

UTILIZAÇÃO DO RADAR DE PENETRAÇÃO EM DOIS SOLOS DO
NORTE FLUMINENSE

VITOR LUIZ MEDEIROS BARROS JÚNIOR

UNIVERSIDADE ESTADUAL DO NORTE FLUMINENSE
DARCY RIBEIRO - UENF

CAMPOS DOS GOYTACAZES – RJ
ABRIL - 2011

UTILIZAÇÃO DO RADAR DE PENETRAÇÃO EM DOIS SOLOS DO
NORTE FLUMINENSE

VITOR LUIZ MEDEIROS BARROS JÚNIOR

“Dissertação apresentada ao Centro de Ciências e Tecnologias Agropecuárias da Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro, como parte das exigências para obtenção do título de mestre em Produção Vegetal.”

Orientador: Cláudio Roberto Marciano

CAMPOS DOS GOYTACAZES – RJ
ABRIL– 2011

UTILIZAÇÃO DO RADAR DE PENETRAÇÃO EM DOIS SOLOS DO NORTE FLUMINENSE

VITOR LUIZ MEDEIROS BARROS JÚNIOR

“Dissertação apresentada ao Centro de Ciências e Tecnologias Agropecuárias da Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro, como parte das exigências para obtenção do título de mestre em Produção Vegetal.”

Aprovada em 25 de abril de 2011.

Comissão Examinadora:

Prof. Doracy Pessoa Ramos (D.Sc., Solos e Nutrição de Plantas) – Consultor em
Ciência do Solo

Prof. Elias Fernandes de Sousa (D.Sc. Produção Vegetal) – UENF

Prof. Antônio Abel González Carrasquilla (D.Sc. Geofísica) – UENF

Prof. Cláudio Roberto Marciano (D.Sc. Solos e Nutrição de Plantas) – UENF
(Orientador)

AGRADECIMENTOS

A Deus por nos orientar a cada momento;

À minha esposa pela paciência e amor nos meus momentos de estresse;

À minha família pelo carinho e compreensão;

Ao professor Claudio Roberto Marciano, pela oportunidade do mestrado e pela orientação recebida;

Ao CNPq pela bolsa concedida;

Aos professores do LENEP/CCT, Marco Antônio Rodrigues de Ceia e Antônio Abel González Carrasquilla pela ajuda e pelo empréstimo do equipamento e da antena de 100 MHz;

Ao professor Eliemar Campostri, do LMGV/CCTA, pelo empréstimo da antena de 900 MHz.

Ao Professor e pesquisador do Observatório Nacional Dr. Jandyr de Menezes Travassos pelo curso por ele ministrado e pelas sugestões;

Aos funcionários do LSOL em especial ao Ederaldo e ao Edson pela ajuda na coleta de amostras e análises;

Aos amigos de graduação e pós-graduação que nos ajudaram a completar mais esta etapa.

SUMÁRIO

RESUMO	iv
ABSTRACT	vi
1. INTRODUÇÃO	1
2. REVISÃO DE LITERATURA	3
2.1- Geomorfologia do Norte Fluminense	3
2.2- Caracterização física e morfológica dos solos do Norte Fluminense.....	4
2.2.1- Caracterização dos solos de Tabuleiros Costeiros.....	4
2.2.2- Caracterização dos solos da Baixada Campista.....	6
2.2.3- Caracterização dos solos do embasamento cristalino.....	7
2.3- Condições morfológicas dos solos e desenvolvimento das plantas.	8
2.4- Condições físicas dos solos e a resposta das plantas.....	9
2.5- Princípios básicos do GPR.	11
2.6 Técnicas de aquisição dos dados com o GPR	14
2.7- Uso do GPR para a caracterização dos solos.	15
3. TRABALHOS.....	18
3.1- Uso do radar de penetração no solo para identificar Espodossolos na Restinga de Jurubatiba.....	18
3.2- Uso do GPR (ground penetrating radar) para avaliação de atributos físicos e eletromagnéticos em Cambissolo cultivado com cana-de-açúcar.....	38
4. RESUMO E CONCLUSÕES.....	55
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	57

RESUMO

BARROS JÚNIOR, Vitor Luiz Medeiros, Eng. Agrônomo, M.Sc. – Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro. Abril de 2011. Utilização do radar de penetração em dois solos do Norte Fluminense. Orientador: Cláudio Roberto Marciano.

O bom desempenho técnico e econômico de atividades agrícolas depende de maior conhecimento sobre a adaptabilidade de cada cultura às condições agroecológicas locais. Para isso, uma etapa essencial é o conhecimento das condições dos solos da região, particularmente dos aspectos morfológicos e físicos determinantes de suas qualidades e limitações às atividades agrícolas. As caracterizações físicas e morfológicas convencionais são de grande dispêndio de tempo e trabalho, de modo que o uso de novas tecnologias pode contribuir para dinamizar essas caracterizações. Uma dessas tecnologias é o radar de penetração em solo (GPR), um equipamento para investigações geofísicas que fornece pseudo-imagens (radargramas) do perfil do solo. É uma técnica tempo-dependente de alta resolução eletromagnética, com possibilidade de uso na agricultura de precisão. O objetivo do presente trabalho foi comparar informações advindas da caracterização pedológica tradicional com as obtidas a partir da interpretação de imagens de GPR, contribuindo para o uso deste equipamento no estudo de horizontes diagnósticos e/ou camadas física e morfológicamente diferenciadas ao longo de perfis de solos do Norte Fluminense. Para isso, dois solos foram escolhidos para realização desse estudo, sendo um Espodossolo Ferrihumilúvico Órtico espessarênico e um Cambissolo Háptico Tb Eutrófico típico. Foram realizadas as caracterizações físicas, químicas e

morfológicas tradicionais, além das caracterizações eletromagnéticas com o GPR. A caracterização eletromagnética foi feita delimitando-se uma seção de investigação ao longo da qual o equipamento era deslocado para a aquisição de radargramas dos perfis de solo. Para o Espodossolo a profundidade de início do horizonte diagnóstico B espódico foi identificado por tradagem e também a partir de suas propriedades eletromagnéticas, por meio da comparação dos radargramas à feição morfológica e profundidade de sua ocorrência. Para o Cambissolo, os atributos físicos foram utilizados para estimar as propriedades eletromagnéticas ϵ (constante dielétrica) e v (velocidade da onda eletromagnética), as quais foram comparadas aos valores obtidos pelo GPR mediante o uso da técnica CMP. Parte dos valores de ϵ e v obtidos pela técnica CMP foram inconsistentes, resultando em valores de densidade e umidade volumétrica do solo também não aceitáveis. Pode-se concluir que o uso do GPR para estimar a densidade e umidade volumétrica do solo depende da qualidade da aquisição de dados no campo e de seu processamento em laboratório, enquanto a identificação de horizontes diagnósticos depende, adicionalmente, do conhecimento prévio das feições morfológicas típicas do solo da área explorada e da ocorrência de contraste eletromagnético no perfil.

ABSTRACT

BARROS JÚNIOR, Vitor Luiz Medeiros, Agronomist Engineer, M.Sc. – Norte Fluminense State University-Darcy Ribeiro. April, 2011. Using ground-penetrating radar in two soils of North Part of Rio de Janeiro State. Adviser: Cláudio Roberto Marciano.

The good technical and economic performance of agricultural activities depends on greater knowledge about the adaptability of each culture in the local agroecological conditions. For this, a key step is the knowledge of soil conditions in the region, particularly the morphology and physical aspects determinants of their qualities and limitations to agricultural activities. The conventional morphological and physical characterizations are very time-consuming and labor, so the use of new technologies can help streamline these characterizations. One of these technologies is the ground penetrating radar (GPR), a equipment for geophysical investigations that provides pseudo-images (radar grams) of the soil profile that is a time-dependent geophysical technique that can provide high-resolution electromagnetic, with potential use in precision agriculture. The aim of this study was to compare information coming from traditional pedological characterization with those obtained from the interpretation of GPR images, contributing to the use of this equipment in the identification of soil classes, diagnostic horizons and/or physical layers and morphologically differentiated along soil profiles of North Part of Rio de Janeiro State. For this, two soils were chosen for this study, a Arenic Hapludalf Orthic Ferrihumilúvic Spodosol and a Eutrophic Tb Haplic Inceptisol Typical. Were performed the traditional characterizations

physical, chemical and morphological beyond of the electromagnetic characterizations with GPR. The electromagnetic characterization was made delimited to a section of research along which the equipment was moved to purchase radar grams of the soil profiles. For Spodosol the depth at the beginning of the horizon diagnosis B spodic was identified by borehole and also from their electromagnetic properties, by comparing radar grams to morphological feature and the depth of their occurrence. For the Inceptisol, the physical attributes were used to estimate the electromagnetic properties ϵ (dielectric constant) and v (velocity of electromagnetic wave), which were compared to values obtained by GPR through the use of the technique CMP. Part of the values of ϵ and v obtained by CMP technique were inconsistent, resulting in values of density and volumetric soil water content also not acceptable. It can be concluded that the use of GPR to estimate the density and volumetric soil water content depends on the quality of field data acquisition and processing in the laboratory, while the identification of diagnostic horizons depends, additionally, of previous knowledge of the typical morphological features of the soil of the area explored and the occurrence of electromagnetic contrast in the profile.

1. INTRODUÇÃO

A Região Norte Fluminense apresenta grande diversidade de solos. Esse fato, ao mesmo tempo em que torna viável a diversificação das atividades agrícolas, cria dificuldades para a definição do uso e manejo mais adequado a cada local. Em relação à avaliação da qualidade dos solos, essa diversidade demanda um elevado nível de conhecimentos teóricos e práticos necessários tanto à caracterização dos solos quanto à interpretação de atributos para identificação das potencialidades de uso.

Se, por um lado, esforços têm sido feitos para a melhoria no nível técnico empregado nas culturas tradicionais (principalmente da cana-de-açúcar, destacando-se o programa governamental “Rio-Cana”), há, por outro lado, o incentivo para a diversificação da agricultura regional. Além da persistência, em algumas áreas, do cultivo de café, pode-se citar a introdução e ampliação da fruticultura (abacaxi, maracujá, coco, goiaba, banana, uva, etc.), a introdução da soja em áreas de reforma de canaviais, e os primeiros estudos para a introdução de culturas voltadas à produção de biodiesel (mamona, girassol, pinhão-manso, dendê, etc). Destacam-se, nesse aspecto, os programas governamentais “Frutificar” e “Biodiesel”.

O bom desempenho técnico e econômico de atividades agrícolas, tradicionais ou recém-introduzidas, depende de maior conhecimento sobre a adaptabilidade de cada cultura às condições agroecológicas locais. Para isso, uma etapa essencial é o conhecimento das condições dos solos da região, particularmente dos aspectos morfológicos e físicos determinantes de sua qualidade e, conseqüentemente, de suas limitações às atividades agrícolas. A

investigação e a caracterização de aspectos químicos utilizados para a avaliação da fertilidade do solo também é relevante, mas podem ser corrigidos com maior facilidade e não apresentam graves restrições às culturas quando essas limitações são sanadas.

Embora possivelmente a descrição morfológica e caracterização física tradicionalmente empregada em levantamentos de solos jamais possam ser dispensadas, o emprego de novas tecnologias pode contribuir tanto para minimizar o oneroso trabalho de campo e laboratório quanto para melhorar o detalhamento das informações obtidas. Uma dessas tecnologias é o radar de penetração em solo (GPR), o qual pode mostrar informações detalhadas sobre aspectos físicos e morfológicos dos perfis de solo (Paixão et al., 2006). O uso do GPR em estudos nas ciências do solo, mais especificamente focado no interesse agrônomo, é ainda hoje pouco difundido no Brasil. Essa ferramenta tem sido muito utilizada em outros países com diversas aplicações, dentre elas: estimar a profundidade e espessura dos horizontes dos solos (Collins e Doolittle, 1987; Doolittle, 1987); estimar a densidade dos solos (Collins et al., 1989); estimar a cor e o conteúdo de carbono orgânico do solo (Doolittle, 1982; Collins e Doolittle, 1987); determinar a espessura e o volume de depósitos orgânicos (Doolittle, 1983; Shih e Doolittle, 1984; Collins et al., 1986; Doolittle et al., 1990); mapear o lençol freático em áreas que este esteja a profundidades menores que 12 metros (Shih et al., 1986); identificar camadas de cimentação e a sua continuidade ao longo do solo (Mokma et al., 1990); e estudar mudanças em propriedades dos solos que afetam a produtividade das florestas (Farrish et al., 1990) e o estresse hídrico de pomares de citrus (Shih et al., 1985).

Comparado com métodos convencionais de observação do solo, a técnica que usa o GPR é mais rápida, menos provável de ignorar características de subsuperfície e é não destrutível, porém apresenta a desvantagem de não possuir igual desempenho em todos os tipos de solos. Nesse contexto, o objetivo do presente trabalho foi comparar informações advindas da caracterização pedológica tradicional com as obtidas a partir da interpretação de imagens de GPR (radar de penetração no solo), contribuindo para o uso deste equipamento no estudo de horizontes diagnósticos e/ou camadas física e morfológicamente diferenciadas ao longo de perfis de solos do Norte Fluminense.

2. REVISÃO DE LITERATURA

2.1- Geomorfologia do Norte Fluminense

A geomorfologia da região é composta de: planícies costeiras, as quais constituem terrenos bem drenados (predomínio de Espodossolos e Neossolos Quartzarênicos) com padrão de drenagem paralelo e densidade de drenagem baixa. A vegetação nesta região pode ser encontrada em importantes remanescentes de mata de restinga e restinga herbáceo-arbustiva; Planícies de inundação flúvio-lagunares, que ocupam os fundos de vales largos e chatos das principais linhas de drenagens sob domínio de tabuleiros onde predominam Gleissolos, Organossolos, Neossolos e Cambissolos; Tabuleiros, que se trata de grande área da região onde a formação de barreiras é material originário dos solos, com dominância de solos profundos e bem drenados de caráter coeso (Argissolos Amarelos e Latossolos Amarelos) com gradientes muito suaves e amplitudes de relevo muito baixas e cotas que variam entre 15 e 40m, sendo crescentes a partir da linha de costa e da calha do rio Paraíba do Sul em direção ao interior; Serras ou domínio cristalino, que caracteriza-se por um conjunto montanhoso de relevos residuais dispersos na superfície colinosa, podendo atingir cotas elevadas, como a serra da Pedra Lisa, com 818 metros de altitude, sendo o ponto mais alto do norte fluminense. Apresentam vertentes predominantemente retilíneas a convexas e escarpadas e topos de cristas alinhadas, aguçados ou arredondados, apresentando formidáveis formas convexas, que se destacam topograficamente do domínio colinoso.

A rede de drenagem é incipiente devido às reduzidas dimensões dessas formações rochosas. Ocorrência de grandes amplitudes topográficas e gradientes elevados, com sedimentação de colúvios e depósitos de tálus. Desenvolvem-se, neste ambiente, solos pouco profundos e altamente suscetíveis à erosão, tais como os Cambissolos Háplicos e os Neossolos Litólicos. É freqüente observar extensos paredões subverticais de rocha aflorante. Solos como os Chernossolos, oriundos de chernockitos podem ser encontrados com maior freqüência em direção a Itaperuna (Noroeste Fluminense), como também solos com propriedades vérticas e com presença de gilgail.

Estes terrenos apresentam, em geral, uma elevada vulnerabilidade a eventos de erosão e movimentos de massa, devido às elevadas amplitudes de relevo e às vertentes íngremes associadas à esparsa cobertura florestal, concentrada apenas nos terrenos mais elevados.

2.2- Caracterização física e morfológica dos solos do Norte Fluminense

A região Norte Fluminense possui três ambientes distintos do ponto de vista geomorfológico: o embasamento cristalino, o tabuleiro e a baixada. Em termos gerais o Norte Fluminense apresenta 60% da superfície em altitude até 100 metros, 35% com altitudes de 100 a 500 metros e 5% com altitudes de 500 a 1.200 metros (Fundenor, 1971).

2.2.1- Caracterização dos solos de Tabuleiros Costeiros

Os solos de tabuleiro estão distribuídos por quase toda a faixa costeira do Brasil, desde o Estado do Amapá até o Estado do Rio de Janeiro, com extensão até o vale do Rio Paraíba do Sul, no Estado de São Paulo. Estima-se que no Brasil, as áreas de Latossolos, Argissolos e outros solos provenientes de sedimentos, Barreiras ou similares atinjam extensão de 20000 km².

O termo “Tabuleiros Costeiros” é utilizado para designar uma forma de superfície do tipo tabular, dissecada por vales profundos e encostas com forte declividade. De um modo geral, os tabuleiros costeiros têm topografia plana e com menor freqüência suavemente ondulada. Estão relacionados com os sedimentos da Formação Barreiras do Terciário (Jacomine, 2001).

Nos tabuleiros prevalecem duas classes de solos, a dos Latossolos Amarelos e a dos Argissolos Amarelos. Dentre os Latossolos, os Amarelos de tabuleiros são os que apresentam, em condições naturais, o caráter coeso, ou seja, presença de horizonte(s) de consistência dura ou muito dura quando seco, e geralmente friável quando úmido. Em geral, a parte coesa coincide com uma faixa compreendida entre 0,2 e 0,6 m, podendo atingir até maiores profundidades. Essa parte endurecida corresponde normalmente aos horizontes AB (A3) e/ou BA (B1), podendo chegar ao topo do Bw. Os Latossolos Amarelos são os que apresentam maior densidade do solo, com valores variando de 1,30 a 1,60 Mg m⁻³ (nos horizontes AB, BA e Bw), e, conseqüentemente, menor porosidade total, cujos valores estão, em geral, compreendidos entre 40 e 50% (Jacomine, 2001).

Uma das características importantes de Latossolos e Argissolos de tabuleiros refere-se à coesão das partículas, formando camadas adensadas. Nesta camada adensada, ocorre um aumento de argila naturalmente dispersa em água, diminuição de macroporos e, algumas vezes, da porosidade total, com conseqüente aumento da densidade aparente, em relação aos horizontes situados abaixo desta e de mesma composição granulométrica (Achá Panoso, 1976; Jacomine, 1979; Fonseca, 1986).

Este adensamento parece ser comum nos tabuleiros e sua ocorrência, segundo Bennema e Camargo (1979), está relacionada à baixa estabilidade dos agregados, como conseqüência dos baixos conteúdos de sesquióxidos de ferro e alumínio, que atuam como elementos cimentantes, e da baixa superfície específica da caulinita, que é o mineral dominante na fração argila.

Quanto às propriedades químicas, os Latossolos Amarelos são solos ácidos a fortemente ácidos, com pH em água normalmente com valores entre 4,0 e 5,0. Em geral, contêm alumínio trocável e são álicos. A CTC é muito baixa com atividade da argila normalmente abaixo de 6,5 cmol_c kg⁻¹ de argila, descontada a contribuição do carbono. A mineralogia das frações areia (grossa e fina) registra predomínio quase absoluto do quartzo, com valores entre 95 e 100 %, e quanto à mineralogia da fração argila, há o predomínio da caulinita, com percentagem entre 70 e 90%.

