

Uso de GPR na avaliação de atributos de solo em área sob plantio de cana-de-açúcar

Everson Cezar¹
Marcelo Luiz Chicati¹
Felipe Derbocio Fabro¹
Fernando Teruhiko Hata¹
Marcos Rafael Nanni¹
Roney Berti de Oliveira¹
Edson Cristiano Groff¹

¹ Universidade Estadual de Maringá, Departamento de Agronomia,
Av. Colombo, 5790, CEP 87020-900, Maringá, PR - Brasil.

eversoncezar@yahoo.com.br
mlchicati@yahoo.com.br
felipe_fabro@hotmail.com
prox_fdinhu@hotmail.com
mrnanni@uem.br
roneyberti@yahoo.com.br
ecgroff@hotmail.com

Abstract. The study purpose is to evaluate the usability of the GPR (Ground Penetrating Radar) in detection of compacted soil layers, as well the possibility of application in studies of subsurface research. The searches were carried out in two areas used for several years with the sugar cane growing, which have received the same management over time. Soil samples were obtained with volumetric cylinder in depths of 0-0,10 m, 0.10-0.20 m; 0.20-0.30 m; 0,30-0,40 m 0.40 at 0,50 meters over three transept by area, one referring to the lines and two lines. The results obtained were applied to semi-empirical equation of Crim for obtaining the possible outcome that would be determined by geophysical GPR. The values generated by georadar for the two areas had to be close of those obtained by the Crim equation for the treatments, when considering the package of ground to the range of 0.40 to 0.50 meters. However, the more superficial layers of soil could not be assessed due to technical limitations of equipment associated physical and chemical conditions of soil, which undermined the reflections. The GPR was able to detect density differences in the profile, when confronted with between rows, but it was not possible to determine which would be compacted layers. The results showed that the radar can be effective in some soil studies when combined with other methods, but alone this technique needs further studies in addition to improvements by the equipment.

Keywords: soil, geophysical, CRIM, reflection, radargrams, solo, geofísica, CRIM, reflexão, radargramas

1. Introdução

A cana-de-açúcar (*Saccharum officinarum*) é uma gramínea que possui grande importância econômica para o Brasil sendo este o maior produtor mundial desta cultura, por fornecer a matéria prima para a produção de açúcar e de álcool, além de exercer um papel relevante tanto no mercado interno quanto externo. No Brasil, a cultura da cana-de-açúcar está instalada em uma área de aproximadamente seis milhões de hectares, produzindo mais de 410 milhões de toneladas por ano, que são destinados, principalmente, para a fabricação de açúcar e álcool, além de outros produtos e subprodutos.

Nos últimos anos tem se observado um aumento crescente na área plantada e na produção, o que coloca o Brasil atualmente, como maior produtor mundial. Porém, faz-se fundamental a pesquisa para que o setor produtivo explore melhor o potencial da cultura e do ambiente de produção. A produtividade final da cana-de-açúcar, seja planta ou soca, está relacionada a fatores ambientais, genéticos, fisiológicos e de manejo da cultura. Estes diferentes fatores interagem continuamente durante todo o desenvolvimento da planta.

Além destes, a distribuição e penetração das raízes são fundamentais para o estabelecimento e o crescimento cultural. A literatura relata casos de limitações em produtividade nas culturas devido à restrição ao crescimento do sistema radicular causado por formação de camadas compactas no perfil cultural, resultando em dificuldade de aeração do solo e a absorção de água e de nutrientes. A densidade se apresenta como um dos parâmetros que requer maior atenção, uma vez que seu aumento levará a uma compactação do solo, prejudicando desta forma o desenvolvimento do sistema radicular.

Para a avaliação deste fator muitos pesquisadores utilizam a técnica do cilindro volumétrico, com bordas cortantes e volume conhecido por ser uma das mais utilizada e difundida. Porém, trata-se de um método destrutivo e trabalhoso, que deve ser executado com perícia e cautela, para evitar possíveis erros de amostragens por parte do operador, assim como, por parte do técnico de laboratório.

