

SEÇÃO I - FÍSICA DO SOLO

USO DE SISTEMA GPR (*GROUND PENETRATING RADAR*) NA AVALIAÇÃO DE ATRIBUTOS DE UM SOLO SOB PLANTIO DE CANA-DE-AÇÚCAR⁽¹⁾

Everson Cezar⁽²⁾, Marcos Rafael Nanni⁽³⁾, Marcelo Luiz Chicati⁽⁴⁾, Felipe Derbocio Fabrio⁽⁵⁾, Fernando Teruhiko Hata⁽⁵⁾ & Roney Berty de Oliveira⁽⁴⁾

RESUMO

O GPR utiliza técnica indireta para investigação das estruturas de subsuperfície, sendo caracterizado como método não-invasivo, o qual permite extrair informações ao longo do perfil de solo sem perfurar, sondar ou escavar. Este trabalho teve o objetivo de avaliar a utilização do GPR no estabelecimento de atributos físicos do solo em área de cultivo com cana-de-açúcar, além de estabelecer sua correlação com o método do cilindro volumétrico. A área de estudo está localizada no município de Bom Sucesso – PR, sendo utilizada com cultura da cana há mais de 20 anos. Foram obtidas amostras de solos indeformadas com cilindro volumétrico nas profundidades de 0–0,1, 0,1–0,2, 0,2–0,3, 0,3–0,4 e 0,4–0,5 m, ao longo de três transeptos paralelos, sendo o central referente à linha de plantio (transepto 2) e os outros dois correspondentes às entrelinhas laterais (transeptos 1 e 3). Os valores de densidade e porosidade total, obtidos por meio das amostras físicas, foram inicialmente interpretados para verificar o estado do solo nas linhas e nas entrelinhas de cana, nas cinco profundidades. Posteriormente, foram correlacionados com os valores das constantes dielétricas (K) adquiridos pelo georradar, porém apenas para a camada de 0,4–0,5 m, uma vez que as camadas superficiais até a profundidade de 0,4 m não puderam ser avaliadas devido às limitações técnicas do equipamento, aliadas às condições físicas e químicas do solo, que acabaram por prejudicar as reflexões. A densidade mostrou-se menor nas linhas, quando comparada às entrelinhas, para as camadas de 0–0,1 e 0,2–0,3 m. A porosidade total foi menor nas entrelinhas do que nas linhas na camada de 0–0,1 m. Os valores de K foram maiores nas linhas, onde a umidade e a porosidade total foram maiores, e menores nas entrelinhas, onde as densidades encontravam-

⁽¹⁾ Parte da Dissertação de Mestrado em Agronomia do primeiro autor. Universidade Estadual de Maringá – UEM. Recebido para publicação em janeiro de 2009 e aprovado em janeiro de 2010.

⁽²⁾ Mestrando em Agronomia, Universidade Estadual de Maringá – UEM. Av. Colombo 5790, CEP 87020-900 Maringá (PR). Bolsista CAPES. E-mail: eversoncezar@yahoo.com.br

⁽³⁾ Professor do Departamento de Agronomia, UEM. E-mail: mrnanni@uem.br

⁽⁴⁾ Doutorando em Agronomia, UEM. E-mails: mlchicati@yahoo.com.br; roneyberti@yahoo.com.br

⁽⁵⁾ Graduando em Agronomia, UEM. E-mails: felipe_fabro@hotmail.com; prox_fdinhu@hotmail

se próximas ao limite crítico. A correlação de K com a densidade e porosidade total não foi significativa. Pequenas modificações na porosidade do solo em função do aumento da densidade foram suficientes para diminuir o valor de K nas entrelinhas, devido à redução na quantidade de água nos poros. Esse fato pode ser confirmado pela correlação de K com a umidade. Assim, pode-se dizer que o georradar foi extremamente sensível à variação de umidade no solo, apresentando melhores resultados para esta variável do que para a densidade e porosidade total determinada por meio do cilindro volumétrico.

