equação CRIM e aqueles obtidos por meio de análises laboratoriais (Tabela 2).

**Tabela 2** - Correlação entre os dados de porosidade total e umidade volumétrica obtidos por métodos geofísicos e laboratoriais.

Variáveis	P. total observada ( $\text{m}^3 \text{ m}^{-3}$ )	U volumétrica observada ( $\text{m}^3 \text{ m}^{-3}$ )
P. total estimada ( $\text{m}^3 \text{ m}^{-3}$ )	$r = 0,58^{**}$	-
U. volumétrica estimada ( $\text{m}^3 \text{ m}^{-3}$ )	-	$r = 0,59^{**}$

\*\* significativo ao nível de 1% de probabilidade.

- não foram realizadas correlações entre as variáveis.

Por outro lado, quando se analisa os dados por meio dos métodos tradicionais, não existe influência dos sais ou do teor de argila nos valores encontrados para porosidade total ou umidade volumétrica. Uma vez que as amostras são submetidas à avaliação em laboratório existem metodologias diferenciadas para determinação destes parâmetros (EMBRAPA, 1997), enquanto a medida direta no campo utilizando GPR apresenta limitações pela influência de vários fatores (PRADO, 2000), já que o feixe de onda se propaga por uma faixa de solo que apresenta propriedades atenuantes como dispersão geométrica da frente de ondas, efeito de polarização (absorção) e dispersões que não podem ser controladas (AGUIAR, 2005).

Esta diferença existente entre as limitações metodológicas ocorridas durante as investigações é o principal fator que explica a baixa correlação para os valores de  $P_t$  e  $\Theta$  determinados por métodos geofísicos e métodos tradicionais, discordando de Causse e Sénéchal (2006). Com base nos resultados obtidos, pode-se afirmar que o GPR ainda não está apto a ser utilizado em ambientes constituídos por solos argilosos, quando se objetiva quantificar umidade do solo e porosidade total.

#### 4. Conclusões

1. O GPR e a equação CRIM associados, não se mostraram capazes de determinar com confiabilidade a porosidade total e umidade volumétrica do solo;
2. Os resultados de porosidade total e umidade volumétrica obtidos por métodos geofísicos diferenciam-se estatisticamente daqueles obtidos em laboratório;
3. A elevada quantidade de argila no horizonte A e B associada aos sais em solução principalmente o potássio prejudicaram a determinação dos atributos físicos por meio de técnica geofísica;
4. A correlação entre as técnicas geofísicas e métodos laboratoriais foi baixa, não sendo possível em tais condições utilizá-las.

#### Agradecimentos

À CAPES pela concessão de bolsa de Mestrado ao primeiro autor, ao CNPq pela bolsa de Produtividade (Proc. n.310948/2006-1) ao segundo autor e bolsa de doutorado (Proc. n.134501/2004-7) ao terceiro autor.

#### Referência bibliográfica

- AGUIAR, J. C. M. Radar de penetração no solo (GPR): Aspectos geofísicos e geodésicos processamento e análise em pavimento flexível. 2005. 128f. Dissertação (Mestrado em Ciências Geodésicas e Tecnologia da Informação) - Universidade Federal de Pernambuco, Pernambuco. 2005.
- Aquino Lemos Filho, L. C. de.; Oliveira, E. L. de. Faria, M. A. de.; Bastos Andrade, L. A. de. Variação espacial da densidade do solo e matéria orgânica em área cultivada com cana-de-açúcar (*Saccharum officinarum* L.). **Revista Ciência Agronômica**, v.39, n.2, p. 193-202, 2008.
- Causse, E.; Sénéchal, P. Model-based automatic dense velocity analysis of GPR field data for the estimation of soil properties. **Journal of Geophysics and Engineering**, v.3, n.2, pp.169-176, 2006.
- Davis, J. L.; Annan, A. P. Ground-penetrating radar for high-resolution mapping of soil and rock stratigraphy. **Geophysical Prospecting**, v.37, n.5, p. 531–551, 1989.
- Demattê, J. A. M.; Gama, M. A. P.; Cooper, M.; Araújo, J. C.; Nanni, M. R.; Fiorio, P. R. Effect of fermentation residue on the spectral reflectance properties of soils. **Geoderma**, v.120, n.3-4, p. 187-200, 2004.
- Embrapa. CNPS. **Sistema brasileiro de classificação de solos**. 2.d. Brasília, 2006. 412p.
- Embrapa. CNPS. **Manual de métodos de análises de solos**. 2ed. Rio de Janeiro, 1997. 212p.
- Fialho, J. S.; Gomes, V. F. F.; Oliveira, T. S. de.; Silva Junior, J. M. T. da. Indicadores da qualidade do solo, em sistemas de rotação, na chapada do Apodi – CE. **Revista Ciência Agronômica**, v. 39, n.3, p.353-361, 2008.
- Galagedara, L. W.; Parkin, G. W. An Analysis of the GPR Direct Ground Wave Method for Soil Water Content Measurement. **Hydrological Processes**, v.17, n.18, p. 3615–3628, 2003.
- Greaves, R. J.; Lesmes, D. P.; Lee, J. M.; Toksoz, M. N. Velocity variations and water content estimated from multioffset, ground-penetrating radar. **Geophysics**, v.61, n.3, p. 683-695, 1996.
- Grote, K.; Hubbard, S. S.; Rubin, Y. Field-scale estimation of volumetric water content using GPR groundwave techniques. **Water Resources Research**, v.39, n.11, 2003.