Surge então, a necessidade de se desenvolver novos métodos de avaliação das características físicas dos solos, com o objetivo de substituir ou auxiliar os métodos já existentes, visando tornar o trabalho mais rápido e operacional. Assim sendo, o GPR (*Ground Penetrating Radar*), pode ser uma ferramenta importante no auxílio do estudo dos solos em subsuperfície, trazendo inovação na forma de trabalho.

A técnica GPR, tem a finalidade de detectar objetos e camadas de materiais distintos, através do contraste entre as propriedades dielétricas desses materiais. É um equipamento da mais avançada tecnologia que tem sido usado na última década na investigação e diagnóstico, de maneira totalmente não destrutiva, de elementos estruturais em vários sectores da construção civil. O grande sucesso e eficácia demonstrados devem-se à rapidez de aquisição dos dados e dos resultados, aos custos mais baixos, quando comparados com outras técnicas de ensaio destrutivas, semidestrutivas e não destrutivas.

Seu funcionamento encontra-se baseado na emissão e recepção de ondas eletromagnéticas pelas antenas transmissoras e receptoras, com posterior armazenamento dos dados na forma de traços que dão origem aos radargramas. De acordo com vários pesquisadores o uso do GPR é promissor com elevadas potencialidades para utilização. Comparado aos métodos tradicionais de observação dos solos, as técnicas GPR, são mais rápidas, mais econômicas com menor probabilidade de omissão de características de subsuperfície e não são destrutivas.

2 . Material e Métodos

A área de estudo localiza-se no noroeste do estado do Paraná, no município de Bom Sucesso (PR). As coordenadas geográficas são 23°40' de latitude sul e 51°46' de longitude oeste. Sua altitude média é de 580 metros tendo como referência altimétrica o Marégrafo de Imbituba. O clima da região é classificado segundo Koppen, como Cfa, sendo subtropical úmido mesotérmico com verões quentes e geadas menos frequentes que outras regiões do estado, com tendência de concentração das chuvas nos meses de verão, sem estação seca definida. A média de precipitação anual apresenta-se em torno de 1200 a 1300 mm, sendo o período mais chuvoso de dezembro a fevereiro e o mais seco de junho a agosto. Os verões são quentes com a temperatura média anual entre 20 e 22 °C.

A área experimental esta sob cultivo de cana-de-açúcar há mais de dez anos. O solo foi classificado como LATOSSOLO VERMELHO eutroférico textura muito argilosa (LVef) segundo Embrapa (1999). Foram separados três transeptos numa área de 100 x 100 m totalizando 1 ha (Figura 1).