Termos de indexação: atributos físicos, constante dielétrica, reflexão.

SUMMARY: *EVALUATION OF SOIL PROPERTIES UNDER SUGAR CANE BY GPR (GROUND PENETRATING RADAR) SYSTEM*

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 study aimed to evaluate the use of GPR in the establishment of soil physical properties in a area under sugar cane, and its correlation with the volumetric cylinder method. The study area in Bom Sucesso, State of Paraná (Brazil), had been used for sugar cane cultivation for over 20 years. Undisturbed soil samples were obtained by the core method from the layers 0–0.1, 0.1–0.2, 0.2–0.3, 0.3–0.4 and 0.4–0.5 m, along three parallel transects, the central corresponding to the row of plantation (transect 2) and the outer two to the inter-rows (transects 1 and 3). Density and porosity were determined first based on physical samples to check the soil status in sugar cane rows and inter-row in the five layers. These values were subsequently correlated with the dielectric constant values (K) obtained by the GPR, although for the 0.4–0.5 m layer only; the surface layers to a depth of 0.4 m could not be assessed due to technical limitations of the equipment and physical and chemical soil properties, which ultimately invalidated the observations. The density in the inter-row was higher than in the planting row, with statistical differences between the layers 0–0.1 and 0.2–0.3 m. Total porosity was lower in the inter-rows, differing significantly from the rows in the 0–0.1 m layer. The K values were higher in the rows, where moisture and porosity were higher, and lower in the inter-rows, where the densities were close to the critical limit. The correlation of K with density and porosity was not significant. Small changes in soil porosity with increasing density were sufficient to decrease the K value in the inter-rows, due to the reduction in the water content in the pores. This fact was confirmed by the correlation of K with moisture. It can therefore be concluded that the GPR was extremely sensitive to soil moisture variations, with better results for this variable than for density and porosity determined by the volumetric cylinder.

Index terms: physical properties, dielectric constant, reflection.

INTRODUÇÃO

A cana-de-açúcar (*Saccharum officinarum*) é uma gramínea de grande importância econômica para o Brasil na produção de biocombustíveis, sendo ele o maior produtor mundial dessa cultura (Orlando Filho et al., 1995).

O Paraná ocupa no cenário nacional o segundo lugar em produção de cana, com área de 530.011 hectares (safra 2006/2007) e um volume anual de cerca de 45.347.360 t de cana-de-açúcar (Seab/Deral, 2006/2007), destacando-se nacionalmente, com produtividade média de 85.559 t ha⁻¹.

No entanto, é 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. Esses diferentes fatores interagem continuamente durante todo o crescimento e desenvolvimento da planta (Buso, 2006).

Além desses fatores, a distribuição e penetração das raízes são fundamentais para o estabelecimento e o crescimento da cultura. O crescimento da cana-de-açúcar na parte aérea é o reflexo da sua capacidade de exploração nos primeiros centímetros do solo; dessa forma, restrições impostas ao sistema radicular pela

formação de camadas compactadas limitam a produtividade (Tanaka & Junior, 2007).

Diversos parâmetros vêm sendo empregados, há vários anos, no reconhecimento e na determinação da compactação, sendo os mais utilizados a densidade, porosidade, infiltração de água, resistência à penetração e análise de trincheiras. Desses, a densidade é a medida quantitativa mais direta da compactação (Camargo & Alleoni, 2006); dos vários métodos utilizados na determinação da densidade, destaca-se o do cilindro volumétrico. Trata-se de um método destrutivo e trabalhoso, que deve ser executado com perícia e cautela, para evitar possíveis erros durante as amostragens de campo e manipulação no laboratório.

Surge, dessa forma, a necessidade de 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. Há métodos que permitem a obtenção de melhores resultados, porém requerem o uso de aparelhos mais sofisticados, como a técnica da tomografia computadorizada de raios gama (Vaz et al., 1992).

Neste trabalho, utilizou-se a técnica GPR (Ground Penetrating Radar) como uma possível ferramenta no auxílio do estudo dos solos em subsuperfície.