Guérguen, Y.; Palciauskas, V. **Introduction to the Physics of rocks**. Princeton University Press. New Jersey, 1994. 293 p.

Hubbart, S.; Grote, K.; Rubin, Y. Mapping the volumetric soil water content of a California vineyard using high-frequency GPR ground wave data. **The Leading Edge Explor**, v.21, n.6, p.552-559, 2002.

Huisman, J. A.; Bouten, W. Accuracy and Reproducibility of Mapping Surface Soil Water Content with the Ground Wave of Ground-Penetrating Radar. **Journal of Environmental and Engineering Geophysics**, v.8, n.2, p. 67–75, 2003.

Huisman, J. A.; Hubbard, S. S.; Redman, J. D.; Annan, A. P. Measuring Soil Water Content with Ground Penetrating Radar: A Review. **Vadose Zone Journal**, v.2, p.476–491, 2003.

Moura, M. V. M.; Pérez, Y. A. R.; Gauw, D. S. de.; Santos Silva, D. A. dos.; Medeiros Souza, A. de.; Meireles Reis Pelosi, A. P. de.; Lima Filho, F. P. Levantamento geofísico com GPR em um campo de dunas eólicas em Tibau do Sul/RN. **Revista de Geologia**, v. 19, n.1, p. 99-108, 2006.

Junior, J. G. O.; Medeiros, W. E. Influência do conteúdo de água, granulometria e minerais pesados sobre as reflexões de gpr em corpos arenosos inconsolidados. **Revista Brasileira de Geofísica**, v.26, n.4, p.437-449, 2008.

Paixão, M. S. G.; Prado, L. R.; Diogo, L. A. **Análise** do emprego do GPR para estimar o teor de umidade do solo a partir de um estudo na cidade de São Paulo. **Revista Brasileira de Geofísica**, v.24, n.2, p.189-198, 2006.

Prado, R. L. A sísmica de reflexão rasa e o radar de penetração no solo na investigação geológico-geotécnica em ambientes urbanos. Um estudo na cidade de São Paulo - SP, Brasil. 2000. 177f. Tese (Doutorando em Geociências)- Universidade Estadual Paulista, Rio Claro. 2000.

Pereira, A. J.; Gâmbôa, L. A. P.; Silva, M. A. M. da.; Rodrigues, A. R.; Costa, A. da. A utilização do Ground Penetrating Radar (GPR) em estudos de estratigrafia na praia de Iataipuaçu - Maricá (RJ). **Revista Brasileira de geofísica**, v.21, n.2, pp. 163-172, 2003.

Sas Institute. **Statistical Analysis System Institute. Procedure guide for personal computers**. Version 5, Cary, 1999.

Topp, G. C.; Davies, J. L.; Annan, A. P. Electromagnetic determination of soil water content: measurements in coaxial transmission lines. **Water Resources Research**, v.16, n.3, p.574–582, 1980.

Van Raij, B.; Catarella, H.; Quaggio, J. A.; Furlani, A. M. C. Recomendações de adubação e Calagem para o Estado de São Paulo. **Campinas. Instituto Agrônomo/Fundação IAC– Boletim Técnico**, v.100, 1997. 285 p.

Wyllie, M. R. J.; Gregory A. R. Formation factors of unconsolidated porous media: influence of particle shape and effect of cementation. **Petroleum Transactions AIME**, v.198, n. 223, p. 103–110, 1953.