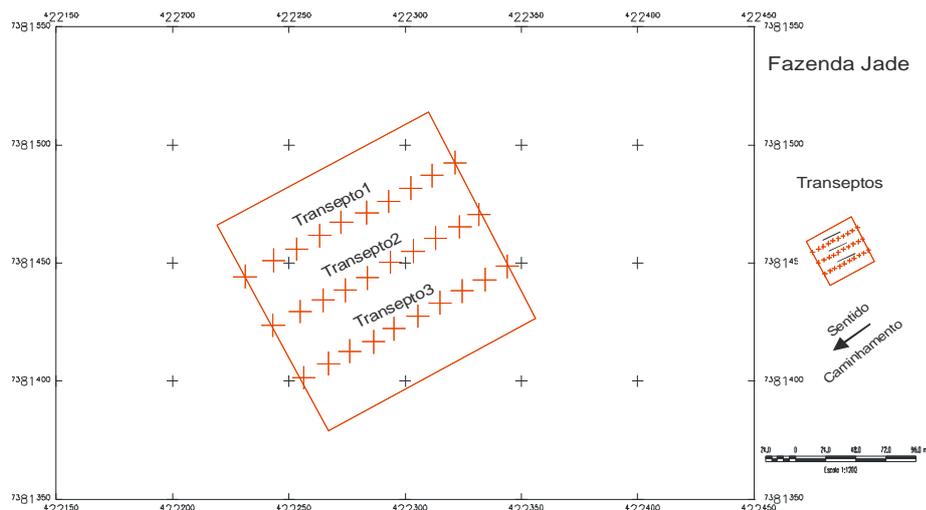


Figura 1 - Divisão da área experimental na fazenda Jade

As amostras de solo indeformadas assim como as deformadas foram coletadas em intervalos regulares de 10 m, nas profundidades de 0-0,10 m, 0,10-0,20 m, 0,20-0,30 m, 0,30-0,40 m e 0,40-0,50 m para cada transepto. Foram utilizados amostradores de solo e cilindros volumétricos (Kiehl, 1979), com o objetivo de determinar a densidade e porosidade. A determinação da umidade base massa foi realizada de acordo com Embrapa (1997).

A existência de compactação nas linhas e entre linhas foram primeiramente avaliadas através de gráfico gerados a partir do programa Excel. Em outra frente de trabalho, aplicaram-se dados físicos e geofísicos na equação de CRIM, a fim de estimar possíveis valores de velocidade de propagação das ondas eletromagnéticas no solo, tempo para propagação da onda e valor da constante dielétrica (K), que teoricamente deveria ser encontrados com o georadar.

A equação de CRIM é uma equação semi-empírica que relaciona a constante dielétrica de um meio com a porosidade (n) preenchida por água. Para uma mistura com três fases, a vagarosidade obtida para o material pode ser expressa pela soma em série das diferentes fases:

$$\sqrt{\varepsilon_m} = nS_r\sqrt{\varepsilon_f} + (1 - n)\sqrt{\varepsilon_g} + n(1 - S_r)\sqrt{\varepsilon_{ar}} \quad (1)$$

onde ε_m , ε_f e ε_g são as constantes dielétricas relativas do meio, do fluido dos póros e do grão mineral, ε_{ar} é uma variável correspondente à constante dielétrica para o ar e S_r a saturação por água. Foram atribuídos valores a essas constantes dielétricas envolvidas no estudo. Baseado em Daniels (1996); Davis e Annan (1989) e Schon (1996), considerou-se constante dielétrica para água (ε_f): 81; constante dielétrica para o ar (ε_{ar}): 1 e constante dielétrica do solo (ε_g): 5.

A investigação geofísica a campo foi realizada com GPR modelo Ramac X3M da empresa Sueca malâ GeoScience, com antena blindada de 500MHz. Foram feitas aquisições de dados nos mesmos locais onde anteriormente haviam sido retiradas amostras deformadas (determinação da umidade base massa) e indeformadas (determinação das densidades e porosidades). Em cada profundidade investigada foi necessário produzir uma reflexão, de preferência uma hipérbole, a partir de um cilindro de ferro em subsuperfície, de forma a indicar na seção GPR, a medida do tempo duplo de percurso e a velocidade de propagação da onda eletromagnética no meio.

Para obter a maior razão sinal/ruído assim como a melhoria dos registros durante a aquisição dos perfis GPR, foi utilizado o valor de 512 Stacks (empilhamento), assim como

feito por Porsani et al. (2004). Esta escolha foi baseada em comparações entre registros obtidos com diferentes números de empilhamentos de sinais na área experimental. O número de amostras utilizado foi de 512, com uma janela de tempo de 76 nanosegundos (ns), intervalo de amostragem a cada 0,05 metros e frequência de amostragem de 6718 MHz. Após a aquisição dos dados brutos, estes foram convertidos em dados processados. O tratamento dos radargramas consistiu na aplicação do filtro subtract-DC-shift, com intervalo de 0 a 70 ns, para recuperação dos sinais em termos visuais, devido às perdas energéticas e espectrais decorrentes da propagação da onda até o seu registro nos receptores, de acordo com Prado (2000).

A interpretação das reflexões foi baseada nas hipérboles geradas a partir do objeto introduzido em subsuperfície. Após a determinação das velocidades baseada nestas reflexões, os resultados foram aplicados a equação 2 para determinação de K. De acordo com Davis e Annan (1989) a velocidade de propagação da onda obtida em campo pode ser usada para estimar a constante dielétrica para o meio. Na banda de frequências empregada pelo método GPR a velocidade de propagação da onda eletromagnética é principalmente determinada pela constante dielétrica (K).