De acordo com Collins & Doolittle (1987), o georradar tem sido utilizado por cientistas de solo para determinar a presença, profundidade, extensão e variação lateral dos horizontes de solos, assim como suas propriedades. Muitos horizontes diagnósticos subsuperficiais (Soil Survey Staff, 1975) utilizados para classificar os solos nos EUA têm sido mapeados com GPR (Doolittle & Collins, 1995).

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. Segundo Davis & Annan (1989), a velocidade de propagação das ondas encontra-se estritamente dependente das propriedades dielétricas dos materiais.

Cruz et al. (2006) mostram que a técnica GPR tem a finalidade de detectar objetos e camadas de materiais distintos por meio 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 setores da construção civil.

Segundo esse mesmo pesquisador, o grande sucesso e eficácia demonstrados pelo georradar devem-se à rapidez de aquisição dos dados e dos resultados e aos custos mais baixos, quando comparados com outras técnicas de ensaio destrutivas, semidestrutivas e não destrutivas.

O objetivo deste trabalho foi o de testar a capacidade de utilização do GPR na avaliação de atributos do solo e sua relação com o método tradicional (cilindro volumétrico) de amostragem indeformada.

MATERIAL E MÉTODOS

O trabalho foi desenvolvido no município de Bom Sucesso, Estado do Paraná, em área de produção agroindustrial de cana-de-açúcar, limitada pelas coordenadas UTM no meridiano 51 ° W.G., 422.150–422.450 m e 7.381.350–7.381.550 m do Equador. Sua altitude média é de 580 m, tendo como referência altimétrica o Marégrafo de Imituba. O solo estudado foi classificado de acordo com Embrapa (2006) como Latossolo Vermelho eutroférrico (LVef) textura muito argilosa, apresentando 681 g kg⁻¹ de argila no horizonte A e 794 g kg⁻¹ 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 em outras regiões do Estado, com tendência de concentração das chuvas nos meses de verão, sem estação seca definida. Segundo Caviglione et al. (2000), a média de precipitação pluvial anual apresenta-se em torno de 1.500 a 1.700 mm, e a temperatura média anual, entre 20 e 22 °C.

A área experimental era constituída de uma soqueira de quarto corte de cana-de-açúcar em fase de rebrota. Demarcou-se uma parcela, onde foram delimitados três transeptos, sendo dois nas entrelinhas, onde o tráfego de máquinas e pessoas é mais intenso, e um na linha de cana-de-açúcar, onde não há tráfego. Em cada transepto foram demarcados 10 pontos, para coleta das amostras indeformadas de solo.

Os locais foram estaqueados, para que numa segunda etapa da pesquisa pudesse ser realizada a amostragem de solo deformada (determinação da umidade) e a investigação com o GPR. A amostragem indeformada foi realizada utilizando amostrador de solo e cilindros volumétricos com 5 cm de altura e diâmetro, auxiliados por macaco hidráulico, nas profundidades de 0–0,1, 0,1–0,2, 0,2–0,3, 0,3–0,4 e 0,4–0,5 m, com a finalidade de determinar a densidade e a porosidade total nas linhas e entrelinhas. Os cilindros foram coletados na porção média de cada camada, de 0,025 a 0,075 m na primeira camada, e nesta distribuição nas demais.

A profundidade de 0 a 0,5 m foi escolhida para análise por ter sido considerada a profundidade efetiva mais explorada pelo sistema radicular da cana-de-açúcar, com maior concentração de raízes (Avilan et al., 1978; Fernandes, 1985), por representar o horizonte diagnóstico de superfície e por ser a mais alterada pelo tráfego de máquinas e pelo manejo (Barbieri et al., 1997).

As amostras de solo foram envolvidas em folhas de papel-alumínio e acondicionadas em caixas plásticas, a fim de evitar a perda de umidade, sendo posteriormente enviadas ao laboratório de análises físicas da Universidade Estadual de Maringá para serem submetidas às avaliações necessárias. A porosidade total foi determinada de acordo com Embrapa (1997). Por sua vez, a densidade do solo foi determinada segundo Grossman & Reinsch (2002).