Os Argissolos Amarelos são distintos dos Latossolos Amarelos pelo gradiente textural mais alto nos Argissolos, indicando que nestes há maior concentração de argila no Bt, muitas vezes, com mudança textural abrupta. O

caráter coeso dos Argissolos, além de estar presente logo abaixo do horizonte A, atinge maior profundidade do horizonte B, em comparação aos Latossolos.

Com relação às principais limitações ao uso agrícola dos tabuleiros, Souza (1996) afirma que, apesar desses solos serem considerados profundos, possuem uma pequena profundidade efetiva, resultante da presença de horizontes coesos e adensados, prejudicando a dinâmica de água no perfil e, principalmente, o aprofundamento do sistema radicular, agravando suas limitações ao desenvolvimento vegetal.

2.2.2- Caracterização dos solos da Baixada Campista

A Baixada Campista, ou Baixada dos Goytacazes, compõe uma das três macropaisagens da Região. É geograficamente definida entre as coordenadas 21° 25' e 22° 15' S e 40° 55' e 41° 40' W. As cotas mais elevadas com referência ao nível do mar são de 12 metros.

É uma bacia sedimentar deltaica do Rio Paraíba do Sul, que se inicia no seu curso inferior, nas proximidades de Itaocara, em trecho com declividade média de 0,20 m km⁻¹.

O trabalho mais completo da área em estudo foi realizado pelo antigo Instituto do Açúcar e do Alcool, do Ministério da Indústria e Comércio, constando de uma pesquisa multidisciplinar na qual se incluiu um levantamento de solos em nível semidetalhado, abrangendo uma área aproximada de 245000 ha (IAA/MIC, 1985, citado por Ravelli Neto, 1989). Neste levantamento foram descritas 62 classes de solos desenvolvidos na Baixada dos Goytacazes, utilizando-se as normas do Serviço Nacional de Levantamento e Conservação de Solos vigentes na época. Ravelli Neto (1989) elencou as principais classes de solo encontradas na área (entre parênteses constam as classes aproximadamente correspondentes pelo atual Sistema de Classificação de solos Embrapa, 2006): (i) Aluvial (Neossolo Flúvico) com argilas de atividades média, alta e baixa, caráter eutrófico, distrófico e álico, caráter salino, sódico e solódico, em diversas classes de textura; (ii) Areia quartzosa (Neossolo Quartzarênicos) distrófica; (iii) Cambissolo com argila de atividade média, alta e baixa, caráter eutrófico, distrófico e álico, caráter sódico e solódico, em diversas classes de textura; (iv) Podzol hidromórfico (Espodossolo); (v) Gleí húmico (Gleissolo) com argilas de atividades média, alta e

baixa, caráter distrófico, álico e eutrófico, caráter salino e solódico, em diversas classes de textura; (vi) Gleis pouco húmico (Gleissolo) com argilas de atividades alta, média e baixa, caráter eutrófico, distrófico e álico, caráter solódico e ligeiramente salino, em diversas classes de textura; (vii) Gleis salino (Gleissolo) sem e com caráter solódico e diferentes classes de textura; (viii) Gleis tiomórfico salino (Gleissolo), com argilas de atividade alta, textura argilosa; (ix) Solos orgânicos (Organossolo) com caráter distrófico, salino, ligeiramente salino e tiomórfico.

Quanto à limitação do uso dos solos da baixada campista, têm-se as condições de mal drenados a moderadamente drenados, como é o caso dos Gleissolos e (estes últimos em épocas de chuvas) dos Espodossolos; limitações na mecanização das áreas devido ao teor de umidade; limitações devido à resistência mecânica quando seco (como, por exemplo, os Cambissolos), fato que dificulta a mecanização.

A maior parte da baixada campista se encontra limitada por depósitos terciários. Frequentemente existe contato direto dos depósitos quaternários, que formam a bacia sedimentar, com rochas gnáissicas do pré-cambriano (Ravelli neto, 1989).

2.2.3- Caracterização dos solos do embasamento cristalino

A região é composta de rochas pré-cambrianas (predominantemente gnaisses), sendo que os diversos tipos apresentam graus variáveis de resistência à erosão geológica e aos fatores climáticos de decomposição, a presença na área de cristas emergentes de rochas gnáissicas mais resistentes, combinada ao clima quente e úmido, proporciona, devido à riqueza dessas em quartzo, constante acréscimo coluvial arenoso para os níveis topograficamente inferiores (FUNDENOR, 1971). Associado aos gnaisses quartzíticos, ocorrem gnaisses ricos em minerais cálcicos e calcários metamórficos. A sua decomposição e erosão fornecem águas cálcicas que tendem a estruturar o horizonte B dos solos situados em cotas inferiores. (Fundenor, 1971).

Foram identificados Latossolos vermelho amarelos, e demais Latossolos, com diferentes horizontes A, Argissolo Vermelho Amarelo, Neossolos Litólicos, Neossolos Flúvicos, Chernossolos, Gleissolos, Vertissolos.

Muitas limitações ao uso agrícola podem ser descritas quanto aos solos do domínio cristalino da região, dentre elas a dificuldade de mecanização devido ao afloramento das rochas (rochiosidade) e à declividade dos solos de até 30% no geral, podendo ocorrer maiores declividades. Solos pouco profundos são encontrados diminuindo a faixa de exploração do sistema radicular.

Nos Gleissolos encontrados na região, têm-se muitos em trechos de várzeas, sendo mais utilizados em plantios de arroz em épocas de chuvas, alternando-se com pastagens em épocas secas. Outras características como pedregosidade, horizontes concrecionários, duripãs e fragipãs podem ocorrer nesses solos limitando o uso destes.

2.3- Condições morfológicas dos solos e desenvolvimento das plantas

Quando se fala em qualidade do solo para as plantas deve-se falar primeiramente na profundidade efetivamente disponível ao desenvolvimento radicular, o qual se refere à profundidade máxima na qual as raízes penetram livremente no corpo do solo em número razoável, sem impedimento, proporcionando às plantas suporte físico e condições de absorção de água e nutrientes. Muitas características do perfil do solo como o contato lítico, presenças de saprólitos, horizontes petroplínticos, petrocácicos, dentre outros, podem interferir no aprofundamento e desenvolvimento radicular dos vegetais. A Embrapa (1999) assinala que, além do contato lítico, a presença do lençol freático permanente também está entre os critérios definidores de classes de profundidade do solo, a qual, a rigor, não constitui um impedimento físico ou químico, mas sim fisiológico. No entanto, o contato lítico realmente separa o solo da rocha coerente a ele subjacente, permitindo indicar inequivocamente a profundidade do solo, o que não acontece com o lençol freático, que normalmente oscila durante o tempo.

De acordo com Embrapa (1999), saprólito é o resultado do intemperismo da rocha, com variado grau de intensidade, mantendo sua estrutura de origem e dureza compatível com qualquer condição de rocha semi-alterada. Acontece que, devido à variação na intensidade do intemperismo, além da quantidade e disposição das fraturas, o saprólito apresenta diferentes graus de limitação ao

crescimento de raízes, à circulação de água e à escavação (Pedron, 2007; Stürmer, 2008).

A morfologia do solo interfere no desenvolvimento das plantas, sendo um fator de grande importância a ser considerado. De acordo com Embrapa (1999), a ocorrência de horizontes subsuperficiais com alta densidade e resistência mecânica, aparentemente cimentada quando seco, mas com moderada a fraca resistência a quebra (fragipã) em profundidades menores que 1 metro pode limitar o crescimento radicular. O mesmo ocorre com o horizonte duripã que neste caso é cimentado pela sílica, podendo ter cimentos acessórios tais como óxidos de ferro e carbonato.

A coesão é outra característica que influencia consideravelmente no desenvolvimento de plantas, sendo ela mais expressiva nos solos de Tabuleiros costeiros. Embora esse fenômeno seja descrito e reconhecido a bastante tempo, apenas recentemente esse tipo de comportamento do solo foi incorporado ao Sistema Brasileiro de Classificação de Solos (SiBCS) por meio da criação e utilização do atributo diagnóstico “caráter coeso” (Embrapa, 2006). Esse caráter é uma característica pedogenética (adensamento), típica de horizontes subsuperficiais (BA e, ou, parte do Bw ou Bt), de textura média, argilosa ou muito argilosa, encontrada normalmente entre 0,30 e 0,70 m de profundidade. Em condições naturais, apresentam uma fraca organização estrutural e são geralmente maciços, com consistência muito dura ou extremamente dura quando secos, passando a friáveis ou firmes quando úmidos.

2.4- Condições físicas dos solos e a resposta das plantas

Os vegetais possuem uma ampla dependência do ambiente em que vivem, particularmente em relação aos fatores como: luz, água, CO₂, O₂, nutrientes minerais, solo, etc. Este último fator do ambiente, o solo, influencia muito no crescimento e desenvolvimento das plantas. Seus atributos, dentre eles os físicos e morfológicos, influenciam na produção de plantas de maneira decisiva, levando ao sucesso ou insucesso de acordo com a importância que cada item desempenha durante o período da produção agrícola. Usando o crescimento de plantas como referência, Letey (1985) classifica os atributos físicos do solo em dois grupos: os que afetam diretamente o crescimento de

plantas e os que afetam indiretamente. Segundo Letey (1985), no primeiro grupo estariam inclusas a disponibilidade de água, a aeração, a temperatura e a resistência mecânica, enquanto que os demais atributos físicos do solo estariam no segundo grupo.

Destaca-se o papel central desempenhado pela umidade do solo, pois esta é determinante para os demais atributos diretos.

Um processo decorrente do uso agrícola dos solos é a compactação que é a diminuição do volume do solo ocasionada por compressão, isto causa um rearranjo das partículas do solo, logo a densidade é aumentada reduzindo a porosidade total do solo, aumentando a resistência mecânica, reduzindo a água retida disponível e conseqüentemente interferindo de forma decisiva nos atributos diretamente relacionados ao crescimento das plantas.

A resistência mecânica do solo à penetração aumenta, mediante a diminuição de volume do mesmo, quando são submetidos a uma força de compressão. Essas forças podem ser externas, proveniente da pressão de qualquer objeto sobre a superfície, ou internas quando provenientes de ciclos de umedecimento e secagem, dispersão de argilas e outros fatores pedológicos derivados da evolução do solo. De acordo com Shierlaw & Alston (1984), a compactação do solo diminui o número de poros grandes, similares, em tamanho e diâmetro, às raízes das plantas. Deste modo, para que as raízes possam penetrar em poros de diâmetros menores que os seus, elas precisam vencer a resistência do solo e deslocar suas partículas. Assim, as raízes finas podem penetrar em solos compactados mais facilmente que as grossas, o que também foi verificado por Whiteley & Dexter (1982).

Em solo compactado o número de macroporos é reduzido e a densidade é maior, o que, em solo seco, resulta em maior resistência física ao crescimento das raízes e decréscimo no potencial de água, enquanto que em solo úmido gera falta de oxigênio e, principalmente, elevadas concentrações de etileno na zona radicular, devidas à menor aeração (Marschner, 1995). O resultado de todas essas alterações no solo compactado é que as raízes sofrem modificações morfológicas e fisiológicas, por vezes específicas a cada espécie ou cultivar, a fim de se adaptarem (Müller et al., 2001).

É conveniente entender que a compactação do solo se origina essencialmente da atividade agrícola, e o adensamento do solo, é decorrente da

pedogênese. Este entendimento é importante devido a poucos estudos dos efeitos do adensamento no desenvolvimento vegetal e em segundo, porque, em termos práticos, o adensamento impõe as mesmas restrições que a compactação impõe ao desenvolvimento vegetal, distinguindo-se por ser a compactação minimizada ou até eliminada com o uso de subsoladores. Já o adensamento genético e a coesão a ele associada, por serem características permanentes do solo, podem voltar a se estabelecer mesmo após a subsolagem. (Manzatto et. al, 1998).

2.5- Princípios básicos do GPR.

O radar de penetração dos solos (GPR) é um equipamento para investigações geofísicas que fornece pseudo-imagens tridimensionais, ou em duas dimensões, do subsolo. É uma técnica tempo-dependente, de alta resolução eletromagnética e com frequência geralmente entre 50 e 2,6 GHz.

Um pulso de energia eletromagnética no domínio do tempo se propaga de uma antena de transmissão para dentro do solo e é gravada por uma antena receptora. O pulso de energia gravada ao longo do tempo fornece um histórico do tempo da viagem deste pulso através da subsuperfície. O campo eletromagnético gerado pelo aparelho é modificado pelo contraste da constante dielétrica (ϵ) e permeabilidade magnética (μ) dos materiais de subsuperfície, como, por exemplo, a areia, a argila, camadas de cimentação, materiais lateríticos, água, dentre outros. Como muitos solos têm variação de permeabilidade magnética negligenciável, ϵ tem mais importância nas respostas registradas nos radargramas. Em situações de baixas perdas de refletância (solos com baixa salinidade e conteúdo de argila) a velocidade eletromagnética no solo é diminuída ou atenuada, podendo ser relacionada com a constante dielétrica dos solos ou dos materiais neles contidos.

De acordo com Annan (1996), tanto a condutividade elétrica quanto a constante dielétrica são importantes, pois afetam diretamente a atenuação e a propagação das ondas de radar, respectivamente. Ward e Hohmann (1987) sugerem que a condutividade elétrica é dominante para ondas eletromagnéticas de baixa frequência (< 1MHz), enquanto que em altas frequências (> 1MHz) a constante dielétrica é dominante.

A propagação de uma onda eletromagnética de alta frequência no terreno pode ser descrita pela sua velocidade e a atenuação sofrida durante o percurso.

Em condições de baixa perda, a velocidade (V) está relacionada com a constante dielétrica (ϵ) do meio de propagação, sendo dada pela seguinte expressão:

$$V = c / \epsilon^{1/2} \quad (1)$$

onde c é velocidade da onda eletromagnética no espaço livre (Davis e Annan, 1989). De acordo com a expressão nota-se que quanto menor é a constante dielétrica do solo, maior será a penetração do sinal, conseqüentemente maior será a resolução. Na Tabela 1 pode-se observar a constante dielétrica e a condutividade elétrica de alguns materiais.

Para materiais que têm muitos componentes, como, por exemplo, o solo que é constituído de ar e água no seu espaço poroso e das partículas de diversas naturezas, a constante dielétrica pode ser descrita usando o seguinte modelo de mistura descrito na equação 2, onde α é a porosidade do solo, θ é o conteúdo de água livre no solo e ϵ_s , ϵ_a e ϵ_w são as constantes dielétricas das partículas do solo, ar e água, respectivamente. (Roth et al., 1990).

$$\epsilon = [(1-\alpha) \epsilon_s^{1/2} + (\alpha-\theta) \epsilon_a^{1/2} + \theta \epsilon_w^{1/2}]^2 \quad (2)$$

O pulso de energia eletromagnética gerado pelo GPR pode passar diretamente da antena transmissora para a receptora através do ar, sendo conhecida como onda do ar (airwave). Parte da energia transmitida se propaga através do solo ao longo da interface solo-ar, e é recebida pela antena receptora, esta é chamada de ondas do solo (groundwave) e outra parte da energia transmitida é refletida de volta a antena de recepção devido aos contrastes da constante dielétrica dos materiais do solo. O esquema de funcionamento das antenas de GPR é mostrado na Figura 1.

Além do modelo de aquisição dos dados do esquema mostrado na Figura 1, utilizando duas antenas, também pode ser utilizada apenas uma antena, que faz o papel de transmissora e receptora (Figura 2), nesse caso, a antena funciona de forma monoestática, ou seja, a posição de saída da onda eletromagnética é a mesma posição de chegada.

Tabela 1: Constante dielétrica (ϵ) e condutividade elétrica (σ) comumente observada nos materiais para as frequências utilizadas no GPR. (Porsani, 1999).

Materiais	Constante Dielétrica (ϵ)	Condutividade Elétrica (σ) mS/m
Ar	1	0
Água destilada	81	0,01
Água fresca	81	0,5
água do mar	81	3000
Areia seca e cascalho	2 - 6	0,01
Areia saturada	20 - 30	0,1 - 1
Argila seca	5	2
Argila saturada	40	1000
Calcário seco	4	0,5
Calcário saturado	8	2
Folhelho e siltito seco	5	1
Folhelho saturado	7	100
Siltito saturado	30	100
Silte saturado	10	1 - 10
Arenito saturado	20 - 30	40
Solo arenoso seco	2,6	0,14
Solo arenoso saturado	25	6,9
Solo argiloso seco	2,4	0,27
Solo argiloso saturado	15	50
Basalto seco	6	1
Basalto saturado	8	10
Diabásio seco	7	10
Diabásio saturado	8	100
Granito seco	5	0,01
Granito saturado	7	1
Sal seco	5 - 6	0,01 - 1
Ferro	1	109
Aço	1	∞
PVC	8	0
Asfalto	3 - 5	0
Concreto seco	5,5	0
Concreto saturado	12,5	0
LNAPL	2	0
DNAPL	2 - 3	0
Hexano	1,88	0,5
Diclorometano	8,3	1,1
Benzeno	2,24	0,11
Metanol	33,7	0,38
Óleo e outras subst. Orgânicas	2	0,5

Obs.: LNAPL e DNAPL são hidrocarbonetos derivados do petróleo que contaminam o solo.

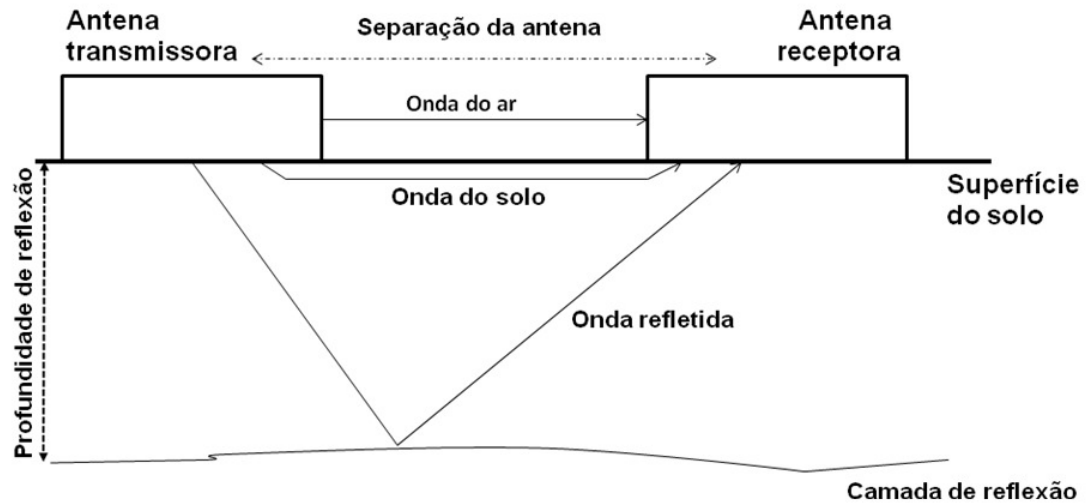


Figura 1: Diagrama esquemático mostrando as antenas do GPR e as viagens da onda do ar, do solo e da energia refletida. (adaptado de Lunt et. al, 2005).