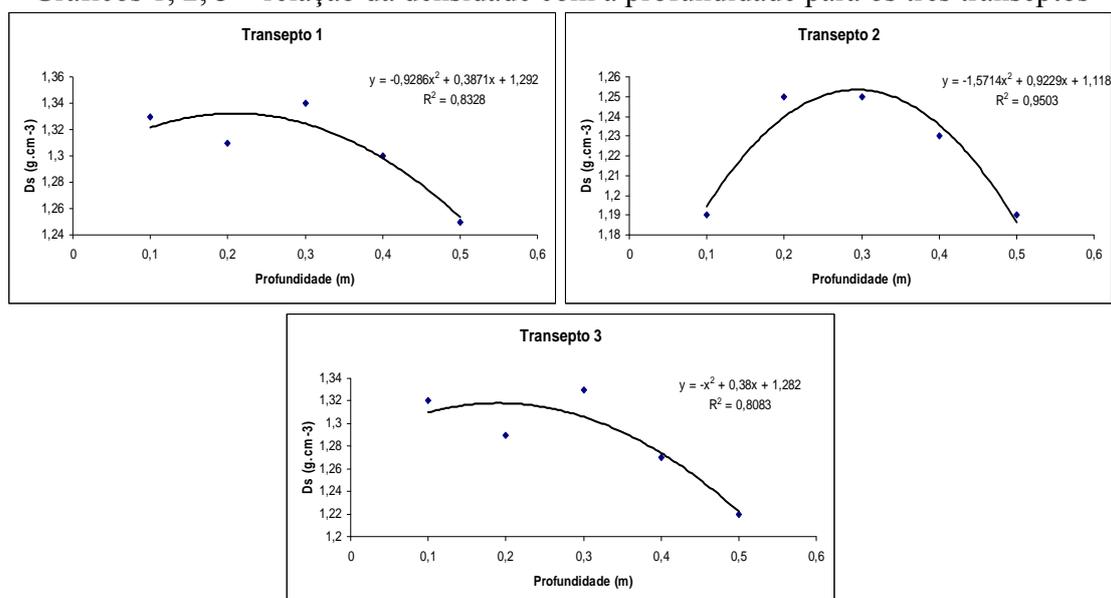
$$V = c/\sqrt{K} \quad (2)$$

onde c (velocidade da luz = 0,3 m/ns) é a velocidade da onda eletromagnética no espaço livre segundo Davis e Annan (1989), K é a constante dielétrica e V a velocidade da onda eletromagnética no solo.

3 . Resultados e Discussão

Os resultados obtidos através do Excel indicaram a presença de densidades mais elevadas nas entrelinhas em relação às linhas, principalmente na profundidade de 0,30 m (Gráficos 1, 2 e 3). Este fato ocorreu porque o tráfego de máquinas e equipamentos foi mais intenso nestes locais, concordando assim com Soane et al. (1981) e Marsili et al. (1998).

Gráficos 1, 2, 3 – relação da densidade com a profundidade para os três transeptos



Os valores de densidades encontrados para todos os intervalos de profundidades nas entrelinhas mostraram-se próximos ao limite crítico (1,4 a 1,8 g.cm⁻³) segundo Reynolds et al. (2002), o que indica presença de compactação, com ênfase na profundidade citada. Os valores de r² acima de 0,80 para todos os transeptos mostraram que mais de 80% das variações nas densidades foram explicadas pelas variações existentes nas profundidades.

Os resultados apresentados pela equação de CRIM mostraram que as velocidades de propagação das ondas eletromagnéticas, teoricamente deveriam ser maiores nas entrelinhas onde a umidade é menor, e menor nas linhas onde a umidade é maior, sendo corroborado por Davis e Annan (1989). Da mesma maneira K deveria ser menor nas entrelinhas e maior nas linhas, fato este relacionado com a atenuação sofrida pela onda em locais de maior umidade (Tabelas 1, 2 e 3).