A amostragem deformada foi realizada numa segunda etapa, juntamente com a investigação geofísica. Foram coletadas amostras de solo com trado tipo holandês em todas as profundidades investigadas. As amostras foram acondicionadas em sacos plásticos e armazenadas em caixas de isopor, para evitar perda de umidade, sendo posteriormente enviadas ao laboratório. As amostras foram pesadas, secas em estufa por 24 h a 105 °C (Embrapa, 1997) e pesadas novamente, a fim de estimar a umidade gravimétrica. Após a determinação do resultado laboratorial, a umidade gravimétrica foi convertida em umidade volumétrica por meio da densidade do solo.

A pesquisa com o georradar foi realizada nas mesmas profundidades investigadas com o trado (amostra deformada) e cilindro volumétrico (amostra indeformada), para cruzamento com as informações das análises físicas. Os dados foram adquiridos com a antena blindada de 500 MHz, que foi deslocada sobre a superfície do terreno.

Em cada profundidade investigada foi necessário produzir uma reflexão hiperbólica, a partir de um cilindro de ferro, de forma que se indicasse, na seção GPR, a velocidade de propagação da onda eletromagnética ($m\ ns^{-1}$) no meio, para posterior cálculo da constante dielétrica (Figura 1).

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

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). Essa escolha foi baseada em comparações entre registros obtidos com diferentes números de empilhamentos de sinais na parcela experimental.

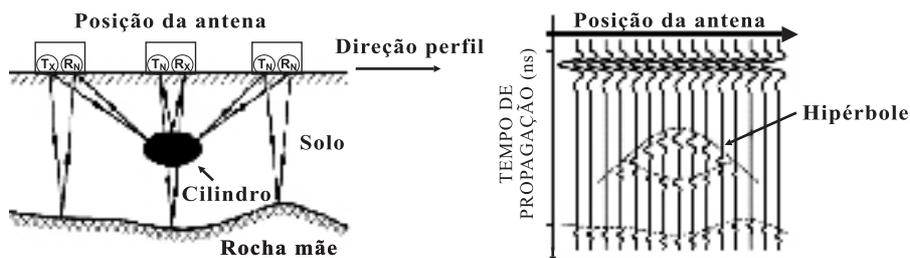


Figura 1. Esquema ilustrativo do método utilizado para determinação da constante dielétrica. Adaptado de Cruz et al. (2006).

O número de amostras utilizadas para cada profundidade investigada foi de 512, com uma janela de tempo de 76 ns, intervalo de amostragem a cada 0,05 m e frequência de amostragem de 6.718 MHz. 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 nos receptores (Prado, 2000).

No entanto, nenhum ganho foi aplicado durante o processamento dos dados, e não foram observadas diferenças na resolução ou profundidade de investigação, quando comparados à seção original obtida com a antena de 500 MHz, com a seção resultante da aplicação de ganho.

O delineamento experimental utilizado para avaliação da densidade, porosidade total e constante dielétrica foi o inteiramente casualizado, sendo realizadas 10 repetições por profundidade. Os resultados obtidos nas linhas e entrelinhas foram submetidos à análise estatística por meio do programa estatístico SAS (SAS, 1999), sendo utilizado o teste de Tukey a 5 %. A verificação de possíveis diferenças significativas foi feita inicialmente dentro das linhas e entrelinhas separadamente, observando-se todas as camadas. Posteriormente, foi realizada a verificação conjunta, em que foram comparados os resultados das linhas com aqueles das entrelinhas para todas as profundidades investigadas.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Atributos do solo (densidade e porosidade)

A variação de densidade foi de 1,25 a 1,34 $g\ cm^{-3}$ no transepto 1 e de 1,22 a 1,32 $g\ cm^{-3}$ no transepto 3 (Quadro 1). Esses valores são considerados altos para Latossolo Vermelho eutroférrico, sendo corroborados por Souza et al. (2004). A análise estatística realizada para a posição entrelinha isoladamente mostrou que não houve diferença significativa entre as médias da maioria dos valores de densidade encontrados em todas as profundidades investigadas.