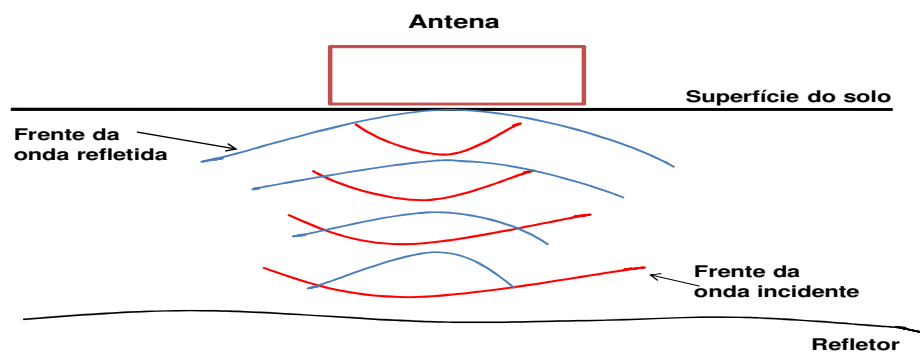


Figura 2: Diagrama esquemático mostrando a antena do GPR trabalhando no modo monoestático de aquisição de dados.

2.6 Técnicas de aquisição dos dados com o GPR

Além do modelo de aquisição dos dados monoestático, apresentado na Figura 2, são descritas as técnicas de aquisição dos dados do GPR que são usadas no trabalho, sendo elas a técnica “common-offset” e as técnicas de

aquisição da velocidade do radar, denominadas “Multioffset common midpoint” (CMP) e “wide-angle reflection” (WARR).

Investigações feitas com a técnica “common-offset”, consistem em um caminhamento contínuo em superfície coletando os dados do perfil, mantendo-se um espaçamento constante entre as antenas, enquanto o operador as arrasta pela superfície. As investigações feitas com a técnica CMP (common midpoint) são feitas afastando as antenas de um ponto central, em intervalos de distâncias iguais, em que com a separação das antenas os perfis vão sendo obtidos. A técnica WARR (wide-angle reflection) é realizada mantendo-se constante a posição da antena transmissora e variando a posição da antena receptora. Na figura abaixo se observa as duas técnicas de aquisição da velocidade da onda do radar.

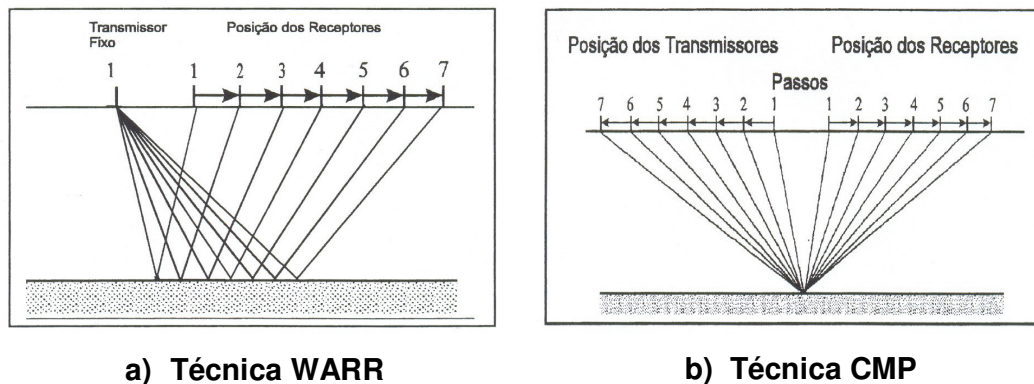


Figura 3: técnicas de aquisição da velocidade da onda do radar no solo (Possani,1999).

2.7- Uso do GPR para a caracterização dos solos.

Reflexões do GPR são causadas principalmente pela diferença vertical das propriedades dielétricas do solo. Essas propriedades dielétricas influenciam a velocidade de propagação, a atenuação e a profundidade de penetração da energia eletromagnética, sendo determinante para a eficácia do GPR.

A resolução e a profundidade de penetração do GPR são determinadas pela frequência das antenas e pelas propriedades elétricas dos materiais terrestres. Por causa das altas taxas de atenuação dos sinais, a profundidade de penetração é muito reduzida em solos que têm alta condutividade elétrica. Esta

condutividade elétrica aumenta com o aumento do conteúdo de água, sais solúveis e teores de argila (McNeill, 1980).

As fases líquida, sólida ou gasosa da água do solo estão diretamente relacionadas à sua condutividade elétrica e permissividade dielétrica (constante dielétrica). Conseqüentemente há um aumento da energia de dissipação com o aumento do conteúdo de água no solo (Daniels, 2004; Campbell, 1990). Quando um campo elétrico alternado é aplicado no solo, as moléculas de água sofrem uma força que alinha seus momentos dipolo paralelamente à direção do campo elétrico aplicado. Um pequeno deslocamento do limite das moléculas de água resulta em perda de parte da energia como calor. O processo de polarização resulta na armazenagem de alguma energia do campo elétrico e perda dielétrica. Em freqüências acima de 500 MHz a absorção da energia pela água é o principal mecanismo de perda de energia em solos (Daniels, 2004).

Os conteúdos de sais solúveis afetam a condutividade elétrica e a perda de energia do GPR em solos. Estes sais aumentam a atenuação da energia eletromagnética. Logo, solos salinos e sódicos são considerados inadequados ou limitados para o uso do GPR, restringindo, devido a essas características, a penetração a profundidades menores que 25 cm.

O conteúdo e o tipo de argila também influenciam na condutividade elétrica dos solos. Partículas de argila que têm grande área superficial podem reter mais água e possuem alta capacidade de troca de cátions, motivo pelos quais o aumento desse tipo de argila no solo aumenta a dissipação da energia eletromagnética no solo. Como conseqüência, a profundidade de penetração do GPR é inversamente relacionada com o conteúdo de argila. Solos com fração argila dominados por argilas de alta CTC (esmectitas, vermiculitas) são mais atenuantes para o GPR que solos com uma porcentagem equivalente de argilas de baixa CTC (caulinita, gibsitita). Logo a condutividade elétrica e a perda de energia aumentam com o aumento da CTC (Saarenketo, 1998).

Olhoeft (1986) observou que, com uma antena de 100 MHz, uma profundidade de penetração em torno de 30 m poderia ser alcançada em alguns solos argilo-arenosos. No entanto, com a adição de somente 5% de argila (por peso) a profundidade de penetração foi reduzida 20%.

Doolittle e Collins (1998) notaram que, dependendo da freqüência da antena e da condutância específica da solução do solo, profundidades de

penetração de 5 a 30 metros eram observadas em solos secos arenosos (>70% areia e <15 % argila), enquanto somente cerca de 50 cm de profundidade de penetração eram observadas em solos úmidos argilosos (> 35% de argila).

Segundo Doolittle e Butnor (2009), o GPR tem sido efetivamente usado para fornecer dados sobre a presença, a profundidade, a extensão lateral e a variabilidade dos horizontes diagnósticos de subsuperfície que são utilizados para classificar os solos. Estando em condições de solos adequadas, o GPR é utilizado para determinar a profundidade de contraste dos horizontes superficiais. Segundo os mesmos autores, horizontes genéticos enterrados, camadas densas de restrição às raízes, acumulação iluvial de matéria orgânica, horizontes cimentados ou endurecidos, podem todos ser identificados pelo uso do GPR.

Dourado et al. (2003), utilizando antenas de várias frequências, obtiveram com a antena de 200 MHz imagens nítidas da distinção do lençol freático e do horizonte C/R da transição do solo arenoso para a rocha alterada.

Utilizando o GPR, Doolittle et al. (2005), conseguiram identificar plintita e o horizonte plíntico em solos altamente intemperizados, de textura média a fina com baixa CTC, do estado da Lousiana, nos Estados Unidos.

3. TRABALHOS

3.1- USO DO RADAR DE PENETRAÇÃO NO SOLO PARA IDENTIFICAR ESPODOSSOLOS NA RESTINGA DE JURUBATIBA

RESUMO

Embora a descrição morfológica do solo não possa ser substituída, o emprego de novas tecnologias pode dinamizar e melhorar estas investigações, tanto no aspecto econômico quanto na rapidez da coleta de informações. Uma dessas tecnologias é o radar de penetração no solo (GPR), que permite obter imagens de alta resolução da subsuperfície do solo. O presente trabalho foi realizado em uma área de ocorrência de Espodossolos, no Parque Nacional da Restinga de Jurubatiba, em Carapebus–RJ. A caracterização morfológica tradicional foi realizada em um perfil exposto, enquanto a investigação geofísica foi realizada em uma seção de 60 metros próxima. Tanto no perfil quanto em três pontos ao longo dessa seção foi realizada também a caracterização física do solo. O horizonte espódico foi alcançado nas profundidades de 0,40 m, 0,20 m e 1,30 m para os pontos 1, 2 e 3, respectivamente. Nos três pontos da seção, a velocidade da onda eletromagnética no solo foi medida pela técnica CMP e

estimada a partir de seus atributos físicos por meio de equações, sendo esta última técnica mais discriminante quanto aos valores obtidos ao longo do perfil. Os radargramas mostram diferenças na feição do B espódico em relação aos outros horizontes, o que ocorre devido ao acúmulo de óxidos de ferro e matéria orgânica e à maior umidade. Tais características ocasionam maior constante dielétrica e maior coeficiente de reflexão para o horizonte estudado, permitindo, assim, identificá-lo.

Termos de indexação: Georradar; classificação de solos; constante dielétrica do solo, velocidade da onda eletromagnética no solo.

ABSTRACT

USING GROUND-PENETRATING RADAR TO IDENTIFY SPODOSOLS AT RESTINGA OF JURUBATIBA.

Although the morphological description of soil cannot be replaced the use of new technologies can streamline and improve these investigations, as in economic aspect as in speed of information gathering. One such technology is ground penetrating radar (GPR), which gives high-resolution images of the subsurface soil. This work was done in an area of occurrence of Spodosols in Jurubatiba National Park, Carapebus state- RJ. Traditional characterization morphological was performed in profile exposed, while the geophysical survey was conducted in a section of 60 meters next. As in profile as in the three points along this section was also performed the physical characterization of soil. Spodic horizon was reached at depths of 0.40 m, 0.20 m and 1.30 m for points 1, 2 and 3, respectively. In three points of the section the velocity of electromagnetic wave in the soil was measured by the CMP technique and estimated from its physical attributes by equations, the latter technique being more discriminating about the values obtained along the profile. The radar grams show differences in the feature of spodic in relation to other horizons, which occurs due to accumulation of iron oxides and organic matter and higher humidity. These characteristics lead to

greater dielectric constant and reflection coefficient to the horizon studied thus allowing their identification.

Terms for Indexation: Georradar, soil classification, soil dielectric constant, velocity of electromagnetic wave in the soil.

INTRODUÇÃO

Embora possivelmente a descrição morfológica e a caracterização física tradicionalmente empregadas em levantamentos de solos jamais possam ser dispensadas, o emprego de novas tecnologias pode contribuir tanto para minimizar o oneroso trabalho de campo e laboratório quanto para melhorar o detalhamento das informações obtidas. Uma dessas tecnologias é o radar de penetração no solo (GPR), o qual pode mostrar informações detalhadas sobre aspectos físicos e morfológicos dos perfis de solo (Paixão et al., 2006).

O radar de penetração nos solos (GPR) é um equipamento para investigações geofísicas que fornece pseudo-imagens tridimensionais, ou em duas dimensões, do subsolo. É uma técnica tempo-dependente, de alta resolução eletromagnética e com frequência geralmente entre 12,5 MHz e 2,6 GHz.

Um pulso de energia eletromagnética se propaga de uma antena de transmissão para dentro do solo e a porção que retorna é gravada por uma antena receptora. O pulso de energia gravado ao longo do tempo fornece um histórico do tempo da viagem do pulso através da subsuperfície. O campo eletromagnético gerado pelo aparelho é modificado pelo contraste da constante dielétrica (ϵ) e permeabilidade magnética (μ) dos materiais de subsuperfície, como, por exemplo, a areia, a argila, camadas de cimentação, materiais lateríticos, água, dentre outros. Como muitos solos têm variação de permeabilidade magnética negligenciável, ϵ tem mais importância nas respostas registradas nos radargramas.

Reflexões do GPR são causadas principalmente pela diferença vertical das propriedades dielétricas do solo. Essas propriedades dielétricas influenciam a velocidade de propagação, a atenuação e a profundidade de penetração da energia eletromagnética, sendo determinante para a eficácia do GPR.

A resolução e a profundidade de penetração do GPR são determinadas pela frequência das antenas e pelas propriedades elétricas dos materiais

terrestres. Por causa das altas taxas de atenuação dos sinais, a profundidade de penetração é muito reduzida em solos que têm alta condutividade elétrica. Esta condutividade elétrica aumenta com o aumento do conteúdo de água, sais solúveis e teores de argila (McNeill, 1980).

O conteúdo e o tipo de argila também influenciam na condutividade elétrica dos solos. Partículas de argila que têm grande área superficial podem reter mais água e possuir alta capacidade de troca de cátions, motivo pelos quais o aumento desse tipo de argila no solo aumenta a dissipação da energia eletromagnética. Como consequência, a profundidade de penetração do GPR é inversamente relacionada com o conteúdo de argila. Solos com fração argila dominados por argilas de alta CTC (esmectitas, vermiculitas) são mais atenuantes para o GPR que solos com uma porcentagem equivalente de argilas de baixa CTC (caulinita, gibsitita), de modo que a condutividade elétrica e a perda de energia aumentam com o aumento da CTC (Saarenketo, 1998).

Em estudos em nível mundial na Ciência do Solo o GPR tem sido utilizado em diversos países com várias aplicações, dentre elas: (i) estimar a profundidade e espessura dos horizontes dos solos (Collins e Doolittle, 1987; Doolittle, 1987); (ii) identificar a variabilidade espacial do horizonte B espódico (Burgoa et al., 1991); (iii) estimar a densidade dos solos (Collins et al., 1989); (iv) estimar a cor e o conteúdo de carbono orgânico do solo (Doolittle, 1982; Collins e Doolittle, 1987); (v) determinar a espessura e o volume de depósitos orgânicos (Doolittle, 1983; Shih e Doolittle, 1984; Collins et al., 1986; Doolittle et al., 1990); (vi) mapear o lençol freático em áreas que estejam a profundidades menores que 12 metros (Shih et al., 1986); (vii) identificar camadas de cimentação e a sua continuidade ao longo do solo (Mokma et al., 1990); e (viii) estudar mudanças em propriedades dos solos que afetam a produtividade das florestas (Farrish et al., 1990) e o estresse hídrico de pomares de frutas (Shih et al., 1985). O uso do GPR na ciência de solos está em expansão no Brasil. Cezar et al. (2010) avaliam o uso do GPR na estabilização das propriedades físicas de um Latossolo cultivado com cana-de-açúcar. Ucha et al. (2002) analisando o uso desta ferramenta na aquisição de informações nas feições ocorridas no subsolo, confirmando a existência de processos de transformações podzólicas que ocorrem junto com fragipãs em profundidade.

Segundo Doolittle e Butnor (2009), o GPR tem sido efetivamente usado para fornecer dados sobre a presença, a profundidade, a extensão lateral e a variabilidade dos horizontes diagnósticos de subsuperfície que são utilizados para classificar os solos. Estando em condições de solos adequadas, o GPR é utilizado para determinar a profundidade de contraste dos horizontes superficiais. Segundo os mesmos autores, horizontes genéticos enterrados, camadas densas de restrição às raízes, acumulação iluvial de matéria orgânica, horizontes cimentados ou endurecidos, podem todos ser identificados pelo uso do GPR.

O ecossistema da restinga tem grande importância na conservação do meio ambiente, o qual é composto de vegetação de tamanho médio e rasteiro dispostas em reboleira que são adaptadas às condições de seca e de solos pobres em nutrientes. Os Espodossolos são uma classe pedológica de solos que ocorrem no Brasil em áreas costeiras arenosas, ácidas e pobres em nutrientes (Oliveira et al., 2010).

Estudos anteriores têm utilizado antenas de baixa frequência (120 a 500 MHz) para estudar o horizonte espódico. A alta frequência da antena de 900 Mhz pode fornecer altas resoluções das afeições de subsuperfície. O trabalho teve como objetivo identificar o horizonte diagnóstico subsuperficial de espodossolos fazendo uso do GPR com uma antena de 900 Mhz.

MATERIAL E MÉTODOS

A área de estudo localiza-se no Norte Fluminense, no Parque Nacional da Restinga de Jurubatiba (22.20139° S, 41.49261° W), Estado do Rio de Janeiro, Brasil. A precipitação média anual é de 1.164 mm, marcadamente sazonal, com médias totais mensais variando de 41 mm durante o inverno a 189 mm durante o verão. A temperatura média mensal varia de 29,7°C em janeiro a 20,0°C em julho, com média anual de 22,6°C (Henriques et al., 1986). A área de estudo está inserida na unidade geomorfológica formada no período quaternário, denominada planícies costeiras marinhas.

No local em que já se conhecia a existência do Espodossolo, foi definida como área de investigação uma seção de 60 metros de comprimento em que havia diferença na espessura dos horizontes. A caracterização morfológica do solo foi feita em um perfil exposto em canais de drenagem ao lado da estrada na

área de estudo, de acordo com o *Manual de Descrição e Coleta de Solo no Campo* (Santos et.al 2005).

Delimitados os horizontes, amostras de solo foram coletadas, sendo aquelas com estrutura deformada utilizadas para a caracterização química, granulométrica e de densidade de partículas (ρ_s), e aquelas com estrutura indeformada, coletadas em anéis volumétricos de 275 mL, para a determinação da densidade do solo (ρ) e da condutividade hidráulica do solo saturado (K_{sat}). A porosidade total (α) foi calculada da equação $\alpha = 1 - \rho/\rho_s$ (Embrapa, 1997). A análise granulométrica foi realizada com dispersão da amostra em solução de hidróxido de sódio sob agitação lenta, sendo a areia determinada por peneiramento (depois seca e fracionada de acordo com a escala do USDA), a argila pelo método da pipeta e o silte por diferença (Gee & Bauder, 1986). A determinação da densidade de partículas (pelo método do balão volumétrico com álcool) e da condutividade hidráulica do solo saturado (pelo método do permeâmetro de carga constante) foi realizada de acordo com Embrapa (1997). A caracterização química foi feita no Centro de Análises da UFRRJ-Campus Dr. Leonel Miranda, em Campos dos Goytacazes-RJ, seguindo metodologias preconizadas em Embrapa (1997).

Ao longo da seção de 60 m, amostras de solo foram coletadas em três pontos espaçados 25 metros entre si (pontos 1, 2 e 3, posicionados, respectivamente, a 5, 30 e 55 m do início da seção). As amostras foram coletadas em camadas de 0,20 m de espessura, da superfície até uma profundidade máxima de 1,60 m, a qual permitiu que em todos os pontos fosse alcançado o horizonte espódico. Estas amostras foram usadas para caracterizar a distribuição por tamanho e densidade de partículas, conforme descrito anteriormente, e para determinar a umidade gravimétrica do solo (U , kg kg^{-1}). O conteúdo volumétrico de água do solo (θ , $\text{m}^3 \text{m}^{-3}$) foi calculado pela equação $\theta = U \rho/\rho_{\text{H}_2\text{O}}$, sendo o valor de ρ de cada camada considerado igual ao determinado no perfil de solo no horizonte correspondente.