Tabela 1. Resultados geofísicos esperados para o transepto 1 (Entrelinha)

(K) médio	Raiz (K _m)	V (m/ns)	**C (m/ns)	Profundidade (m)	Média. Ponderada	(K) CRIM	Raiz (K _c)	V (m/ns)	T (ns)
17,965	4,239	0,071	0,3	0,1	1,796	20,059	4,479	0,067	11,943
19,533	4,42	0,068	0,3	0,1	1,953	20,059	4,479	0,067	11,943
21,083	4,592	0,065	0,3	0,1	2,108	20,059	4,479	0,067	11,943
20,177	4,492	0,067	0,3	0,1	2,018	20,059	4,479	0,067	11,943
21,534	4,641	0,065	0,3	0,1	2,153	20,059	4,479	0,067	11,943
---	---	---	---	0,5	10,029	---	---	---	---
---	---	---	---	Soma	20,059	---	---	---	---

** (c) velocidade da onda eletromagnética no espaço livre (Davis e Annan, 1989); (K) constante dielétrica de CRIM; (v) velocidade da onda; (T) tempo de propagação da onda

Tabela 2. Resultados geofísicos esperados para o transepto 2 (Linha)

(K) médio	Raiz (K _m)	V (m/ns)	**C (m/ns)	Profundidade (m)	Média. Ponderada	(K) CRIM	Raiz (K _c)	V (m/ns)	T (ns)
18,593	4,312	0,07	0,3	0,1	1,859	23,024	4,798	0,0625	12,796
20,155	4,489	0,067	0,3	0,1	2,015	23,024	4,798	0,0625	12,796
23,905	4,889	0,061	0,3	0,1	2,391	23,024	4,798	0,0625	12,796
25,483	5,048	0,059	0,3	0,1	2,548	23,024	4,798	0,0625	12,796
26,984	5,195	0,058	0,3	0,1	2,698	23,024	4,798	0,0625	12,796
---	---	---	---	0,5	11,512	---	---	---	---
---	---	---	---	Soma	23,024	---	---	---	---

** (c) velocidade da onda eletromagnética no espaço livre (Davis e Annan, 1989); (K) constante dielétrica de CRIM; (v) velocidade da onda; (T) tempo de propagação da onda

Tabela 3. Resultados geofísicos esperados para o transepto 3 (Entrelinha)

(K) médio	Raiz (K _m)	V (m/ns)	**C (m/ns)	Profundidade (m)	Média. Ponderada	(K) CRIM	Raiz (K _c)	V (m/ns)	T (ns)
17,555	4,19	0,072	0,3	0,1	1,756	21,029	4,586	0,0654	12,228
18,831	4,339	0,069	0,3	0,1	1,883	21,029	4,586	0,0654	12,228
24,041	4,903	0,061	0,3	0,1	2,404	21,029	4,586	0,0654	12,228
22,387	4,732	0,063	0,3	0,1	2,239	21,029	4,586	0,0654	12,228
22,329	4,725	0,063	0,3	0,1	2,233	21,029	4,586	0,0654	12,228
---	---	---	---	0,5	10,514	---	---	---	---

---	---	---	---	---	21,029	---	---	---	---
-----	-----	-----	-----	-----	--------	-----	-----	-----	-----

** (c) velocidade da onda eletromagnética no espaço livre (Davis e Annan, 1989); (K) constante dielétrica de CRIM; (v) velocidade da onda; (T) tempo de propagação da onda

Com relação ao georadar, o mesmo não foi capaz de detectar o objeto refletor até a profundidade de 0,20 m por causa da zona rasa de interferência, sendo confirmado por Fischer et al. (1992). Para as profundidades de 0,20 a 0,40 m as reflexões geradas sofreram misturas com as ondas aéreas e diretas no solo, portanto, não foi possível analisar os radargramas produzidos para estas profundidades devido o risco iminente de erros. A quantidade de argila também foi um fator que prejudicou a interpretação dos radargramas devido à forte atenuação do sinal de radar, estando de acordo com Davis e Annan (1989). Desta forma, trabalhou-se com o intervalo de 0,40 a 0,50 m, onde as interferências foram menores.