No entanto, comparando linha com entrelinha, observou-se diferença estatística para algumas

Quadro 1. Densidade do solo e porosidade total encontradas nas linhas e entrelinhas de cana-de-açúcar em um Latossolo Vermelho eutroférico

Profundidade	Densidade			Porosidade total		
	Entrelinha	Linha	Entrelinha	Entrelinha	Linha	Entrelinha
m	g cm ⁻³			m ³ m ⁻³		
	Trans. 1	Trans. 2	Trans. 3	Trans. 1	Trans. 2	Trans. 3
0–0,1	1,33 aA	1,19 aB	1,32 aA	0,57 aAB	0,59 aA	0,56 aB
0,1–0,2	1,31 aA	1,25 aA	1,28 abA	0,57 aA	0,57 aA	0,56 aA
0,2–0,3	1,34 aA	1,25 aB	1,30 abAB	0,55 aA	0,57 aA	0,57 aA
0,3–0,4	1,30 aA	1,23 aA	1,27 abA	0,57 aA	0,57 aA	0,58 aA
0,4–0,5	1,25 aA	1,20 aA	1,22 bA	0,58 aA	0,58 aA	0,55 aA

Médias seguidas de letras minúsculas iguais na coluna e maiúsculas na linha não diferem a 5 % pelo teste de Tukey.

profundidades. As médias de densidade encontradas nas profundidades de 0 a 0,1 e 0,2 a 0,3 m para linhas de cana diferiram significativamente daquelas das entrelinhas. Apesar de não significativa, as demais profundidades apresentaram também a mesma tendência, ou seja, densidades menores nas linhas, comparadas com as entrelinhas de cana. A ocorrência pode ser atribuída à descompactação adicional proporcionada pelo sulcador na linha, no ato do plantio, e ao tráfego de máquinas e implementos nas entrelinhas durante os sucessivos cultivos, resultados esses concordantes com os de Tavares Filho et al. (2001), Vasconcelos (2002) e Faroni (2005).

Os resultados quanto à porosidade total do solo indicam que na camada superficial obteve-se diferença significativa, mostrando relação inversa com a variação de densidade do solo apresentada.

Complementando as possíveis explicações para as variações encontradas, a diminuição da porosidade total e o aumento da densidade nas entrelinhas estão vinculados aos vários anos de cultivo sem renovação do canavial, uma vez que há cinco anos ocorre exploração da cana-de-açúcar por meio da rebrota. Segundo Silva & Ribeiro (1997), a porosidade do solo tende a diminuir com o aumento do tempo de cultivo, tendo maiores reflexos sobre a macroporosidade.

Comparação dos resultados do georradar com os atributos do solo avaliados

Embora a investigação geofísica tenha sido realizada até a profundidade de 0,5 m, os valores utilizados na comparação com as análises físicas ficaram restritos ao intervalo de profundidade de 0,4 a 0,5 m, devido a limitações apresentadas pelo GPR. Fatores como frequência da antena, solo argiloso e zona rasa de interferência acabaram mascarando os dados, tornando-os difíceis de ser interpretados até a profundidade de 0,4 m (Davis & Annan, 1989; Fisher et al., 1992). No quadro 2 são apresentados os resultados obtidos para constante dielétrica, densidade e porosidade total do solo para o intervalo de profundidade estudado.

A investigação subsuperficial com o radar de solo mostrou que os valores da constante dielétrica (K) obtidos nos três transeptos para o intervalo de 0,4–0,5 m de profundidade foram maiores nas linhas de cana-de-açúcar, onde foram encontrados valores de umidade maiores, e menores nas entrelinhas, onde a umidade foi menor (Figura 2), concordando com os resultados de Davis & Annan (1989). Esse fato está relacionado à redução da porosidade total em função da elevada densidade encontrada nos locais de tráfego intenso, estando esta próxima do limite crítico, conforme estabelecido por Jones (1983).