Na investigação geofísica foi utilizado o GPR da Geophysical Survey Systems, Inc. modelo TerraSIRch System-3000 com uma antena de 900 MHz e outra de 100 Mhz. A antena de 100 MHz foi utilizada para realizar a técnica “common midpoint”, que permite obter a estimativa da velocidade da onda eletromagnética no solo. Nesta técnica o espaçamento entre antenas foi de zero a

8 m, com incrementos de 0,20 m. Os perfis CMP foram feitos ao longo da seção de investigação, nos três pontos em que foram coletadas amostras de solo (pontos 1, 2 e 3).

A antena de 900 Mhz foi utilizada usando apenas a técnica “common-offset”, tanto em caminhamento contínuo quanto em traço por traço. O aparelho, quando usado com a antena de 100 MHz, possuía a seguinte configuração: bites por amostra: 16; taxa de transmissão: 50 kHz; intervalo: 300 ns; número de ganho por ponto: 5; filtro passa baixa vertical: 300 MHz; filtro passa alta vertical: 25 MHz; amostra por scan: 512. Quando a antena de 900 MHz era utilizada, a configuração foi a seguinte: bites por amostra: 16; taxa de transmissão: 100 kHz; intervalo: 15 ns; número de ganho por ponto: 3; filtro passa baixa vertical: 2500 MHz; filtro passa alta vertical: 225 MHz; amostra por scan: 512.

O programa Gradix (Interpex, 1996) foi utilizado para o processamento de dados, que consistiu de: edição de dados (eliminação de traços repetidos, correção de cabeçalhos headers, re-posicionamento ou reversão de perfis, etc.); *Dewow* (eliminação de ruídos de baixa frequência); ajuste do tempo zero; limitação das janelas de tempo e aplicação de filtros.

A partir das relações volumétricas entre partículas, água e ar presentes nos horizontes do solo, a constante dielétrica do solo foi estimada por:

$$\epsilon = [(1-\alpha) \epsilon_s^{1/2} + (\alpha-\theta) \epsilon_a^{1/2} + \theta \epsilon_w^{1/2}]^2 \quad (1)$$

onde α é a porosidade do solo, θ é o conteúdo de água livre no solo e ϵ_s , ϵ_a e ϵ_w são as constantes dielétricas das partículas do solo, ar e água, respectivamente. (Roth et al., 1990). Enquanto os valores da constante dielétrica utilizados para a água e o ar foram os universalmente reconhecidos (81 e 1, respectivamente), ϵ_s foi assumido como 4 (Cassidy, 2009), correspondente à areia seca.

A velocidade da onda eletromagnética no solo, além de ser obtida pela técnica do CMP com a antena 100 MHz, foi estimada também a partir dos valores de ϵ obtidos a partir da equação 1, por meio da equação:

$$v = c / \epsilon^{1/2} \quad (2)$$

onde v é a velocidade da onda eletromagnética no solo e c é a velocidade da luz no vácuo (assumida como $0,3 \text{ m ns}^{-1}$).

Para a diferenciação dos horizontes do solo a partir de suas propriedades eletromagnéticas foi calculado também o coeficiente de reflexão, pela equação:

$$r = (\epsilon_1^{1/2} - \epsilon_2^{1/2}) / (\epsilon_1^{1/2} + \epsilon_2^{1/2}) \quad (3)$$

em que r é coeficiente de reflexão entre dois horizontes subseqüentes e ϵ_1 e ϵ_2 são, respectivamente, as constantes dielétricas dos horizontes superior e inferior.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Na Figura 1 são apresentadas as fotos da paisagem local e do perfil do Espodossolo estudado na Restinga de Jurubatiba (Carapebus-RJ). Com relação à paisagem verifica-se que a vegetação é herbácea-arbustiva, sendo encontrada em formas de moitas ou reboleiras; São encontrados termiteiros, que ocorrem em superfície com coloração escura, no qual aflora o material que compõe o horizonte B espódico; O relevo do local apresenta uma superfície com pequenas ondulações que revelam herança da regressão marinha do período Pleistoceno ao Holoceno e ação eólica sobre a paisagem.

Com relação ao perfil, verifica-se o contraste de tonalidade entre o horizonte B espódico e o horizonte sobrejacente E, com transição abrupta entre eles. A porção central do B espódico apresenta cimentação que determina consistência do solo muito dura e muito firme, conforme consta na Tabela 1, que traz a descrição morfológica completa do perfil, com a identificação e a profundidade dos horizontes.

Os resultados da análise química do material dos horizontes que compõem o perfil do Espodossolo são apresentados na Tabelas 2. Verifica-se que o perfil é muito pobre em cátions trocáveis e apresenta expressivos teores de Al^{+3} , resultando em caráter distrófico e álico. Os sub-horizontes do B espódico apresentam baixo pH e elevados teores de C orgânico, resultado do processo de transporte seletivo desse material em profundidade, em associação com o ferro e alumínio.

A Tabela 3 apresenta os atributos físicos do perfil do Espodossolo, incluindo a densidade de partículas, a composição granulométrica, densidade, porosidade e a condutividade hidráulica do solo. Verifica-se que a textura é arenosa em todo o perfil, sendo que os horizontes E, Bh_1 e Bhs_2 apresentam os

maiores teores de areia grossa e muito grossa, enquanto o A e o Bh₃ apresentam os maiores teores de areia fina. Quanto ao teor de argila, verifica-se que os valores absolutos são baixos (inferiores a 100 g kg⁻¹), sendo os valores mais expressivos coincidentes com os horizontes A e B (todos os sub-horizontes). Pode-se afirmar que a maior parte dessa fração argila é representada pela própria matéria orgânica do solo, uma vez que não foi feito pré-tratamento das amostras para sua eliminação.

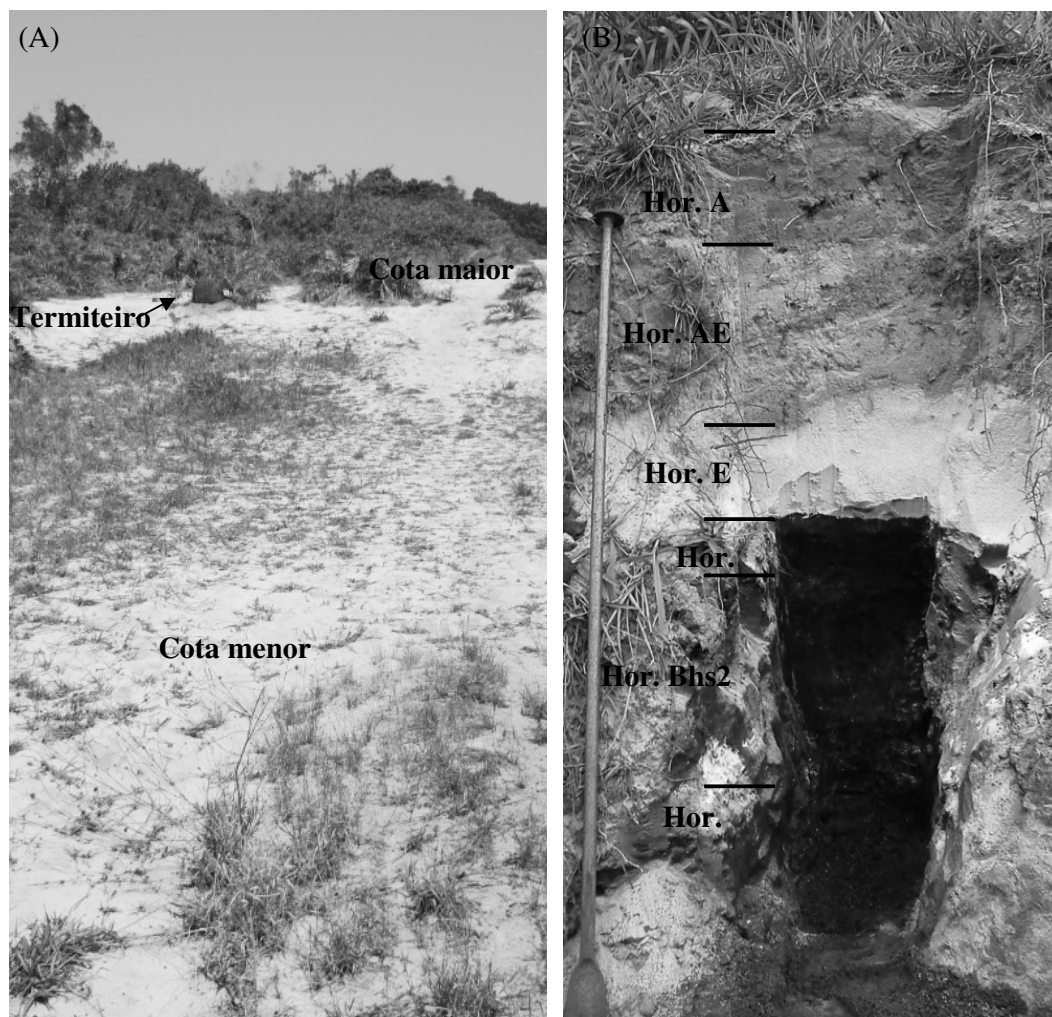


Figura 1: Vista geral da paisagem (A) e perfil do Espodossolo Ferrihumilúvico (B) na área estudada (Restinga de Jurubatiba, Carapebus-RJ). Fotos: Vitor Luiz Medeiros Barros Júnior

Tabela 1: Classificação e descrição morfológica do perfil de Espodossolo estudado (Restinga de Jurubatiba, Carapebus-RJ).

Classificação: Espodossolo Ferrihumilúvico Órtico espessarênico

Localização: Margem esquerda da estrada entre Carapebus e o Parque Nacional da Restinga de Jurubatiba, cerca de 80 m adiante da ponte sobre o canal Campos-Macaé.

- A 0-34 cm; cinzento muito escuro (7,5YR 2,5/1, úmido), bruno (7,5YR 4/3, seco); arenosa; grãos simples; solta, solta, não plástica, não pegajosa; transição clara e ondulada.
- AE 34-68 cm; arenosa; cinzento (7,5YR 6/1, úmido), cinzento claro (7,5YR 7/1, seco); grãos simples; solta, solta, não plástica, não pegajosa; transição clara e ondulada.
- E 68-96 cm; cinzento claro (N7/, úmido), branco (N8/, seco); arenosa; solta, solta, não plástica, não pegajosa; transição abrupta e plana.
- Bh1 96-107cm; preto (7,5YR 2,5/1, úmido), cinzento escuro (7,5YR 4/1, seco); arenosa; maciça; macia, muito friável, não plástico, não pegajoso; transição abrupta e ondulada.
- Bhs2 107-155 cm; preto (7,5YR 2,5/1, úmido), bruno (7,5YR 4/3, seco); arenosa; maciça; muito duro (quebradiço), muito firme, não plástico, não pegajoso; fracamente cimentado; Transição clara e ondulada.
- Bh3 155-175⁺ cm; preto (7,5YR 2,5/1, úmido), bruno escuro (7,5YR 3/2, seco); arenosa; maciça; macia, muito friável, não plástico, não pegajoso.

Raízes: comuns em A, poucas em AE e E, ausentes nos demais horizontes.

Observações: Descrição realizada em corte de canal de drenagem.

Descrito por: Vitor Luiz Medeiros Barros Júnior; Cláudio Roberto Marciano

Data: 02/12/2010

Tabela 2: Atributos químicos dos horizontes que compõem o perfil do Espodosolo da Restinga de Jurubatiba.

Hori- zonte	pH água	C (g kg ⁻¹)	P (mg kg ⁻¹)	CEes (dS m ⁻¹)	Al ⁺³	H ⁺ +Al ⁺³	Ca ⁺²	Mg ⁺²	K ⁺	Na ⁺	SB	T	t	m	V
					----- (cmol _c dm ⁻³) -----										---- (%) ---
A	5,0	24,6	0,0	0,003	1,3	2,2	0,2	0,0	0,00	0,01	0,21	2,41	1,51	86,1	8,7
AE	5,2	3,7	2,0	0,004	0,2	1,6	0,0	0,0	0,01	0,01	0,02	1,62	0,22	91,9	1,1
E	5,9	0,7	75,0	0,000	0,2	1,9	0,0	0,0	0,03	0,03	0,06	1,96	0,26	76,7	3,1
Bh1	4,4	55,5	4,0	0,000	3,3	22,0	0,1	0,1	0,07	0,02	0,29	22,29	3,59	91,8	1,3
Bhs2	4,0	38,3	4,0	0,000	2,5	11,0	0,0	0,0	0,04	0,02	0,06	11,06	2,56	97,8	0,5
Bh3	4,3	30,7	5,0	0,002	1,4	16,0	0,0	0,0	0,08	0,01	0,09	16,09	1,49	93,7	0,6

Obs.: pH em água: potenciometria em solução solo-água 1:2,5; carbono orgânico: dicromato de potássio + colorimetria; fósforo disponível: extraído por Mehlich-1 + espectroscopia; CEes: condutividade elétrica no extrato de saturação; alumínio: extraído com solução de KCl 1 mol L⁻¹ e determinado por titulação com NaOH 0,025 mol L⁻¹, usando-se azul de bromotimol como indicador; cálcio e magnésio: extraídos com solução de KCl 1 mol L⁻¹ e determinados por espectrofotometria de absorção atômica; potássio e sódio trocáveis: extraídos pelo extrator Mehlich-1 e determinados por fotometria de chama; SB = Ca⁺² + Mg⁺² + K⁺ + Na⁺; T = SB + (H⁺+Al⁺³); T = SB + Al⁺³; m% = Al⁺³ x 100 / t; V% = SB x 100 / T, (Embrapa, 1997).

Tabela 3: Composição granulométrica, densidade do solo (ρ), densidade de partículas (ρ_s), porosidade total (α) e condutividade hidráulica (Ksat) dos horizontes que compõem o perfil do Espodosolo da Restinga de Jurubatiba.

Hori- zonte	Areia								ρ_s	ρ	α (m ³ m ⁻³)	Ksat (mm h ⁻¹)
	Muito grossa	Grossa	Média	Fina	Muito fina	Total	Silte	Argila				
	----- (g kg ⁻¹) -----								-(Mg m ⁻³)-			
A	67,8	151,9	125,5	601,4	16,5	963,0	12,1	24,9	2,65	1,43	0,46	431
AE	79,0	395,6	175,3	333,9	3,6	987,5	10,9	1,6	2,74	1,60	0,41	238
E	153,9	485,0	212,4	138,7	2,4	992,4	6,8	0,8	2,57	1,56	0,39	3208
Bh1	131,5	307,9	96,9	331,5	7,7	875,4	38,4	86,1	2,63	1,29	0,51	110
Bhs2	166,8	272,0	112,3	353,6	6,9	911,5	13,2	75,3	2,57	1,42	0,45	148
Bh3	6,8	13,4	84,5	837,7	3,7	946,1	14,3	39,6	-	-	-	-

Ainda na Tabela 3, os valores de densidade e porosidade mostram-se pouco associados a eventuais variações nas subfrações da areia, relacionando-se mais aos teores de argila ou, mais apropriadamente, de C orgânico (maiores teores de C orgânico implicam em menor densidade e maior porosidade total). Para condutividade hidráulica do solo saturado, o elevadíssimo valor verificado no horizonte E é reflexo direto da predominância de areia grossa, enquanto os menores valores para os horizontes Bh1 e Bhs2 associam-se aos teores mais elevados de argila e matéria orgânica. Esses menores valores Ksat no B espódico ocorrem a despeito da porosidade total ser igual ou superior à que se verifica nos horizontes subjacentes, podendo-se atribuir tal fato à sedimentação por matéria orgânica e óxidos de ferro e alumínio.

Na seção de 60 m definida para leitura do GPR, as investigações feitas com o trado mostram o horizonte B espódico iniciando a 0,40 m, 0,20 m e 1,30 m de profundidade para os pontos 1, 2 e 3, respectivamente, sendo este último ponto com maior cota que os outros dois. De acordo com a Tabela 4, observa-se que, tal como ocorre no perfil, os teores de argila experimentam expressivo aumento no horizonte B espódico. Os pontos 1 e 2 apresentam grandes quantidades de areia fina (superiores a 850 g kg^{-1}) se comparados ao ponto 3 (que apresentou grande quantidade de areia grossa), mostrando um processo de movimentação das partículas mais finas em profundidade e para a parte mais baixa da toposseqüência. No ponto 1 a camada superficial apresenta, comparativamente aos pontos 2 e 3, maior quantidade de argila, coincidindo com a maior presença de vegetação neste ponto. No ponto 3 o horizonte B espódico começa em uma profundidade de 1,30 m e com composição granulométrica mais grossa que a dos outros dois pontos, podendo-se observar teores de 560 g kg^{-1} de areia grossa e 201 g kg^{-1} de areia muito grossa, enquanto o de areia fina é apenas 66 g kg^{-1} (esta fração não supera 300 g kg^{-1} mesmo no horizonte A ou E).

Tabela 4: Composição granulométrica do Espodossolo (areia fracionada de acordo com escala USDA) nos três pontos de coleta (Pontos 1, 2 e 3).

Profundidade (m)	Areia					Total	Silte	Argila
	Muito grossa	Grossa	Média	fina	Muito fina			
	----- (g kg ⁻¹) -----							
Ponto 1								
0-0,20	75	131	102	612	22	942	16	42
0,20-0,40	46	134	87	651	49	968	11	21
0,40-0,60	21	55	29	752	57	915	21	64
0,60-0,80	2	8	8	849	58	925	21	54
0,80-1,00	4	10	15	852	45	926	34	40
1,00-1,20	2	6	14	887	40	949	27	24
1,20-1,40	5	6	15	892	19	937	26	37
1,40-1,60	5	4	14	913	20	956	19	25
Ponto 2								
0-0,20	90	358	90	367	57	961	39	0
0,20-0,40	81	191	53	510	71	906	16	78
0,40-0,60	10	28	8	763	86	895	23	82
0,60-0,80	3	5	4	879	43	935	10	55
0,80-1,00	6	12	5	881	34	935	21	44
1,00-1,20	3	9	4	887	42	944	24	32
1,20-1,40	2	7	9	891	37	946	22	32
1,40-1,60	1	6	13	909	22	952	20	28
Ponto 3								
0-0,20	119	613	145	107	6	990	0	10
0,20-0,40	127	603	137	115	13	994	0	6
0,40-0,60	112	599	155	115	14	995	0	5
0,60-0,80	131	479	166	196	20	992	0	8
0,80-1,00	162	376	115	299	38	989	4	7
1,00-1,20	220	375	80	282	34	991	5	4
1,20-1,30	185	392	94	277	42	990	4	6
1,30-1,60	201	560	112	66	10	948	18	34

A Figura 2 mostra a topografia da área de estudo, assim como a posição do horizonte B espódico em relação à superfície do terreno, mostrando que o mesmo se aprofunda a partir de 40 metros do ponto inicial da seção GPR. Os radargramas apresentados na Figura 3, obtidos pelos métodos do caminhamento contínuo e traço por traço, mostram-se visualmente concordantes com a Figura 2. Entre os dois métodos que foram utilizados na aquisição de dados com a antena de 900 MHz, o método do caminhamento contínuo apresentou melhor resolução, permitindo melhores afeições do horizonte estudado (Figura 3). O método traço por traço apresentou baixa resolução devido a se ter usado espaçamento de 0,30 m entre traços, sendo este afastamento coincidente com a dimensão da própria antena. Para melhor resolução é recomendado a utilização de espaçamentos menores, permitindo que traços consecutivos tenham certo nível “sombreamento” e que a repetição (ou redundância) de determinada informação possa dar confiabilidade à feição visualizada.