Os valores adquiridos a campo mostraram-se próximos aos obtidos pela equação de CRIM, comprovando assim a relação entre ambos e a possibilidade de aplicação deste equipamento em investigações de subsuperfície (Tabela 4).

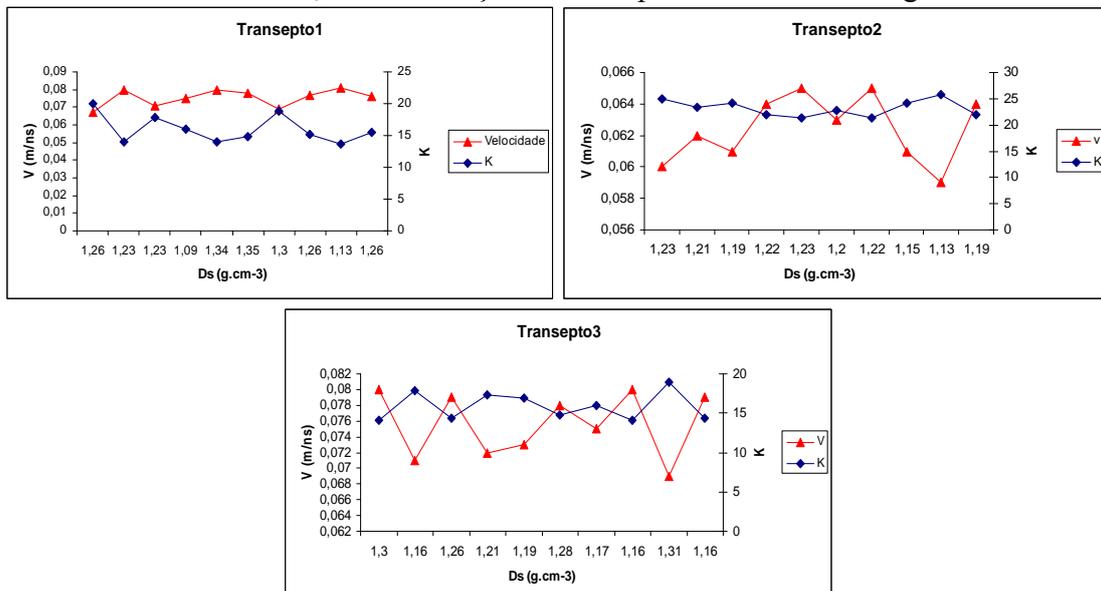
Tabela 4 . Resultados obtidos com a investigação geofísica para o intervalo de 0,40-0,50 m

Tratamentos	Profundidades (m)	$V_{média}$ (m/ns)	$T_{médio}$ (ns)	C. dielétrica _{média} (k)
Transepto1	0,40-0,50	0,075	10,75	16,02
Transepto2	0,40-0,50	0,062	12,83	23,19
Transepto3	0,40-0,50	0,076	10,61	15,88

(V) velocidade da onda; (T) tempo duplo para propagação da onda; (K) constante dielétrica

Os resultados apresentados pelo GPR mostraram que as velocidades médias de propagação das ondas foram menores nas linhas onde a porosidade total média e as umidades médias apresentaram-se maiores. Nas entrelinhas as velocidades médias foram maiores uma vez que a porosidade total média e as umidades médias foram menores. Os tempos para propagação das ondas no solo mostraram-se inversamente proporcionais as velocidades. Os valores de K por sua vez foram maiores nas linhas e menores nas entrelinhas, sendo corroborados por Greaves (1996), encontrando-se diretamente ligados a densidade do solo. Nos pontos onde as densidades médias foram maiores para o intervalo de profundidade estudado, os valores de K foram menores na maioria das vezes, devido à redução da porosidade total média, principalmente dos macropóros (Gráficos 4, 5 e 6)

Gráficos 4, 5 e 6 . Relação entre os parâmetros físicos e geofísicos



4. Conclusão

Após a avaliação criteriosa dos dados obtidos pelos três métodos que foram aplicados neste trabalho, e o cruzamento de informações entre os mesmos, pode-se concluir que:

- Não foi possível determinar a presença de compactação com o GPR em uma profundidade específica do perfil, e sim no pacote total de solo, considerando a profundidade de 0 a 0,50 m;
- Não foi possível determinar a presença de reflexão nítida nas profundidades de 0 a 0,10 m, 0,10 a 0,20 m, 0,20 a 0,30 m e de 0,30 a 0,40 m, devido à presença da zona rasa de interferência e mistura das ondas diretas e refletidas no solo;
- O GPR obteve resposta positiva quando passou a se avaliar o perfil como um todo, mostrando diferença nos parâmetros geofísicos encontrados para os tratamentos nas linhas e nas entrelinhas;
- Os resultados obtidos com a equação de CRIM, assim como os obtidos pelas análises físicas corroboraram o método geofísico, mostrando a proximidade entre os valores apresentados para ambos;
- O radar de solo não apresentou resposta satisfatória para investigações rasas;
- O alto teor de argila foi um fator que limitou a avaliação de todo o potencial do GPR, devido à atenuação das ondas eletromagnéticas durante a propagação no solo;
- A aplicação das três técnicas conjuntas confirma a hipótese de presença de compactação na área estudada
- O georadar pode ser utilizado em algumas situações quando em conjunto com outros métodos para detectar a presença de compactação, no entanto, ainda não é possível substituir o método do anel volumétrico pelo geofísico, necessitando de um período maior de estudo, assim como melhorias no próprio equipamento, a fim de diminuir as limitações operacionais.

5. Referências Bibliográficas

- Daniels, J. J. Surface penetrating radar. **Electronics & Communication Engineering Journal**, London, United Kingdom, v.8, 300 pp, 1996.
- Davis, J. L.; Annan, A. P. Ground-penetrating radar for high-resolution mapping of soil and rock stratigraphy. **Geophysical Prospecting**, v. 37, p. 531–551, 1989.
- Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. Embrapa. Centro Nacional de Pesquisa de Solos. **Manual de métodos de análises de solos**, 2º ed, Rio de Janeiro, 1997. 212p.
- Embrapa. **Sistema brasileiro de classificação de solos**. 1º ed, Brasília, 1999.
- Fisher, E.; Mcmechan, G. A.; Annan, A. P. Acquisition and processing of wideaperture ground-penetrating radar data. **Geophysics**. 57(3): p.495-504, 1992.
- Greaves, R. J. Velocity variations and water content estimated from multi-offset ground-penetrating radar. **Geophysics**, 61, n.3, p. 683–695, 1996.
- Marsili, A.; Servadio, P.; Pagliai, M.; Vignozzi, N. Changes of some physical properties of a clay soil following passage of rubber-and metal-tracked tractors. **Soil Till. Res**, 49:185-199, 1998.
- 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**. Tese (Doutorado em Geociências), Rio Claro, set/2000.
- Porsani, L. J.; Borges, R. W.; Elis, R. V.; Diogo, A. L.; Hiodo, Y. F.; Marrano, A.; Birelli, A. C. Investigações geofísicas de superfície e de poço no sítio controlado de geofísica rasa do IAG-USP. **Revista Brasileira de Geofísica**, v.22, n.3, São Paulo set/dez, 2004.

Reynolds, W. D.; Bowman, B. T.; Drury, C. F.; Tan, C. S.; Lu, X. Indicators of good soil physical quality: density and storage parameters. **Geoderma**, 110:131-146, 2002.

Soane, B. D.; Blackwell, P. S.; Dickson, J. W.; Painer, D. J. Compaction by agricultural vehicles: A review. I – soil and wheel characteristics. **Soil Till. Res**, 16:207-237, 1981.

Schon, J. H. Physical properties of rocks: Fundamentals and principles of petrophysics: tarrytown, New York. **Elsevier Science Inc**, p. 465–478, 1996.

Kiehl, E. J. **Manual da edafologia**. São Paulo, Editora Ceres, 1979. 262p.