A avaliação dos dados do georradar pelo SAS mostrou que as médias de K encontradas nas linhas e entrelinhas no intervalo de 0,4 a 0,5 m de profundidade diferenciaram-se significativamente pelo teste de Tukey a 5 % (Quadro 2). Essa diferença provavelmente ocorreu devido ao tráfego de máquinas e implementos nas entrelinhas durante o crescimento da cultura, modificando as características físicas do solo, como demonstrado pelo método tradicional (Quadro 1), refletindo assim na constante dielétrica.

Embora a correlação entre a densidade e porosidade total e a constante dielétrica não tenha sido significativa (Quadro 3), o resultado obtido é explicado pela sensibilidade do equipamento à presença de água no solo. Pequenas quantidades de água nos poros são

Quadro 2. Variáveis medidas pelo georradar e anel volumétrico na camada de 0,4 a 0,5 m de profundidade

Variável	GPR e anel volumétrico		
	Entrelinha	Linha	Entrelinha
	Trans. 1	Trans. 2	Trans. 3
Constante dielétrica	16,0 B	23,2 A	15,9 B
Densidade (g cm ⁻³)	1,25 A	1,20 A	1,22 A
Porosidade total (m ³ m ⁻³)	0,58 A	0,58 A	0,56 A

Médias seguidas de letras maiúsculas iguais na linha não diferem a 5 % pelo teste de Tukey.

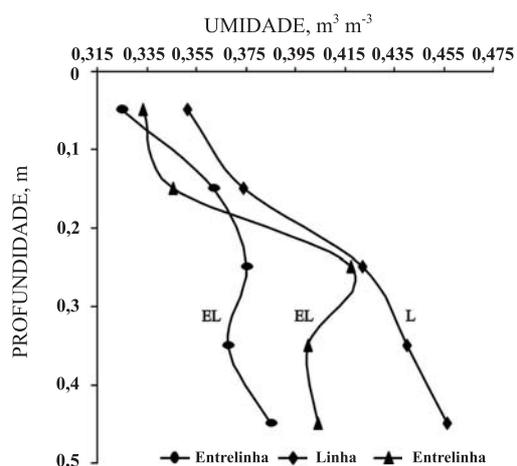


Figura 2. Comportamento da umidade no solo durante as investigações com o georradar.

suficientes para alterar os valores da constante dielétrica. Assim, variações pequenas de porosidade em função do aumento da densidade são suficientes para alterar os valores de K , visto que modificarão o conteúdo de água inserida nos poros. O resultado obtido por meio da correlação entre a umidade e a constante dielétrica comprova essa afirmação, sendo significativa a 1 % (Quadro 3). Resultado semelhante foi obtido por Miller et al. (2002), os quais observaram que a densidade influenciou pouco na constante dielétrica, sendo o fator mais influenciador a água presente nos poros do solo.

As baixas correlações e a falta de significância para os coeficientes de correlação, obtidos entre as investigações do GPR e do cilindro volumétrico, encontram-se em parte relacionadas às limitações do equipamento quando aplicado a solo muito argiloso, uma vez que em terrenos eletricamente condutivos a penetração das ondas torna-se baixa, devido à forte atenuação, o que acaba prejudicando as reflexões, como também demonstrado por Davis & Annan (1989) e Doolittle & Collins (1995).

Portanto, a condutividade elétrica elevada, característica do solo estudado, acabou por reduzir a resposta eletromagnética do georradar, prejudicando assim as investigações. Soma-se a isso o fato de o solo avaliado possuir altos teores de argila, estabelecendo certa limitação para a antena de 500 MHz empregada na pesquisa.