Os radargramas A e B da Figura 3 mostram que em 1,5 e 2 ns ocorrem contrastes na reflexão da onda eletromagnética, ao longo de todo o perfil GPR. No radargrama obtido pela técnica traço por traço pode-se destacar outro contraste de reflexão que no ponto 1 está a cerca de 3 ns e no ponto 2 se reduz a 2 ns, voltando a se aprofundar do ponto 2 ao 3, quando ocorre em cerca de 4 ns. Pela técnica do caminhamento contínuo, apesar da melhor resolução do radargrama, não é possível verificar diferença entre os pontos 1 e 2 (para ambos o tempo é de cerca de 3 ns), embora seja possível identificar o aprofundamento desse contraste de reflexão a partir dos 35 m, também atingindo cerca de 4 ns na porção final da seção (60 m). O comportamento espacial descrito, principalmente com base no radargrama traço a traço, coincide com o comportamento da profundidade do topo do horizonte B espódico.

A velocidade da onda eletromagnética medida com a antena de 100 Mhz pelo método CMP apresentou valores de 0,06, 0,093 e 0,203 m ns^{-1} nos pontos 1, 2 e 3, respectivamente, sendo esses valores representativos de uma camada de solo de espessura muito maior (cerca de 100 ns) que a avaliada com a antena de 900 MHz (cerca de 7 ns). Essa baixa resolução da antena de 100 MHz inviabiliza que a técnica do CMP diferencie as velocidades dos diversos horizontes do perfil do solo.

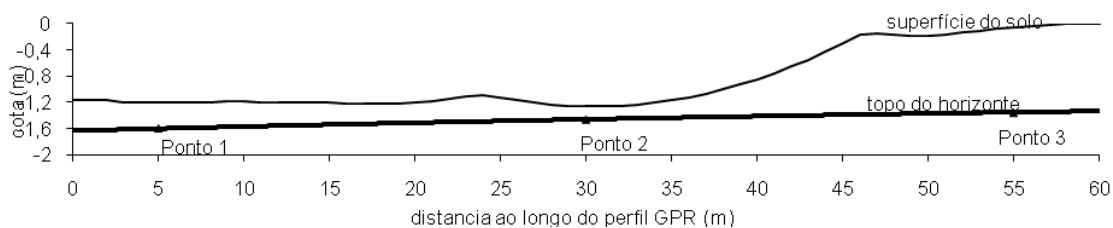


Figura 2: Topografia da área de estudo mostrando a profundidade do horizonte espódico e os pontos investigados.

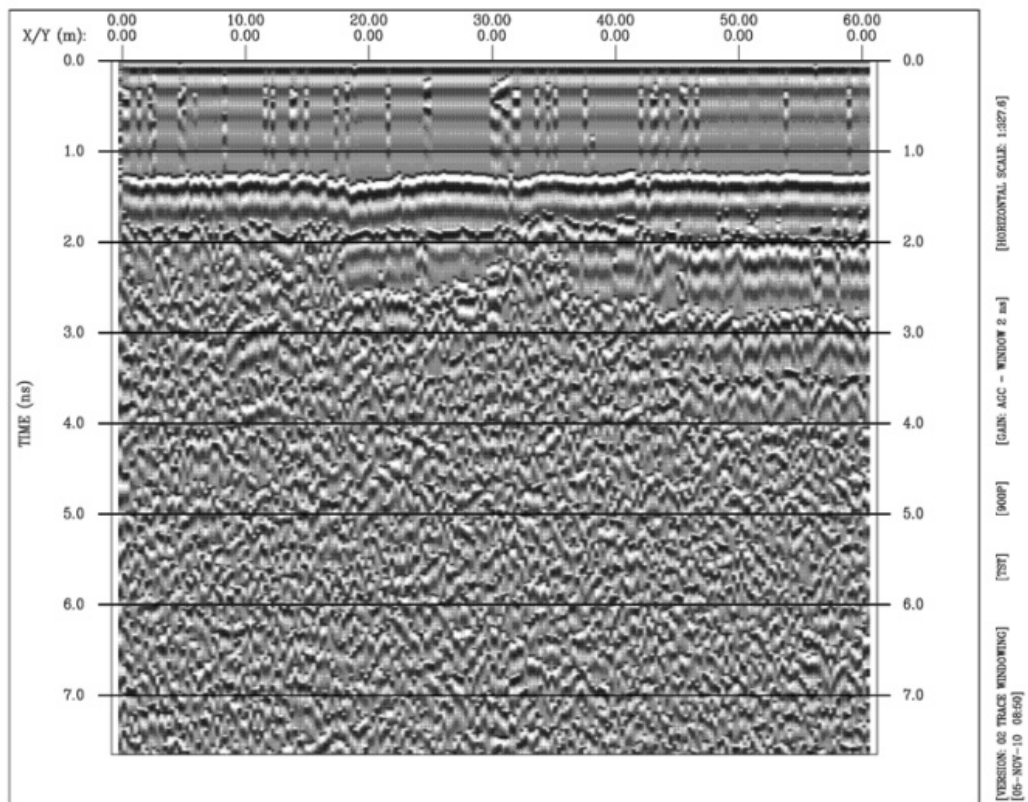
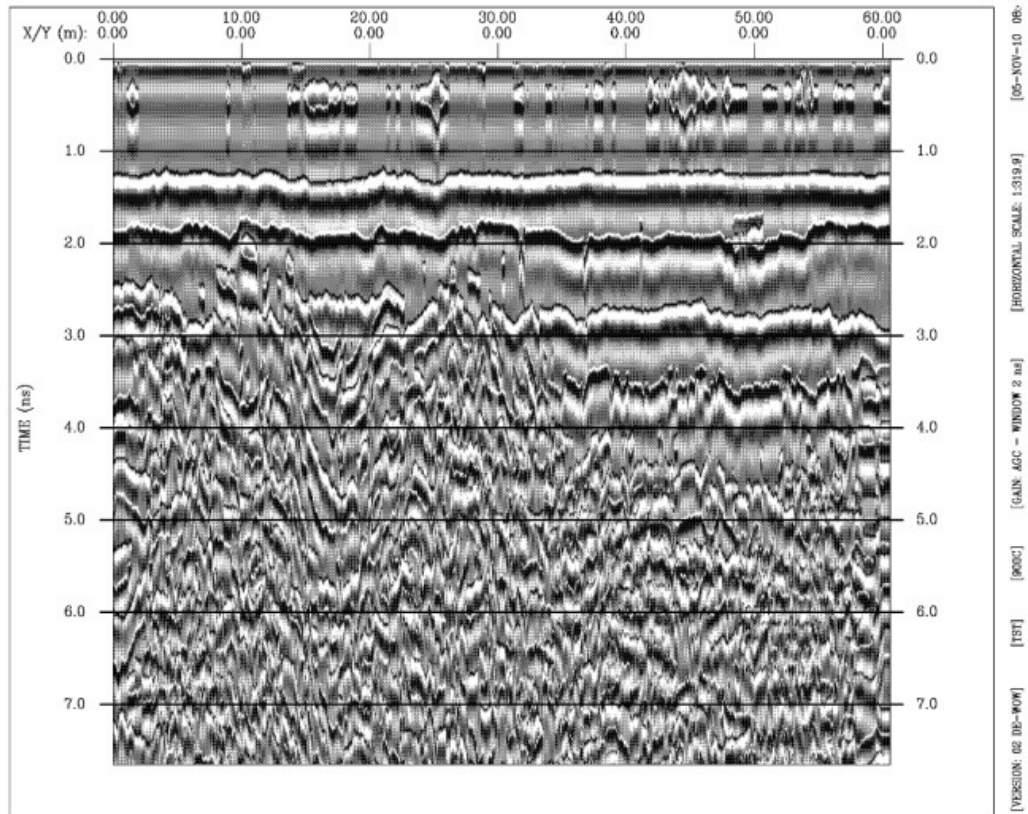


Figura 3: Radargramas do espodossolo em caminhamento contínuo (a) e em traços (b).

Por outro lado, quando se conhece a porosidade e a umidade do perfil do solo, o emprego das equações 1 e 2 permite que sejam estimadas as velocidades de cada horizonte de interesse, conforme apresentado na Tabela 5. Verifica-se que os horizontes mais profundos apresentaram maior umidade volumétrica e conseqüentemente, menor velocidade de propagação da onda, devido à forte atenuação do sinal GPR que a água apresenta. Este maior conteúdo de água é explicado pela maior quantidade de argila e matéria orgânica nesses horizontes.

Quando os valores obtidos pelas duas maneiras são comparados, pode-se notar a subestimação da velocidade pelo método CMP, particularmente nos pontos 1 e 2. As velocidades encontradas com as equações 1 e 2, pelo contrário, são compatíveis com os valores considerados por Davis e Annan (1989) como típicos para estes tipos de solos ($0,15 \text{ m ns}^{-1}$), e com os valores encontrados por Oliveira Jr. e Medeiros (2008) e Hagrey e Müller (2000) em solos arenosos de dunas costeiras (velocidades na ordem de $0,20$ e $0,15 \text{ m ns}^{-1}$, respectivamente). Os horizontes AE e E apresentaram as maiores velocidades devido ao baixo conteúdo de água, mostrando-se próximas às encontradas no ponto 3 pelo método CMP ($0,203 \text{ m ns}^{-1}$). O ponto 3 apresenta grande espessura desses horizontes, se comparados ao ponto 1 e 2.

Nos radargramas pode-se observar que no horizonte B espódico ocorre mudança no padrão do sinal GPR, que passa a apresentar uma feição mais reticulada. Os maiores conteúdos de argila, matéria orgânica e água (e provavelmente também de óxidos de ferro) do horizonte B espódico são fatores que justificam essa alteração de feição, tornando esse horizonte identificável através do GPR. Do ponto de vista eletromagnético, essa alteração se justifica pela magnitude do coeficiente de reflexão entre dois horizontes subseqüentes do solo. A Tabela 3 traz os coeficientes de reflexão para os horizontes do solo estudado, verificando-se que o maior contraste ocorre entre os horizontes E e Bh1 (coeficiente de reflexão de $0,24$).

Tabela 5: Umidade volumétrica, constante dielétrica, velocidade de propagação da onda no solo e coeficiente de reflexão.

Horizonte	θ_v (m ³ m ⁻³)	ϵ	v (m ns ⁻¹)	r
A	0,057	3,98	0,150	----
AE	0,022	3,09	0,171	0,06
E	0,011	2,88	0,177	0,02
Bh1	0,160	7,70	0,108	0,24
Bhs2	0,134	6,86	0,115	0,03

CONCLUSÕES

- Foi possível com o GPR, utilizando uma antena de 900 Mhz de frequência, e com os dados de campo, localizar o horizonte espódico no perfil;
- O maior coeficiente de reflexão (0,24) no perfil foi encontrado para a transição entre os horizontes E e B espódico;
- A partir da caracterização física do solo foi possível estimar as velocidades da onda eletromagnética para os diversos horizontes do perfil, sendo os resultados coerentes com os obtidos por outros autores;
- A técnica CMP usando antena 100 MHz subestimou a velocidade nos pontos 1 e 2 e forneceu valores coerentes no ponto 3.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- BURGOA, B.; MANSELL, R.S.; SAWKA, G.J.; NKEDI-KIZZA, P.; CAPECE, J. & CAMPBELL, K. Spatial variability of depth to Bh horizon in Florida Haplaquods using ground-penetrating radar. Soil and Crop Science Society of Florida Proceedings, 50:125-130. 1991.
- CASSIDY, N.J. Electrical and magnetic properties of rocks, soils and fluids. In: JOL, H.M., ed. Ground Penetrating Radar: Theory and Applications. Amsterdam, Elsevier, 2009. p. 41-72.
- CEZAR, E., NANNI, M.R.; CHICATI, M.L.; FABRIO, F.D.; HATA, F.T. & OLIVEIRA, R.B. DE. Uso de sistema GPR (ground penetrating radar) na

- avaliação de atributos de um solo sob plantio de cana-de-açúcar. R. Bras. Ci. Solo, 34:291-297, 2010.
- COLLINS, M.E.; SCHELLENTRAGER, G.W.; DOOLITTLE, J.A. & SHIH, S.F. Using ground penetrating radar to study changes in soil map unit composition in selected Histosols. Soil Sci. Soc. Am. J., 50:408-412. 1986.
- COLLINS, M.E. & DOOLITTLE, J.A. Using ground-penetrating radar to study soil microvariability. Soil Sci. Soc. Am. J., 51: 491-493. 1987.
- COLLINS, M.E.; DOOLITTLE, J.A. & ROURKE, R.V. Mapping depth to bedrock on a glaciated landscape with ground-penetrating radar. Soil Sci. Soc. Am. J., 53:1806-1812. 1989.
- DANIELS, D.J. Ground Penetrating Radar. 2.ed. London, The Institute of Electrical Engineers. 2004. 734p.
- DAVIS, J.L. & ANNAN, A.P. Ground penetrating radar for high-resolution mapping of soil and rock stratigraphy. Geophysical Prospecting. 37:531-551. 1989.
- DOOLITTLE, J.A. Characterizing soil map units with the ground penetrating radar. Soil Surv. Horiz., 22:3-10. 1982.
- DOOLITTLE, J.A. Investigating Histosols with ground-penetrating radar. Soil Surv. Horiz., 23:23-28. 1983.
- DOOLITTLE, J.A. Using ground-penetrating radar to increase the quality and efficiency of soil surveys. In: Soil Survey Techniques. Soil Sci. Soc. Am. Spec. Publ., 20:11-32. 1987.
- DOOLITTLE, J.A.; FLETCHER, P. & TURENNE, J. Estimating the thickness and volume of organic materials in cranberry bogs. Soil Surv. Horiz., 31:73-78. 1990.
- DOOLITTLE, J.A. & BUTNOR, J.R. Soils, Peatlands, and Biomonitoring. JOL, H.M., ed. Ground Penetrating Radar: Theory and Applications. Amsterdam, Elsevier, 2009. p.177-202.
- EMBRAPA. Centro Nacional de Pesquisa de Solos. Manual de métodos de análise de solo. 2.ed. Rio de Janeiro, Embrapa-CNPS, 1997. 212p.
- FARRISH, K.W.; DOOLITTLE, J.A. & GAMBLE, E.E. Loamy substrata and forest productivity of sandy glacial drift soils in Michigan. Can. J. Soil Sci., 70:181-187. 1990.

- GEE, G.W. & BAUDER, J.W. Particle-size analysis. In: KLUTE, A. ed. Methods of soil analysis. Part 1. Physical and Mineralogical Methods. 2.ed. Madison, American Society of Agronomy, 1986. p.383-411.
- HAGREY, S.A. & MÜLLER, C. GPR study of pore water content and salinity in sand. *Geophysical Prospecting*, 48:63–85. 2000.
- HENRIQUES, R.P.B., ARAÚJO, D.S.D. & HAY, J.D. Descrição e classificação dos tipos de vegetação da restinga de Carapebus, Rio de Janeiro. *Rev. Brasil. Bot.*, 9:173-189. 1986.
- INTERPEX. Gradix User's Manual. Golden, Interpex Limited. 1996.
- MCNEILL, J.D. Electrical conductivity of soils and rock. Technical Note TN-5. Mississauga, Geonics Limited, 1980. 22p.
- MONKA, D.L., SCHAETZL, R.J., DOOLITTLE, J.A. & JOHNSON, E.P. Ground-penetrating radar study of ortstein continuity in some Michigan Haplaquods. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 54:936-938. 1990.
- OLHOEFT, G.R. Electrical, magnetic, and geometric properties that determine ground penetrating radar performance. In: International Conference on Ground Penetrating Radar, 7. Lawrence, 1998. Proceedings. Lawrence, University of Kansas, p.177–182. 1998.
- OLIVEIRA, A.P. DE; KER, J.C.; SILVA, I.R. DA; FONTES, M.P.F., OLIVEIRA, A.P. DE & NEVES, A.T.G. Spodosols pedogenesis under Barreiras Formation and sandbank environments in the south of Bahia. *R. Bras. Ci. Solo*, 34:847-860, 2010.
- OLIVEIRA JR., J.G. & 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*, 26:437-449, 2008.
- PAIXÃO, M.S.G.; PRADO, R.L. & 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. *Rev. Bras. Geofísica*, 24:198-196, 2006.
- SAARENKETO, T. Electrical properties of water in clay and silty soils. *Journal of Applied Geophysics* 40:73-98. 1998.
- SANTOS, R.D.; LEMOS, R.C.; SANTOS, H.G.; KER, J.C. & ANJOS, L.H.C. Manual de descrição e coleta de solo no campo. 5.ed. Viçosa, SBCS, 2005. 92p.

- SHIH, S.F. & DOOLITTLE, J.A. Using radar to investigate organic soil thickness in the Florida Everglades. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 48: 651-656. 1984.
- SHIH, S.F.; MYHRE, D.L.; SCHELLENTRAGER, G.W.; CARLISLE, V.W. & DOOLITTLE, J.A. Using radar to assess the soil characteristics related to citrus stress. *Soil Crop Sci. Fla. Proc.*, 45:54-59. 1985.
- SHIH, S.F.; DOOLITTLE, J.A.; MYHRE, D.L. & SCHELLENTRAGER, G.W. Using radar for groundwater investigation. *J. Irrigat. Drain. Eng.*, 112:110-118. 1986.
- UCHA, J.M.; BOTELHO, M.; VILAS BOAS, G.S.; RIBEIRO, L.P., & SANTANA, P.S. Uso do radar penetrante no solo (GPR) na investigação dos solos dos Tabuleiros Costeiros no litoral norte do Estado da Bahia. *R. Bras. Ci. Solo*, 26:373-380, 2002.

3.2- USO DO GPR (GROUND PENETRATING RADAR) PARA AVALIAÇÃO DE ATRIBUTOS FÍSICOS E ELETROMAGNÉTICOS EM CAMBISSOLO CULTIVADO COM CANA-DE-AÇUCAR

RESUMO

Os atributos físicos e morfológicos, além de essenciais para a classificação dos solos, são de grande importância para o desenvolvimento vegetal. Seu desconhecimento é, em muitos casos, a causa de eventuais fracassos das atividades agrícolas. Dentre estas atividades, o cultivo da cana-de-açúcar tem se expandido devido ao incentivo à produção de bicompostíveis. Ferramentas para a implementação da agricultura de precisão podem ser úteis, pois permitem dinamizar a aquisição dos dados físicos e morfológicos do solo. Em uma área de cultivo de cana-de-açúcar foram demarcados 15 pontos para caracterização física e eletromagnética do solo, utilizando o radar de penetração no solo. Esta ferramenta geofísica permite pelo método CMP ("common midpoint"), obter a constante dielétrica (ϵ) do meio e, então, estimar a densidade e umidade volumétrica do solo. Além da técnica CMP, foi utilizada também a equação de CRIM, que estima a constante dielétrica a partir dos atributos físicos do solo. Para boa parte dos pontos estudados os valores de ϵ obtidos pelo método CMP foram inconsistentes e, em consequência, levaram a estimativas

equivocadas de densidade e umidade volumétrica do solo, em geral superestimando os valores desses atributos.

ABSTRACT

USING OF GPR (GROUND PENETRATING RADAR) FOR EVALUATION OF PHYSICAL AND ELECTROMAGNETIC ATTRIBUTES IN INCEPTISOL CULTIVATED WITH SUGAR CANE

The physical and morphological attributes beyond essential for the classification of soils, are of great importance for plant development. The no knowledge of its, is in many cases, the cause of any failures of agricultural activity. Among these activities, the cultivation of sugar cane has expanded due to the incentive to produce biofuels. Tools for implementation of precision agriculture can be useful, because allows streamline acquisition of physical and morphological data of soil. In a growing area of sugar cane was demarcated 15 points for physical and electromagnetic characterization of soil, using ground penetrating radar. This geophysics tools allows by the CMP method ("common midpoint"), obtain the dielectric constant (ϵ) of site and, then, estimate the density and volumetric soil water content. Besides the CMP technical was also used the equation of CRIM, which estimates the dielectric constant from the soil physical attributes. For most of the points studied values of ϵ obtained by CMP method was inconsistent and, consequently, led to erroneous estimates of density and volumetric soil water content, generally overestimating the values of these attributes.

INTRODUÇÃO

O solo tem grande influência no crescimento e desenvolvimento das culturas. Seus atributos, dentre eles os físicos e morfológicos, influenciam na

produção agrícola de maneira decisiva, levando ao sucesso ou insucesso de acordo com a importância que cada item desempenha durante o período da produção. Usando o crescimento de plantas como referência, Letey (1985) classifica os atributos físicos do solo em dois grupos: os que afetam diretamente o crescimento de plantas e os que afetam indiretamente. Segundo Letey (1985), no primeiro grupo estariam inclusas a disponibilidade de água, a aeração, a temperatura e a resistência mecânica, enquanto que os demais atributos físicos do solo estariam no segundo grupo. Destacando-se o papel central desempenhado pela umidade do solo, pois esta é determinante para os demais atributos diretos.

Um processo decorrente do uso agrícola dos solos é a compactação, que é a diminuição do volume do solo ocasionada por compressão. Isto causa um rearranjo das partículas do solo, do qual decorre o aumento da densidade, redução da porosidade total, aumento da resistência mecânica, aumento da água retida na faixa não disponível às plantas, redução da porosidade de aeração e alteração das propriedades térmicas, conseqüentemente interferindo de forma decisiva nos atributos diretamente relacionados ao crescimento das plantas.

A preocupação com o aquecimento global e suas conseqüências tem levado o Brasil a investir no desenvolvimento e cultivo de plantas destinadas à produção de bicompostíveis. Dentre essas a cana-de-açúcar é a mais cultivada e de maior importância econômica, colocando o país como o maior produtor mundial desta cultura. Em seu cultivo há o emprego de avançadas tecnologias, como variedades melhoradas de alta produtividade, mecanização específica para colheita e outras etapas de produção, aproveitamento de resíduos, dentre outras.

Vencidas diversas barreiras tecnológicas, a produtividade da cana-de-açúcar está relacionada ainda ao ambiente, particularmente aos fatores como luz, água, CO₂, O₂, nutrientes minerais e às características físicas do solo. Um dos aspectos limitantes da produtividade é a ocorrência de atributos do solo restritivos às plantas e de difícil correção, particularmente devido à variabilidade espacial destes atributos na área de plantio. A superação deste problema passa pelo emprego da agricultura de precisão, que permite a adequação pontual de práticas de manejo em função desta variabilidade.

Alguns métodos geofísicos para determinar propriedades físicas dos solos, têm sido usados na agricultura de precisão, e têm se mostrado

promissores. O método do GPR (Ground Penetrating Radar) é uma ferramenta geofísica que tem se mostrado bem eficaz para estimar o conteúdo de água no solo (Huisman et al., 2003) e a densidade do solo (Frata et al., 2005). O objetivo do trabalho foi relacionar a densidade, umidade e as propriedades eletromagnéticas de um cambissolo usando o GPR.

MATERIAL E MÉTODOS

O estudo foi realizado em área de cultivo de cana-de-açúcar da Fazenda Partido, localizada no distrito de Donana, no Município de Campos dos Goytacazes RJ. A região de estudo apresenta clima do tipo Aw (segundo classificação de Köppen), com precipitação média anual de 1080 mm e temperatura média anual entre 24-25°C. A área demarcada para o estudo apresentava dimensões de 200 x 200 m totalizando 4000 m². A variedade de cana usada foi a SP81-325, estando na ressoca, com espaçamento de plantio de 1,50 m entre linhas. Alguns dias após o corte da cana-de-açúcar foram demarcadas, ao longo das entrelinhas de plantio, cinco seções de investigação geofísica, com comprimento de 160 m e espaçadas de 40 m entre si. Em cada seção foram demarcados cinco pontos de coletas de solo, também afastados 40 m entre si, totalizando 25 pontos em toda a área.

A caracterização morfológica do solo foi feita em um perfil exposto em canal de drenagem ao lado da área de estudo, de acordo com o *Manual de Descrição e Coleta de Solo no Campo* (Santos et. al 2005), sendo coletadas amostras com estrutura deformada e indeformada.

A caracterização química foi realizada com amostras deformadas, no Centro de Análises da UFRRJ-Campus Dr. Leonel Miranda, em Campos dos Goytacazes-RJ, seguindo metodologias preconizadas em Embrapa (1997).

As análises granulométricas e de densidade de partículas foram realizadas no Laboratório de Solos da UENF, também a partir das amostras deformadas. Para a granulometria foi utilizada a dispersão da amostra em solução de hidróxido de sódio sob agitação lenta, sendo a areia determinada por peneiramento, a argila pelo método da pipeta e o silte por diferença (Gee & Bauder, 1986). Para a densidade de partículas (ρ_s) foi utilizado o método do balão volumétrico com álcool, de acordo com Embrapa (1997).

A densidade do solo (ρ) foi determinada pelo método do anel volumétrico, também em cada horizonte do perfil. A porosidade total (α) foi calculada por meio da equação $\alpha = 1 - \rho/\rho_s$ (Embrapa, 1997).

Em cada um dos 25 pontos demarcados na área experimental foi realizada a coleta de amostras deformadas de solo, em camadas de 0,20 m de espessura, da superfície até a profundidade de 1,00 m, as quais foram utilizadas para a caracterização granulométrica, da densidade de partículas (ρ_s) e da umidade gravimétrica do solo (U). Amostras indeformadas foram coletadas apenas na camada arável, obtendo-se a densidade e a porosidade total do solo para cada ponto nas camadas 0-0,10 m e 0,10-0,20 m. Para a camada 0,20-0,40 m a densidade foi estimada a partir de uma função de pedotransferência desenvolvida na própria área de estudo⁽¹⁾, tendo como variáveis independentes os teores de areia e argila e a densidade do solo na camada 0-0,20 m. Para maiores profundidades assumiu-se que os valores obtidos no perfil são representativos para toda a área de estudo.

A umidade gravimétrica foi determinada pelo método padrão (secagem em estufa a 105°C). A umidade volumétrica (θ) foi calculada pela equação $\theta = U \rho/\rho_a$, sendo ρ_a o peso específico da água e ρ o valor da densidade do solo correspondente a cada profundidade.

Na investigação geofísica foi utilizado o GPR da Geophysical Survey Systems, Inc. modelo TerraSIRch System-3000 com uma antena de 100 Mhz. O aparelho possuía a seguinte configuração: bites por amostra: 16; taxa de transmissão: 50 kHz; intervalo: 300 ns; número de ganho por ponto: 5; filtro passa baixa vertical: 300 MHz; filtro passa alta vertical: 25 MHz; amostra por scan: 512. Foi utilizada a técnica “common midpoint” (CMP), que permite obter a velocidade da onda eletromagnética no solo (v). Nesta técnica foram utilizados espaçamentos entre antenas partindo de zero e chegando ao máximo de 8 m de afastamento, com incrementos de 0,20 m. Os perfis CMP foram feitos em 15 dos 25 pontos de estudo da área de investigação como pode ser visto na figura 1.

O programa Gradix (Interpex, 1996) foi utilizado para o processamento de dados, que consistiu de: edição de dados (eliminação de traços repetidos, correção de cabeçalhos “*headers*”, re-posicionamento ou reversão de perfis, etc.);

⁽¹⁾ $\rho_{(20-40)} = -6,14 \cdot 10^{-3} \text{ areia} + 2,05 \cdot 10^{-3} \text{ argila} + 2,56 \cdot 10^{-4} \text{ areia} \times \text{argila} + 0,375 \rho_{(0-20)} + 0,63$

Dewow (eliminação de ruídos de baixa frequência); limitação das janelas de tempo; e aplicação de filtros.

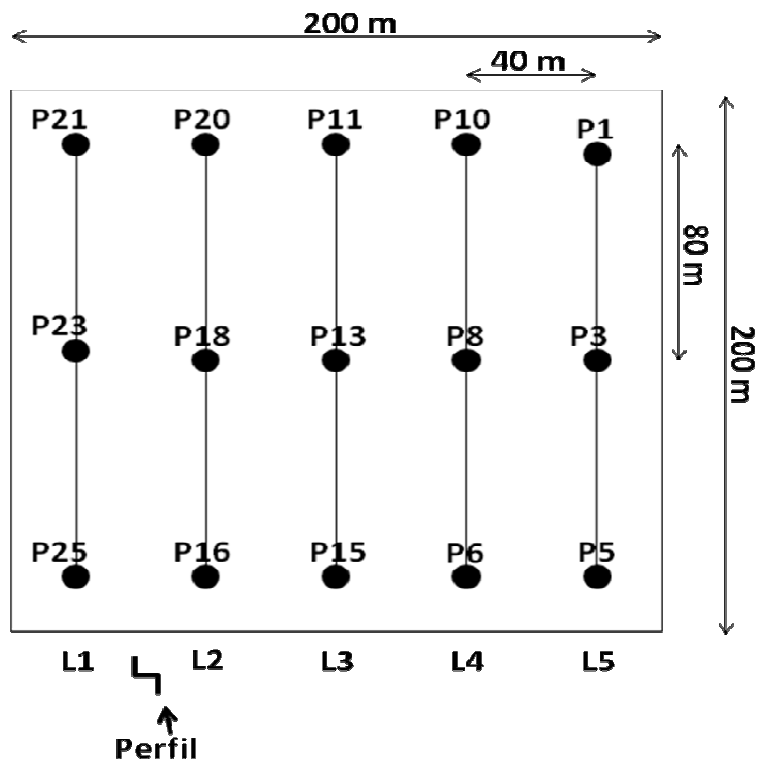


Figura 1: Figura da área de estudo, mostrando as linhas ou seções investigadas com GPR, os pontos de realização da técnica CMP, e a localização do perfil usado para a descrição morfológica e coleta de solo.

Para cada ponto em que foi realizada a técnica CMP, as velocidades eletromagnéticas medidas foram utilizadas para estimar a constante dielétrica do solo (ϵ) por meio da equação:

$$\epsilon = (c/v)^2 \quad (1)$$

onde c é a velocidade da onda eletromagnética no vácuo, assumida como $0,30 \text{ m ns}^{-1}$.

A constante dielétrica do solo foi estimada também por meio da equação de CRIM (Wharton et. al, 1980), que de forma semi-empírica, relaciona ϵ com as variáveis que expressam as proporções volumétricas de água (θ), de ar

(porosidade de aeração: ϵ_{ar} sendo $\alpha_{ar} = \alpha - \theta$) e de partículas $(1 - \alpha)$ no solo. Essa equação pode ser expressa por:

$$\epsilon = [(1 - \alpha)\epsilon_s^{1/2} + (\alpha - \theta)\epsilon_a^{1/2} + \theta \epsilon_w^{1/2}]^2 \quad (2)$$

onde ϵ_s , ϵ_a e ϵ_w são as constantes dielétricas das partículas do solo, do ar e da água, respectivamente (Roth et al., 1990). Baseado em Daniels (1996), Davis e Annan (1989) e Schon (1996), considerou-se $\epsilon_w = 81$, $\epsilon_a = 1$ e $\epsilon_s = 8$.

Tendo-se a densidade de partículas e a umidade gravimétrica do solo em cada ponto de interesse, a densidade do solo (ρ) pôde ser estimada a partir dos valores de constante dielétricas obtidas por meio da técnica CMP. Para isso as relações volumétricas α e θ , da equação 2, foram substituídas em expressões correspondentes em que constam as variáveis ρ , ρ_s e U , resultando na equação:

$$\epsilon = \{[1 - (1 - \rho/\rho_s)]\epsilon_s^{1/2} + (1 - \rho/\rho_s - U\rho)\epsilon_a^{1/2} + U\rho\epsilon_w^{1/2}\}^2 \quad (3)$$

Dessa equação, assumindo-se $\epsilon_a = 1$ e $\epsilon_w = 81$, e isolando-se a densidade do solo (ρ), obtém-se uma equação estimativa dessa variável:

$$\rho = \rho_s(\epsilon^{1/2} - 1) / (\epsilon_s^{1/2} + 8U\rho_s - 1) \quad (4)$$

Se, na equação 2, apenas α for substituída por sua expressão correspondente ($\alpha = 1 - \rho/\rho_s$), assumindo-se $\epsilon_a = 1$ e $\epsilon_w = 81$, e isolando-se a umidade do solo (θ), obtém-se uma equação para a estimativa também dessa variável:

$$\theta = [\epsilon^{1/2} + \rho/\rho_s - (\rho/\rho_s)\epsilon_s^{1/2} - 1] / 8 \quad (5)$$

Os resultados foram analisados por meio de ferramentas da estatística descritiva, incluindo o coeficiente de correlação, gráficos de dispersão, entre outros.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

A tabela 1 traz a descrição morfológica completa do perfil, com a identificação e a profundidade dos horizontes do solo estudado.

Tabela 1.: Classificação e descrição morfológica do perfil do Cambissolo estudado na fazenda Partido.

Classificação: Cambissolo Háplico Tb Eutrófico típico

Localização: Trincheira ao lado da área de estudo.

Ap	0-15 cm; cinzento-escuro (7,5YR 4/1, úmido), cinzento-claro (7,5YR 7/1, seco); franco argilosa; blocos subangulares grande forte; muito dura, friável a firme, muito plástica e pegajosa; superfície lustrosa abundante e moderada; transição gradual.
AB	15-35 cm; bruno (7,5YR 4/2 úmido), cinzento-rosado (7,5YR 6/2, seco); argilosa; prismática grande moderada / maciça; muito dura a extremamente dura, muito firme, muito plástica e pegajosa; superfície lustrosa abundante e moderada; transição clara.
B1	35-70 cm; bruno-amarelado (10YR 5/6, úmido), “coating” cinzento-escuro (7,5YR 4/1, úmido), amarelo (10YR 7/6, seco); franco argilo siltosa; prismática grande forte e blocos subangulares grande forte; dura, friável, muito plástica e muito pegajosa; superfície lustrosa comum a abundante e moderada; transição gradual.
B2	70-95 cm; bruno (7,5YR 4/3, úmido), “coating” amarelo-avermelhado (7,5YR 6/6, úmido); franco argilo siltosa; prismática média a grande forte e blocos subangulares médio forte; firme, muito plástica e muito pegajosa; superfície lustrosa comum a abundante e moderada; transição gradual.
B3	95-130 cm; bruno (7,5YR 5/4, úmido), “coating” amarelo-avermelhado (7,5YR 6/6, úmido); argilosa; prismática média fraca e blocos subangulares médio forte; friável, muito plástica e muito pegajosa; superfície lustrosa comum e moderada; transição gradual.
C	C 130-150 ⁺ cm; cinzento (7,5YR 5/1, úmido), “coating” bruno-forte (7,5YR 5/8, úmido); franco argilosa; blocos subangulares médio fraco / maciço; friável, plástica e pegajosa; superfície lustrosa comum a moderada.

Raízes: comuns em Ap; poucas em AB encontrando-se nas fendas; Comum em B1, encontrando-se nas fendas; poucas em B2; raras em B3 e ausentes em B4.

Observação: Presença de canais preenchidos com materiais de coloração escura ao longo de todo o perfil.

Descrito por: Vitor Luiz Medeiros Barros Júnior e Cláudio Roberto Marciano

Data: 16/04/2010

Tabela 2. Atributos químicos dos horizontes que compõem o perfil do solo.

Hori- zonte	pH água	C (g kg ⁻¹)	P (mg kg ⁻¹)	CEes (dS m ⁻¹)	Al ⁺³	H ⁺ +Al ⁺³	Ca ⁺²	Mg ⁺²	K ⁺	Na ⁺	SB	T	t	m	V
					----- (cmol _c dm ⁻³) -----										---- (%) ----
Ap	7,20	14,1	84,00	0,017	0,00	0,90	6,70	7,20	0,55	0,30	14,75	15,65	14,75	0,0	94,2
AB	6,90	16,2	30,00	0,019	0,20	1,30	6,50	6,70	0,25	0,44	13,89	15,19	14,09	1,4	91,4
B1	6,30	5,5	1,00	0,011	0,30	3,50	2,00	3,30	0,03	0,02	5,35	8,85	5,65	5,3	60,5
B2	6,20	3,0	2,00	0,008	0,10	3,30	0,90	3,30	0,06	0,03	4,29	7,59	4,39	2,3	56,5
B3	6,60	3,3	4,00	0,007	0,10	1,50	1,20	3,30	0,06	0,05	4,61	6,11	4,71	2,1	75,4
C	6,70	3,0	12,00	0,006	0,10	2,00	1,20	0,80	0,03	0,68	2,71	4,71	2,81	3,6	57,5

Obs.: pH em água: potenciometria em solução solo-água 1:2,5; carbono orgânico: dicromato de potássio + colorimetria; fósforo disponível: extraído por Mehlich-1 + espectroscopia; CEes: condutividade elétrica no extrato de saturação; alumínio: extraído com solução de KCl 1 mol L⁻¹ e determinado por titulação com NaOH 0,025 mol L⁻¹, usando-se azul de bromotimol como indicador; cálcio e magnésio: extraídos com solução de KCl 1 mol L⁻¹ e determinados por espectrofotometria de absorção atômica; potássio e sódio trocáveis: extraídos pelo extrator Mehlich-1 e determinados por fotometria de chama; SB = Ca⁺² + Mg⁺² + K⁺ + Na⁺; T = SB + (H⁺+Al⁺³); m% = Al⁺³ x 100 / t; V% = SB x 100 / T (Embrapa, 1997).

A tabela 2 mostra as características químicas dos horizontes do perfil do solo. Observa-se que é um solo com alta saturação por bases nos horizontes Ap e AB e com altos teores de fósforo na camada arável indicando que recebeu adubação. Em profundidade também se tem o caráter eutrófico presente, sendo esta uma característica natural do solo. O horizonte C apresenta uma maior quantidade de sódio trocável, provavelmente devido ao lençol freático da região ter sofrido influência marinha.