Quadro 3. Correlação entre as variáveis avaliadas pelo anel volumétrico e o georradar para a camada de 0,4 a 0,5 m de profundidade

Variáveis	Umidade volumétrica	Porosidade total	Densidade
Const. Dielétrica	0,58**	0,31 ^{ns}	- 0,25 ^{ns}

^{ns}: não significativo, **: significativo a 1 %.

A mineralogia existente no local também pode ter prejudicado o trabalho com o GPR, uma vez que os Latossolos Vermelhos eutroféricos têm elevada proporção de hematita e magnetita, concordando assim com Prado (2000), para quem a presença de minerais de Fe é um fator limitante ao emprego do georradar.

CONCLUSÕES

1. A densidade do solo nas entrelinhas encontra-se elevada para a classe dos Latossolos Vermelhos eutroféricos, diferenciando-se das linhas.
2. O solo argiloso prejudicou a investigação com o GPR até a profundidade de 0,4 m, devido à forte atenuação causada sobre as ondas eletromagnéticas, não sendo possível dessa forma correlacionar as leituras de constante dielétrica (K) com as variáveis físicas avaliadas.
3. Na camada de 0,4 a 0,5 m houve correlação positiva de K com a umidade volumétrica do solo, mas não houve relação das medidas do georradar com a densidade e porosidade total.
4. A técnica aplica-se melhor ao estudo de água do que ao de densidade e porosidade do solo.
5. O GPR necessita de mais estudos e melhorias, a fim de diminuir as limitações operacionais.

AGRADECIMENTOS

À CAPES, pelo suporte financeiro; e à usina Cooperval, pela disponibilidade da área para execução do experimento e seu custeio.

LITERATURA CITADA

- AVILAN R.L.; MENESES, L.; BLANCO, F. & ARAUJO, Y. Estudio del sistema radicular de la cana de azucar variedad V58-4 en un Mollisol del estado Portuguesa. *Agron. Trop.*, 28:163-174, 1978.
- BARBIERI, J.L.; ALLEONI, L.R.F. & DONZELLI, J.L. Avaliação agrônômica e econômica de sistemas de preparo de solo para cana-de-açúcar. *R. Bras. Ci. Solo*, 21:89-98, 1997.
- BUSO, P.H.M. Estudo do sistema radicular de cana-de-açúcar no plantio em gema e tolete. Curitiba, Universidade Federal do Paraná, 2006. (Tese de Mestrado)
- CAMARGO, O.A. & ALLEONI, L.R.F. Reconhecimento e medida da compactação do solo. Disponível em: < http://www.infobibos.com/Artigos/2006_2/C5/Index.htm >. Acesso em 30 de out. 2008.
- CAVIGLIONE, J.H.; KIIHL, L.R.B.; CARAMORI, P.H. & OLIVEIRA, D. IAPAR, 2000. Disponível em < <http://www.iapar.br/modules/conteudo> >. Acesso em 11 de dez. 2008.