Na tabela 3 são apresentados os atributos físicos para cada horizonte do perfil do solo. Pode ser observado que os teores de areia decrescem em profundidade, apresentando valores de 352 g kg⁻¹ e 103 g kg⁻¹ no horizonte Ap e B3, respectivamente. Os valores de argila e silte são de mesma magnitude, com diferença entre essas frações sempre menor que 100 g kg⁻¹, nos horizontes estudados. Os valores mais altos de densidade do solo ocorrem nos horizontes mais superficiais (A, AB e B1). Como consequência esses horizontes apresentam as menores porosidades e condutividades hidráulicas. No horizonte C há uma mudança no comportamento no teor de areia, que era decrescente até o horizonte B3 e volta a aumentar.

Tabela 3. Granulometria, densidade de partículas (ρ_s), densidade (ρ), porosidade total (α) e condutividade hidráulica (K) do perfil de solo.

Horizontes	areia	silte	argila	ρ_s	ρ	α	K
	-----(g kg^{-1})-----			-----(Mg m^{-3})----		($\text{m}^3 \text{m}^{-3}$)	(mm h^{-1})
Ap	352	307	341	2,58	1,35	0,48	28,72
AB	213	380	407	2,60	1,41	0,46	0,47
B1	185	437	378	2,70	1,48	0,45	0,32
B2	161	466	373	2,74	1,25	0,55	28,22
B3	103	400	497	2,79	1,22	0,56	649,67
C	320	360	320	2,81	1,19	0,58	115,32

Os resultados da análise granulométrica em cada ponto estudado, até a profundidade de 1 m, são mostrados na tabela 4. Observa-se que o solo da área de estudo é composto de elevados teores de silte e argila, com menores teores de areia. Observa-se, na média dos pontos, que há uma tendência de aumento em profundidade no teor de areia, passando de cerca de 100 g kg^{-1} na camada 0-0,20 m para 200 g kg^{-1} na camada 0,80-1,00 m. Para a argila o comportamento médio é inverso, observando-se teores de cerca de 500 g kg^{-1} na camada 0-0,20 m e de 400 g kg^{-1} na camada 0,80-1,00 m. Em consequência, o silte se mantém, em média, na faixa de 400 g kg^{-1} para todas as camadas. Estes valores são contrastantes com o que se verifica no perfil (Tabela 3) e são reflexos da variabilidade espacial da área. Se comparados os dados do perfil aos dos pontos mais próximos (pontos 16 e 25), verifica-se que a discrepância é menos acentuada.

A densidade de partículas (ρ_s) e a umidade gravimétrica (U) até a profundidade de 1 m são mostradas na tabela 5, também em cada ponto estudado. A partir dos valores de densidade do solo representativos de cada ponto e profundidade, os valores de U foram convertidos em umidade volumétrica (θ), assim como foram estimados os valores de porosidade total (α). Esses atributos físicos foram usados para a estimativa da constante dielétrica do solo (equação 2) e, em seguida, da velocidade da onda eletromagnética no solo (equação 1), cujos resultados se encontram na tabela 6. Observa-se que, para cada camada, quando as constantes dielétricas são altas, as velocidades eletromagnéticas são baixas, e vice-versa. Os resultados se mostram compatíveis

com Cezar et al (2010) que, estudando um Latossolo cultivado com cana-de-açúcar, encontraram valores médios de constante dielétrica e velocidade eletromagnética de, respectivamente, 20,059 e 0,067 m ns⁻¹ nas entrelinhas e de 23,024 e 0,0625 m ns⁻¹ nas linhas de plantio.

Com relação à variação em profundidade da constante dielétrica, o maior valor médio para a área estudada (da ordem de 30) é observado na camada 0,40-0,60 m (maior densidade e umidade), enquanto os menores (da ordem de 20) ocorrem nas camadas 0-0,20 m e 0,80-1,00 m (menores densidades e umidades). Em relação à variabilidade espacial, pode verificar que os valores de k (condutividade hidráulica) acompanham não só os valores de densidade e umidade, mas também a composição granulométrica do solo, em particular os teores de areia.

Na tabela 7 são apresentadas as médias de cada fração granulométrica nos pontos estudados, que, conforme já argumentado na tabela 4, apresentam valores discrepantes em relação aos encontrados no perfil. Enquanto no perfil o teor de areia até a profundidade de 1 m (média ponderada) é de 206 g kg⁻¹, a média geral para a área é de 133 g kg⁻¹ (nos pontos 1, 3, 5, 6, 8, 11 e 13 os valores são menores que 100 g kg⁻¹). Este menor teor de areia na área em relação ao perfil ocorre à proporção que aumentam os teores de argila, que são da ordem de 455 g kg⁻¹ na área e de apenas 383 g kg⁻¹ no perfil. O teor médio de silte é semelhante no perfil (411 g kg⁻¹) e na área (412 g kg⁻¹). Na tabela 7 também são apresentados os valores médios de umidade gravimétrica e densidade de partículas usados na equação 4 para a estimativa da densidade do solo.

Tabela 4. Análise granulométrica por camada dos pontos investigados na área de estudo.

(m)	areia silte argila			areia silte argila			areia silte argila			areia silte argila			areia silte argila				
	g kg ⁻¹																
Prof.	Ponto 21			Ponto 20			Ponto 11			Ponto 10			Ponto 1				
0-0,20	122	347	531	114	390	497	37	396	567	57	379	564	39	403	558		
0,20-0,40	128	375	497	131	398	471	33	418	549	70	381	549	32	436	532		
0,40-0,60	273	345	382	162	419	419	68	454	478	222	402	376	52	458	491		
0,60-0,80	383	309	308	332	358	310	161	448	391	283	457	259	63	454	483		
0,80-1,00	391	297	312	512	254	234	139	438	423	472	300	228	135	427	437		
	Ponto 23			Ponto 18			Ponto 13			Ponto 8			Ponto 3				
0-0,20	59	346	596	53	392	555	54	384	562	63	451	487	65	414	521		
0,20-0,40	58	337	605	49	400	551	45	406	550	35	460	505	34	402	564		
0,40-0,60	144	336	520	86	445	469	84	417	499	40	492	468	35	441	525		
0,60-0,80	85	339	576	200	413	387	100	424	476	80	480	440	44	445	511		
0,80-1,00	512	170	318	158	435	407	87	423	490	111	482	407	121	336	543		
	Ponto 25			Ponto 16			Ponto 15			Ponto 6			Ponto 5				
0-0,20	188	334	478	199	402	399	236	379	386	123	464	413	71	445	483		
0,20-0,40	186	346	468	173	409	418	190	409	401	88	467	445	35	459	506		
0,40-0,60	162	361	476	190	404	406	131	441	428	88	474	439	66	455	480		
0,60-0,80	323	282	395	190	421	389	96	438	466	72	519	409	41	486	474		
0,80-1,00	619	136	245	365	331	304	111	467	422	78	458	464	71	503	426		

Tabela 5. Umidade gravimétrica (kg.kg^{-1}) e densidade de partículas (g. cm^{-3}) por camada, dos pontos estudados.

Prof.	U	ρ_s	U	ρ_s	U	ρ_s	U	ρ_s	U	ρ_s
m	PONTO 21		PONTO 20		PONTO 11		PONTO 10		PONTO 1	
0,0-0,20	0,253	2,64	0,218	2,49	0,274	2,68	0,268	2,71	0,251	2,74
0,20-0,40	0,299	2,71	0,259	2,57	0,342	2,70	0,318	2,67	0,314	2,73
0,40-0,60	0,273	2,73	0,254	2,60	0,360	2,67	0,279	2,66	0,309	2,71
0,60-0,80	0,262	2,76	0,201	2,58	0,331	2,63	0,264	2,55	0,323	2,72
0,80-1,00	0,271	2,65	0,165	2,58	0,356	2,49	0,221	2,58	0,321	2,71
	PONTO 23		PONTO 18		PONTO 13		PONTO 8		PONTO 3	
0,0-0,20	0,268	2,54	0,224	2,53	0,237	2,65	0,235	2,38	0,247	2,85
0,20-0,40	0,311	2,58	0,291	2,49	0,276	2,58	0,291	2,54	0,297	2,54
0,40-0,60	0,287	2,60	0,279	2,54	0,298	2,60	0,295	2,64	0,280	2,56
0,60-0,80	0,298	2,64	0,242	2,58	0,299	2,64	0,309	2,51	0,240	2,66
0,80-1,00	0,178	2,64	0,199	2,68	0,305	2,64	0,307	2,57	0,304	2,66
	PONTO 25		PONTO 16		PONTO 15		PONTO 6		PONTO 5	
0,0-0,20	0,180	2,58	0,190	2,65	0,179	2,55	0,218	2,49	0,238	2,55
0,20-0,40	0,220	2,61	0,249	2,61	0,240	2,73	0,289	2,60	0,325	2,41
0,40-0,60	0,230	2,66	0,262	2,65	0,280	2,77	0,297	2,56	0,366	2,43
0,60-0,80	0,196	2,60	0,263	2,62	0,298	2,73	0,308	2,66	0,444	2,57
0,80-1,00	0,121	2,61	0,223	2,68	0,281	2,65	0,346	2,64	0,377	2,61

Tabela 6. Constante dielétrica (ϵ) e velocidade da onda eletromagnética no solo, estimados com o uso da equação 2.

Prof.	ϵ	v (m/ns)	ϵ	v (m/ns)	ϵ	v (m/ns)	ϵ	v (m/ns)	ϵ	v (m/ns)
m	PONTO 21		PONTO 20		PONTO 11		PONTO 10		PONTO 1	
0,0-0,20	21,88	0,064	18,90	0,069	23,92	0,061	23,19	0,062	21,37	0,065
0,20-0,40	23,70	0,062	20,60	0,066	25,30	0,060	25,10	0,060	23,80	0,061
0,40-0,60	27,10	0,058	25,34	0,060	39,17	0,048	28,23	0,056	31,83	0,053
0,60-0,80	19,71	0,068	15,10	0,077	26,73	0,058	20,50	0,066	25,65	0,059
0,80-1,00	20,12	0,067	12,11	0,086	28,88	0,056	16,20	0,075	24,60	0,060
	PONTO 23		PONTO 18		PONTO 13		PONTO 8		PONTO 3	
0,0-0,20	23,77	0,062	19,38	0,068	20,20	0,067	21,02	0,065	20,61	0,066
0,20-0,40	24,80	0,060	22,10	0,064	19,90	0,067	21,8	0,064	23,00	0,063
0,40-0,60	29,41	0,055	28,65	0,056	30,89	0,054	30,33	0,054	28,68	0,056
0,60-0,80	23,44	0,062	18,53	0,070	23,47	0,062	24,96	0,060	18,06	0,071
0,80-1,00	12,85	0,084	14,24	0,080	23,29	0,062	23,68	0,062	23,12	0,062
	PONTO 25		PONTO 16		PONTO 15		PONTO 6		PONTO 5	
0,0-0,20	15,24	0,077	15,90	0,075	15,25	0,077	18,87	0,069	20,62	0,066
0,20-0,40	18,00	0,071	19,10	0,069	18,00	0,071	21,3	0,065	24,00	0,061
0,40-0,60	22,38	0,063	26,12	0,059	27,82	0,057	30,87	0,054	41,31	0,047
0,60-0,80	14,66	0,078	20,26	0,067	23,14	0,062	24,31	0,061	39,97	0,047
0,80-1,00	9,24	0,099	16,03	0,075	21,03	0,065	27,31	0,057	30,68	0,054

Tabela 7. Valores médios de granulometria, umidade gravimétrica, densidade de partículas e porosidade total dos pontos estudados.

	areia	silte	argila	U	ρ_s
PONTOS	-----g kg ⁻¹ -----				
1	64	436	500	0,304	2,72
3	60	408	533	0,273	2,65
5	57	469	474	0,350	2,52
6	90	476	434	0,291	2,59
8	66	473	461	0,287	2,53
10	221	384	395	0,270	2,63
11	88	431	482	0,333	2,64
13	74	411	515	0,283	2,62
15	153	427	420	0,255	2,68
16	224	393	383	0,237	2,64
18	109	417	474	0,247	2,56
20	250	364	386	0,219	2,56
21	259	335	406	0,272	2,70
23	172	306	523	0,268	2,60
25	296	292	412	0,189	2,61

Os valores de velocidade da onda eletromagnética obtidos por meio da técnica CMP e os de constante dielétrica correspondentes (obtidos pela equação 1) são mostrados na tabela 8. Comparando-se os resultados obtidos pelo uso da equação Crim verifica-se, em alguns pontos, valores muito altos de ϵ (pontos 1, 3, 11,13 e 20), sendo o valor de constante dielétrica no ponto 13 maior que da água (81). O coeficiente de correlação entre ϵ obtido pelas duas técnicas é baixo ($R = 0,28$), e não sofre expressiva melhoria ($R = 0,42$) se forem excluídos os valores dos pontos acima mencionados.

A utilização na equação 4 dos valores de ϵ obtidos pelo CMP permite estimar a densidade do solo para todos os pontos estudados, sendo estes também apresentados na tabela 8. Embora seja possível realizar essa estimativa, observa-se que, para os pontos em que as constantes dielétricas são superestimadas, os valores de densidade obtidos também são muito altos. A exclusão de dados inconsistentes de densidade faz com que o coeficiente de correlação entre os valores medidos e estimados passe de negativo ($R = -0,13$) para positivo ($R = 0,48$), embora ainda baixo. Ao se eliminar os pontos de estudos mencionados acima como inconsistentes, a constante dielétrica e a densidade do

solo estimadas pela equação 2 e 4, apresentam R^2 de 0,18 e 0,23 respectivamente, como pode ser visto na figura 1.

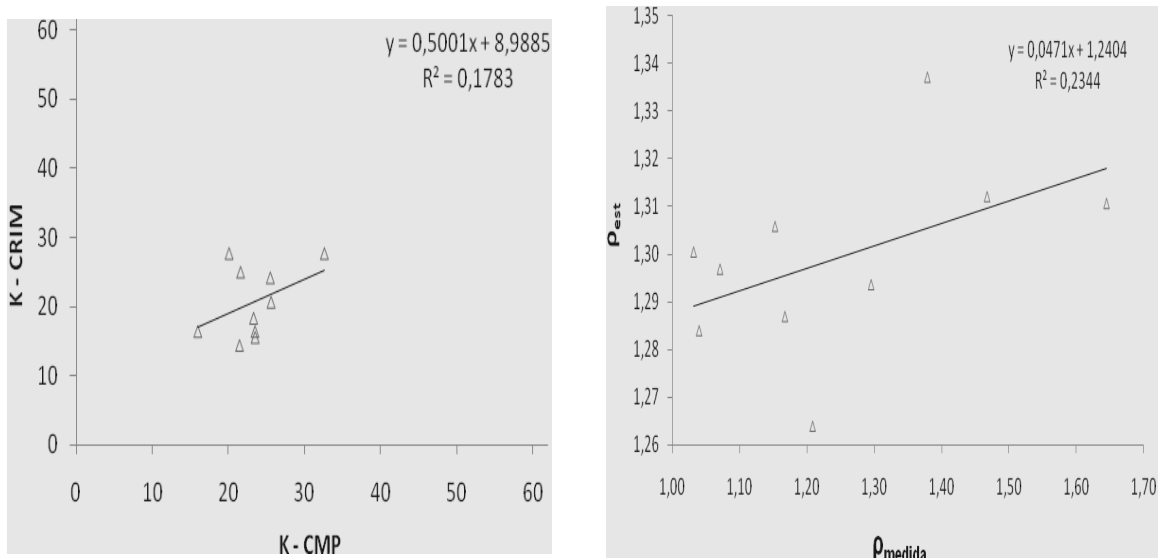


Figura 1: Gráficos mostrando a dispersão dos dados entre a constante dielétrica medida pela técnica CMP e pela equação Crim e a dispersão da densidade do solo estimada pela técnica CMP comparada à densidade do solo.

Fazendo-se uso da equação 5, a umidade volumétrica também pode ser estimada a partir dos valores de ϵ obtidos pelo CMP, estando esses valores também apresentados na tabela 8. Os mesmos pontos destacados acima resultam em superestimativa dos valores de umidade. A exclusão desses valores inconsistentes de umidade, no entanto, não melhora muito o coeficiente de correlação entre a umidade medida e estimada, que passa de 0,36 para 0,45.

Estes resultados mostram que pequenas variações na velocidade eletromagnética obtida pela técnica CMP resultam em valores inconsistentes de constante dielétrica e, conseqüentemente, dos atributos físicos do solo, tanto a densidade quanto a umidade volumétrica do solo. Dificuldades para a obtenção da velocidade eletromagnética pela técnica CMP incluem a ausência em profundidade de uma camada de grande reflexão, a qual poderia ser identificada com maior precisão durante o processamento.

Tabela 8. Valores médios de constante dielétrica e velocidade da onda eletromagnética no solo obtidos pela equação de Crim (estimados) e pela técnica CMP (medidos) nos pontos estudados.

Pontos	ρ_{medida}	θ medido	Método CMP			Método Eq. Crim		
			V (m/ns)	ϵ	ρ est. CMP	θ est. CMP	V (m/ns)	ϵ
1	1,35	0,407	0,040	56,25	2,10	0,700	0,058	26,58
3	1,34	0,360	0,045	44,44	1,97	0,595	0,062	23,65
5	1,32	0,454	0,057	27,70	1,21	0,416	0,053	32,64
6	1,33	0,381	0,066	20,66	1,17	0,328	0,059	25,62
8	1,34	0,377	0,061	24,19	1,30	0,371	0,059	25,51
10	1,34	0,356	0,076	15,58	1,03	0,255	0,062	23,51
11	1,32	0,433	0,043	48,67	1,78	0,635	0,055	30,26
13	1,32	0,367	0,030	100,00	3,04	1,013	0,060	24,68
15	1,35	0,337	0,060	25,00	1,47	0,388	0,065	21,59
16	1,35	0,314	0,057	27,70	1,65	0,419	0,067	20,08
18	1,33	0,324	0,079	14,42	1,04	0,234	0,065	21,45
20	1,35	0,293	0,054	30,86	1,85	0,452	0,069	18,79
21	1,34	0,357	0,070	18,37	1,15	0,300	0,062	23,31
23	1,33	0,353	0,074	16,44	1,07	0,267	0,062	23,49
25	1,36	0,255	0,074	16,44	1,38	0,265	0,075	15,95

CONCLUSÕES

- A caracterização dos atributos físicos do solo permitiu estimar a constante dielétrica e a velocidade da onda eletromagnética do solo a partir da equação de CRIM;
- Boa parte dos valores de velocidade da onda eletromagnética e constante dielétrica obtidos com uso da técnica CMP foram inconsistentes, levando a estimativas equivocadas de densidade e umidade volumétrica do solo pelo uso da equação de CRIM invertida;
- Quando o interesse é estimar as propriedades eletromagnéticas do solo, o bom desempenho da equação de CRIM depende de uma boa caracterização física do solo;
- Quando o interesse é estimar atributos físicos do solo, o bom desempenho da equação de CRIM depende tanto de uma boa caracterização eletromagnética do solo quanto de um adequado processamento dos dados.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Daniels, D. J. (2004). Ground Penetrating Radar. Ground Penetrating Radar, 2nd Edition. The Institute of Electrical Engineers, London, United Kingdom.
- Davis, J. L. and Annan, A. P. (1989). Ground penetrating radar for high-resolution mapping of soil and rock stratigraphy. *Geophysical Prospecting*. 37(5): 531-551.
- EMBRAPA. (1997) Centro Nacional de Pesquisa de Solos. Manual de métodos de análise de solo. 2. ed. Rio de Janeiro: Embrapa-CNPS,. 212p.
- Gee, G.W. & Bauder, J.W. Particle-size analysis. In: Klute, A (1986).. ed. *Methods of soil analysis*. 2 ed. Madison, *American Society of Agronomy*, Part. 1. p. 383-411.
- Huisman J.A., Hubbard S.S., Redman J.D. and Annan A.P.(2003). Measuring Soil Water Content whit Ground Penetrating Radar: a Review. *Vadose Zone journal* 2:476-49.
- Interpex. (1996). Gradix User's Manual. Interpex Limited. USA.
- Lemos, R.C.; dos Santos, R.D. (1996) Manual de Descrição e Coleta de Solo no Campo. 3.ed. Campinas, Sociedade Brasileira de Ciências do Solo.
- Letey, J. (1985) Relationship between soil physical properties and crop production. *Advances in Soil Science*, 1:277-294.
- Roth, K., Schulin, R., Fluhler, H., Attinger, W., (1990). Calibration of time domain reflectometry for water content measurement using a composite dielectric approach. *Water Resource Research* 26, 2267–2273.
- Schon, J. H. (1996) Physical properties of rocks: Fundamentals and principles of petrophysics: tarrytown, New York. Elsevier Science Inc, p. 465–478.
- Wharton, R.P., G.A. Hazen, R.N. Rau and D.L. Best. 1980. Electromagnetic propagation logging: advances in technique and interpretation. In 55th Annual Fall Technical Conference and Exhibition, 21–24 September, Dallas, Texas. Dallas, TX, Society of Petroleum Engineers. (SPE Paper 9267.)

4. RESUMO E CONCLUSÕES

No presente trabalho, usando o GPR para o estudo de solos da Região Norte Fluminense, foi possível as seguintes conclusões:

- A textura arenosa do solo na Restinga de Jurubatiba permitiu identificar o horizonte diagnóstico do Espodossolo com uso de antena GPR de alta frequência (900 Mhz);
- O coeficiente de reflexão é um bom indicador da existência no perfil do solo de horizontes consecutivos eletromagneticamente contrastantes;
- As propriedades eletromagnéticas do solo (constante dielétrica e a velocidade da onda) podem ser estimadas a partir de seus atributos físicos por meio da equação de CRIM;
- Os valores de velocidade eletromagnética obtidos com a técnica CMP são sujeitos a erros de aquisição e processamento, podendo levar a estimativas irrealistas de atributos físicos do solo;
- Quando o interesse é estimar as propriedades eletromagnéticas do solo, o bom desempenho da equação de CRIM depende de uma boa caracterização física do solo;
- Para melhorar a qualidade da caracterização eletromagnética do solo devem ser testados menores incrementos no afastamento entre antenas durante a técnica CMP, diferentes configurações do aparelho ou mesmo outras técnicas de aquisição de dados, comparativamente ao que foi feito no presente trabalho;

- O uso do GPR tem grande potencial de crescimento na Ciência do Solo, precisando haver estudos de melhores metodologias adaptadas para a investigação geofísica rasa.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Achá Panoso, L. (1976). Latossolo Vermelho-Amarelo de tabuleiro do Espírito Santo. Recife, Universidade Federal Rural de Pernambuco, 115p. (Tese Livre Docência).
- Annan, A.P. (1996). Transmission, dispersion and GPR for twin rod probes with and without dielectric coatings. *Wat. Eng. Geophys.* p 125–136.
- Anderson, J.M., Ingram, J.S.I. (1993) Tropical soil Biology and Fertility. 2° ed. Wallingford: Cob. Internacional, 221p.
- Bennema, J., Camargo, M.N. (1978) Some remarks on Brazilian latosols in relation to the oxisols of soil taxonomy. In: International soil classification workshop, 2. Malaysia.
- Bennie, A.T.P. (1996) Growth and mechanical impedance. In: Waisel, Y.; Eshel, A.; Kafra, U. Plant roots. 2° ed. New York: M. Dekker, p 453-470.
- Bernardo, S. (1995) Manual de irrigação. 6° ed. Viçosa: UFV. 657p.
- Burgoa, B.; Mansell, R.S.; Sawka, G.J.; Nkedi-kizza, P.; Capece, J., Campbell, K. (1991), Spatial variability of depth to Bh horizon in Florida Haplaquods using ground-penetrating radar. *Soil and Crop Science Society of Florida Proceedings*, 50:125-130.
- Campbell, J. E., (1990). Dielectric properties and influence of conductivity in soils at one to fifty megahertz. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 54:332-341.
- Cassidy, N.J. (2009) Electrical and magnetic properties of rocks, soils and fluids. In: JOL, H.M., ed. Ground Penetrating Radar: Theory and Applications. Amsterdam, Elsevier, p 41-72.

- Cezar, E., Nanni, M.R.; Chicati, M.L.; Fabrio, F.D.; Hata, F.T., Oliveira, R.B.(2010) Uso de sistema GPR (ground penetrating radar) na avaliação de atributos de um solo sob plantio de cana-de-açúcar. *R. Bras. Ci. Solo*, 34:291-297.
- Collins, M.E.; Schellentrager, G.W.; Doolittle, J.A., Shih, S.F (1986), Using ground penetrating radar to study changes in soil map unit composition in selected Histosols. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 50:408-412.
- Collins, M.E., Doolittle, J.A., (1987). Using ground-penetrating radar to study soil microvariability. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 51:491--493.
- Collins, M.E., Doolittle, J.A., Rourke, R.V., (1989). Mapping depth to bedrock on a glaciated landscape with ground-penetrating radar. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 53:1806-1812.
- Daniels, D. J., (2004). *Ground Penetrating Radar, 2nd Edition*. The Institute of Electrical Engineers, London, United Kingdom, 734p.
- Davis, J. L., Annan, A. P.(1989).Ground penetrating radar for high-resolution mapping of soil and rock stratigraphy. *Geophysical Prospecting*. 37(5):531-551.
- Dexter, A.R. (1988). Advances in characterization of soil structure. *Soil Till. Res.*, 11:199-238,
- Dourado, J. C., Chang, H. K., Malagutti Filho W., Braga, A. C. de O (2003)., Utilização de radar de penetração no solo na Detecção de Estruturas Artificiais rasas no solo. São Paulo, UNESP, *Geociências*, v. 22, N. Especial, p. 75-81.
- Doolittle, J.A., (1982). Characterizing soil map units with the ground penetrating radar. *Soil Surv. Horiz.*, 22(4):3-10.
- Doolittle, J.A (1983). *Investigating Histosols with ground-penetrating radar. Soil Surv. Horiz.*, 23(3):23-28.
- Doolittle, J.A, (1987). Using ground-penetrating radar to increase the quality and efficiency of soil surveys. In: *Soil Survey Techniques. Soil Sci. Soc. Am. Spec. Publ.*, 20:11-32.
- Doolittle, J.A., Fletcher, P., Turenne, J.,(1990). Estimating the thickness and volume of organic materials in cranberry bogs. *Soil Surv. Horiz.*, 31(3):73-78.
- Doolittle, J. A., M. E. Collins, (1998). A comparison of EM induction and GPR methods in areas of karst, *Geoderma* p 83-102.
- Doolittle J. A., Daigle J. J., Kelley J. A., Tuttle J. W. (2005). Using GPR to Characterize Plinthite and Ironstone Layers in Ultisols. *Soil Sci. Soc. Am*, vol 46; numb 4:179-184.

- Doolittle J. A., *Butnor*, J.R (2009). Chapter 6 Soils, Peatlands, and Biomonitoring. Ground Penetrating Radar Theory and Applications; p 177-202,
- Embrapa. (1997) Centro Nacional de Pesquisa de Solos. Manual de métodos de análise de solo. 2. ed. Rio de Janeiro: Embrapa-CNPS,. 212p.
- Embrapa. (1999) Centro Nacional de Pesquisa de Solos (Rio de Janeiro, RJ). Manual de análise química dos solos, plantas e fertilizantes. Embrapa Solos, 370p.
- Farrish, K.W., Doolittle, J.A. and Gamble, E.E., (1990). Loamy substrata and forest productivity of sandy glacial drift soils in Michigan. *Can. J. Soil Sci.*, 70:181-187.
- Fundenor, (1971). Desenvolvimento Agropecuário da Região Norte Fluminense.
- Fonseca, O.O.M. (1986). Caracterização e classificação de solos Latossólicos e Podzólicos desenvolvidos nos sedimentos do Terciário no litoral brasileiro. Itaguaí, Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, 185p. (Tese de Mestrado)
- Gavande, S.A. (1972) Física de suelos. México: Centro Regional de AyudaTécnica (AID), 315p.
- Gee, G.W., Bauder, J.W. (1986) Particle-size analysis. In: Klute, A. ed. Methods of soil analysis. 2 ed. *Madison, American Society of Agronomy* Part. 1. p. 383-411.
- Genuchten, M.T.A. (1980) A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 44:892-897,
- Hagrey, S.A., Müller, C. (2000). GPR study of pore water content and salinity in sand. *Geophysical Prospecting*, 48:63–85.
- Henriques, R.P.B., Araújo, D.S.D., Hay, J.D. (1986). Descrição e classificação dos tipos de vegetação da restinga de Carapebus, Rio de Janeiro. *Rev. Brasil. Bot.*, 9:173-189.
- Hopkins, R.M., Patrick, W.H. (1970) Combined effect of oxygen concentration and soil compaction on root penetration. *Soil Sei., Baltimore*, 108:408-413.
- Huisman J.A., Hubbard S.S., Redman J.D. and Annan A.P (2003). Measuring Soil Water Content with Ground Penetrating Radar: a Review. *Vadose Zone journal* 2:476-491.
- Iijima, M.; Kno, Y. Interspecific (1991) differences of the root system structures of four cereal species as affected by soil compaction. *Japanese Journal of Crop Science*, 60, 130-138.
- Interpex. (1996). Gradix User's Manual. Interpex Limited. USA.

- Jacomine, P.K.T. (2001) Evolução do conhecimento sobre solos coesos no Brasil. In: Cintra, F.L.D., Anjos, J. L. dos, Mello Ivo, W.M.P. *Workshop coesão em solos dos tabuleiros costeiros*. Aracaju: Embrapa Tabuleiros Costeiros, p.19-46.
- Klute, A. Water retention: laboratory methods. In: BLACK, C.A. (1986), ed. *Methods of Soil Analysis. I. Physical and mineralogical methods*. Madison: *American Society of Agronomy, Soil Science Society of America*, p. 635-662.
- Lemos, R.C.; dos Santos, R.D. (1996) Manual de Descrição e Coleta de Solo no Campo. 3.ed. Campinas, Sociedade Brasileira de Ciências do Solo.
- Letey, J. (1985) Relationship between soil physical properties and crop production. *Advances in Soil Science*, 1:277-294.
- Libardi, P.L. Dinâmica da água no solo. Piracicaba – ESALQ/ESALQ. 1995, 497
- Lunt I.A., Hubbard S.S., x Rubin Y. 2004, (2005) Soil moisture content estimation using ground-penetrating radar reflection data. *Journal of Hydrology* 307:254–269.
- Manzatto, C.V. Pedogênese Topossequencial de Solos desenvolvidos de Sedimentos do Terciário do Norte Fluminense: Um Subsídio ao Manejo Agrícola Racional, 1998. 148f. Tese (Doutorado em Produção Vegetal) - Universidade Estadual do Norte Fluminense, Campos dos Goytacazes, 1998
- Marschner, H. Mineral nutrition of higher plants (1995). 2.ed. London: Academic Press, p.508-536.
- Merotto, A.; Mundstock, C.M. (1999) Wheat root growth as affected by soil strength. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, Viçosa - MG, 23:197-202.
- McNeill, J. D., (1980). Electrical conductivity of soils and rock. Technical Note TN-5. Geonics Limited, Mississauga, Ontario.
- Monka, D.L., Schaetzl, R.J., Doolittle, J.A. and Johnson, E.P., (1990). Ground-penetrating radar study of ortstein continuity in some Michigan Haplaquods. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 54:936-938.
- Müller, M. M. L.; Ceccon, G.; Rosolem, C. A. (2001) Influência da compactação do solo em subsuperfície sobre o crescimento aéreo e radicular de plantas de adubação verde de inverno. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, 25:531-538.
- Olhoeft, G. R., (1986). Electrical properties from 10⁻³ to 10⁹ Hz – Physics and chemistry. In: Bananvar, J. R., J. Koplik, and K. W. Winkler (Eds.) *Proceeding of 2nd International Symposium on Physics and Chemistry of Porous Media*.

- Schlumberger-Doll, Ridgefield, Connecticut. October 1986. Am. Inst. Phys., New York, New York. p. 281-298.
- Olhoef, G.R. (1998). Electrical, magnetic, and geometric properties that determine ground penetrating radar performance. In: International Conference on Ground Penetrating Radar, 7. Lawrence, 1998. Proceedings. Lawrence, University of Kansas, p.177–182.
- Oliveira, A.P. DE; Ker, J.C.; Silva, I.R. da; Fontes, M.P.F., Oliveira, A.P. de, Neves, A.T.G. (2010). Spodosols pedogenesis under Barreiras Formation and sandbank environments in the south of Bahia. *R. Bras. Ci. Solo*, 34:847-860,
- Oliveira JR., J.G. & Medeiros, W.E. (2008) Influência do conteúdo de água, granulometria e minerais pesados sobre as reflexões de GPR em corpos arenosos inconsolidados. *Revista Brasileira de Geofísica*, 26:437-449.
- Paixão, M.S.G.; Prado, R.L., Diogo, L.A. (2006) Análise do emprego do GPR para estimar o teor de umidade do solo a partir de um estudo na cidade de São Paulo. *Rev. Bras. Geofísica*, 24:198-196.
- Porsani, J.L. (1999) Ground Penetrating Radar (GPR): proposta metodológica de emprego em estudos geológicos geotécnicos nas regiões de Rio Claro e Descalvado - SP. Rio Claro, 145p. Tese (Doutorado em Geociências) – Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Universidade Estadual Paulista.
- Pedron, F.A. (2007) Mineralogia, morfologia e classificação de saprolitos e Neossolos derivados de rochas vulcânicas no Rio Grande do Sul. Santa Maria, Universidade Federal de Santa Maria, 160p. (Tese de Doutorado).
- Ravelli Neto, A. (1989) Caracterização e classificação de uma sequência de solos da Baixada dos Goitacazes, RJ. Tese (Mestrado em Solos e Nutrição de Plantas) - Itaguaí - RJ. Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro - UFRRJ, 180p.
- Reichardt, K. (1978) A água na produção agrícola. São Paulo: McGraw-Hill do Brasil, 118p.
- Rosolem, C.A.; Vale, L.R.; Grassi Filho, H., Moraes, M.H. (1994) Sistema radicular e nutrição do milho em função da calagem e da compactação do solo. *R. bras. Ci. Solo, Campinas*, 18:491-497.
- Roth, K., Schulin, R., Fluhler, H., Attinger, W., (1990). Calibration of time domain reflectometry for water content measurement using a composite dielectric approach. *Water Resource Research* 26:2267–2273.

- Saarenketo, T., (1998). Electrical properties of water in clay and silty soils. *Journal of Applied Geophysics* 40:73- 98.
- Santos, R.D.; Lemos, R.C.; Santos, H.G.; Ker, J.C., Anjos, L.H.C. Manual de descrição e coleta de solo no campo. 5.ed. Viçosa, SBCS, 2005. 92p.
- Schon, J. H. (1996) Physical properties of rocks: Fundamentals and principles of petrophysics: tarrytown, New York. Elsevier Science Inc, p. 465–478.
- Shierlaw, J.; Alston, A. M. (1984) Effects of soil compaction on root growth and uptake of phosphorus. *Plant Soil, The Hague*, 77:15-28.
- Shih, S.F. and Doolittle, J.A. (1984). Using radar to investigate organic soil thickness in the Florida Everglades. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 48: 651-656.
- Shih, S.F, Myhre, D.L., Schellentrager, G.W., Carlisle, V.W., Doolittle, J.A., (1985). Using radar to assess the soil characteristics related to citrus stress. *Soil Crop Sci. Fla. Proc.*, 45:54-59.
- Shih, S.F, Doolittle, J.A.. Myhre, D.L. and Schellentrager G.W., (1986). Using radar for groundwater investigation. *J. irrigation. Drain. Eng.*, 112(2):110-118.
- Silva, A.P. da; Kay, B.D.; Perfect, E. (1994). Characterization of the least limiting water range of soils. *Soil Science Society of America Journal, Madison*, 58:1775-1781.
- Souza, L.S. (1996) *Uso e manejo de solos coesos dos tabuleiros costeiros*. In Reunião Técnica sobre Solos Coesos dos Tabuleiros Costeiros, 1, Cruz das Almas. Anais, Aracaju: Embrapa – CPATC. 80p.
- Stolf, R. (1991) Teoria e teste experimental de fórmulas de transformação dos dados de penetrômetro de impacto em resistência do solo. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, Campinas, v.15, n.2, p.229-35.
- Stümer, S.L.C. (2008) Infiltração de água em Neossolos Regolíticos do Rebordo do Planalto do Rio Grande do Sul. Santa Maria, Universidade Federal de Santa Maria. 105p. (Tese de Mestrado).
- Taylor, H.M. & Gardiner, H.R. (1963) Penetration of cotton seedling taproots as influenced by bulk-density, moisture content and strength of soil, *Soil Sec., Baltimore*, 96:153-156.
- Tormena, C.A.; Silva, A.P.; Libardi, P.L. (1998). Caracterização do intervalo hídrico ótimo de um Latossolo Roxo sob plantio direto. *Rev. Bras. Ci. Solo*, Viçosa, 22:573-581.

- Ucha, J.M.; Botelho, M.; Vilas Boas, G.S.; Ribeiro, L.P., Santana, P.S. (2002) Uso do radar penetrante no solo (GPR) na investigação dos solos dos Tabuleiros Costeiros no litoral norte do Estado da Bahia. *R. Bras. Ci. Solo*, 26:373-380.
- Vitti, G. C. (1989). .Avaliação e interpretação do enxofre no solo e na planta. Jaboticabal: FUNEP, 37p.
- Wharton, R.P., Hazen G.A., Rau R.N. e Best D.L. Electromagnetic propagation logging: advances in technique and interpretation. In 55th Annual Fall Technical Conference and Exhibition, 21–24 September, Dallas, Texas. Dallas, TX, Society of Petroleum Engineers. (SPE Paper 9267.) 1980.
- Whiteley, G. M.; Dexter, A. R (1982). Root development and growth of oilseed, wheat and pea crops on tilled and nontilled soil, *Soil and Tillage Research*, 2:379-393.
- Winter, E., Simonson, R.W. (1978) Effects of soil compaction and development and yield of corn (maize). *Soil Science*, Baltimore, 58:435-443.