- COLLINS, M.E & DOOLITTLE, J.A. Using ground-penetrating radar to study soil microvariability. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 51:491-493, 1987.
- CRUZ, P.J.S.; TOPCZEWSKI, L.; FERNANDES, F.M. & LOURENÇO, P.B. Utilização do radar de prospecção geotécnica na localização das bainhas de pré-esforço nas pontes da barra e de lanheses. Lisboa, Laboratório Nacional de Engenharia Civil, 2006. CD-ROM.
- DAVIS, J.L. & ANNAN, A.P. Ground-penetrating radar for high-resolution mapping of soil and rock stratigraphy. *Geophys. Prospecc.*, 37:531-551, 1989.
- DOOLITTLE, J.A. & COLLINS, M.E. Use of soil information to determine application of ground penetrating radar. *J. Appl. Geophys.*, 33:101-108, 1995.
- EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA - EMBRAPA. Centro Nacional de Pesquisa de Solos. Manual de métodos de análises de solos. 2.ed. Rio de Janeiro, 1997. 212p.
- EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA - EMBRAPA. Centro Nacional de Pesquisa de Solos. Sistema brasileiro de classificação de solos. 2.ed. Brasília, 2006. 412p.
- FARONI, C.E. Sistema radicular de cana-de-açúcar e identificação de raízes metabolicamente ativas. Piracicaba, Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, 2005. 68p. (Tese de Mestrado)
- FERNANDES, J. Observações sobre o sistema radicular da cana-de-açúcar. *Álcool Açúcar*, 5:51-52, 1985.
- FISHER, E.; MCMECHAN, G.A. & ANNAN, A.P. Acquisition and processing of wideaperture ground-penetrating radar data. *Geophysics*, 57:495-504, 1992.
- GROSSMAN, R.B. & REINSCH, T.G. Bulk density and linear extensibility. In: DANE, J.H. & TOPP, C., eds. *Methods of soil analysis: Physical methods*. Madison, Soil Science Society of America, 2002. Part 4. p.201-228.
- JONES, C.A. Effect of soil texture on critical bulk densities for root growth. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 47:1208-1211, 1983.
- MILLER, T.W.; BORCHERS, B.; HENDRICKX, J.M.H.; HONG, S.H.; DECKKER, L.W. & RITSEMA, C.J. Effects of soil physical properties on GPR for landmine detection. In: *INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON TECHNOLOGY AND THE MINE PROBLEM*, 5., Monterey, 2002. Proceedings. Monterey, 2002.
- ORLANDO FILHO, J.; BITTENCOURT, V.C. & ALVES, M.C. Aplicação de vinhaça em solo arenoso do Brasil e poluição do lençol freático com nitrogênio. *STAB*, 13:14-16, 1995.
- 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 - Brasil. Rio Claro, Universidade Estadual Paulista, 2000. 174p. (Tese de Doutorado)
- SAS Institute. Statistical Analysis System Institute. Procedure guide for personal computers. Version 5. Cary, 1999.
- SECRETARIA DE ESTADO DA AGRICULTURA E DO ABASTECIMENTO. & DEPARTAMENTO DE ECONOMIA RURAL. Disponível em: < <http://www.seab.pr.gov.br/arquivos/file/deral/cprbr.xls> >. Acesso em 10 nov. 2008.
- SILVA, A.J.N. & RIBEIRO, M.R. Caracterização de um Latossolo Vermelho-Amarelo sob cultivo contínuo de cana-de-açúcar no estado de Alagoas: Atributos morfológicos e físicos. *R. Bras. Ci. Solo*, 21:677- 684, 1997.
- SOIL SURVEY STAFF. Soil taxonomy: A basic system of soil classification for making and interpreting soil surveys. Washington, Soil Conserv. Serv, USDA Handbook, 1975. 754p.
- SOUZA, Z.M.; MARQUES JUNIOR, J. & PEREIRA, G.T. Variabilidade espacial de atributos do solo em diferentes formas do relevo sob cultivo de cana-de-açúcar. *R. Bras. Ci. Solo*, 28:937-944, 2004.
- TANAKA, E.M. & SOUZA, JUNIOR, W.C. Solo duro. Paraguaçu Paulista, Escola Superior de Agricultura de Paraguaçu Paulista, 2007. (Boletim Técnico)
- TAVARES FILHO, J.; BARBOSA, G.M.; GUIMARÃES, M.F. & FONSECA, I.C.B. Resistência do solo à penetração e desenvolvimento do sistema radicular do milho (*Zea mays*) sob diferentes sistemas de manejo em um Latossolo Roxo. *R. Bras. Ci. Solo*, 25:725-730, 2001.
- VASCONCELOS, A.C.M. Desenvolvimento do sistema radicular e da parte aérea de socas de cana-de-açúcar sob dois sistemas de colheita: crua mecanizada e queimada manual. Jaboticabal, Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho, 2002. 140p. (Tese de Doutorado)
- VAZ, C.M.P.; CRESTANA, S. & REICHARDT, K. Tomografia computadorizada na avaliação da compactação de solos. *R. Bras. Ci. Solo*, 16:153-159, 1992.

