

Annexe 6:

CALIBRAÇÃO DA TÉCNICA DE Time Domain Reflectometry (TDR) PARA AVALIAÇÃO DA UMIDADE DO SOLO EM UM LATOSSOLO AMARELO, TEXTURA MUITO ARGILOSA, COM DIFERENTES VALORES DE DENSIDADE APARENTE DO SOLO - Avaliação no campo.

Wenceslau Geraldtes Teixeira; Olivio Pedro Faccin; Celso Paulo de Azevedo; Bernd Huwe; Götze Schroth

INTRODUÇÃO :

A técnica de reflectometria no domínio do tempo (TDR), vem sendo cada vez mais utilizada para avaliação da umidade volumétrica do solo (θ).

Esta técnica se baseia na determinação da constante dielétrica aparente (ϵ) do solo através da determinação da velocidade de propagação de ondas eletromagnéticas. É bastante útil quando se pretende fazer avaliações não destrutivas e repetidas num mesmo local, permitindo também leituras próximas à superfície, sem apresentar perigo de contaminação radioativa, como os métodos de atenuação de raios gama e moderação de neutrons.

Dada a grande magnitude das diferenças encontradas entre os valores da ϵ da água (81), ar (1) e principais constituintes sólidos do solo (3-5), todos estes valores, adimensionais, estão condicionados a uma dada frequência e temperatura (Biscegli et al., 1996), acreditava-se a princípio que poderia se utilizar uma calibração universal com uma função $\theta=f(\epsilon)$ (Topp et al. 1980).

Trabalhos posteriores mostraram que diversos fatores podem causar influência nas medições da ϵ havendo portanto a necessidade de calibrações específicas, quando se requer uma maior precisão das avaliações, principalmente em solos argilosos e/ou com baixos valores ρ .

Esses fatores podem ser divididos em dois grupos: a) características técnicas do equipamento, como: comprimento das hastes guias, comprimento e resistividade do cabo, frequência do sinal e espaçamento entre as hastes guias (Hook & Livingston, 1995; Petersen, et al., 1994; Zegelin et al., 1992) e propriedades e característica do local avaliado como : a matriz do solo e conseqüentemente a sua densidade aparente (ρ) (Malicki et al., 1996; Bohl & Roth, 1994, Dirksen & Dasberg, 1993; Roth et al., 1992 Herkelrath, et al., 1991); textura (Bohl & Roth, 1994);

temperatura (Pepin et al., 1995); heterogeneidade da umidade na transecção vertical (Topp & Davis, 1985; Baker & Lascano, 1989) e presença de minerais magnéticos (Roth et al., 1992).

Muitos desses fatores, como a ρ e temperatura, podem variar não somente entre locais, mas também em áreas próximas, em função das espécies presentes e manejo empregado (preparo do solo, poda, colheita, mulching, etc.). Essas variações podem ser especialmente importante em sistemas de uso da terra, heterogêneos, como os sistemas agroflorestais, onde espécies com diferentes características (crescimento da copa, sombreamento, produção de liteira, distribuição do sistema radicular, etc.) e manejo utilizado, são associadas, também em comunidades naturais heterogêneas como as florestas e cerrados.

Quando se pretende avaliar fluxos de água no solo, através da técnica TDR, em situações heterogêneas, a consideração dessas potenciais fontes de interferência, nessa técnica e a sua quantificação é requerida.

Este trabalho, teve por objetivo a obtenção de uma equação de calibração para a avaliação da umidade volumétrica do solo pela técnica TDR (θ_{TDR}) para o latossolo amarelo (Xanthic ferralsol - FAO), textura muito argilosa, com diferentes valores de ρ .

MATERIAL E MÉTODOS :

As avaliações da ϵ e amostragens para determinação da θ_{Grav} e ρ , foram realizadas na Estação Experimental do Centro de Pesquisa Agroflorestral da Amazônia Ocidental - (EMBRAPA-CPAA), em Manaus - AM.

Foram realizadas na camada superficial de um latossolo amarelo, textura muito argilosa, em um experimento sobre diferentes sistemas de uso da terra, com plantios de cupuaçu (*Theobroma grandiflorum*); pupunha (*Bactris gasipaes*) para colheita de frutos e palmitos e sob uma planta de cobertura do solo, o kudzu tropical (*Pueraria phaseoloides*) sendo as amostras coletadas a aproximadamente 40cm do tronco, também foram avaliadas duas espécies freqüentes na floresta primária: a bacaba (*Bactris gasipaes*) e o matá-matá (*Eschweilera spp*). Também foi aberta uma trincheira e coletada amostras nas profundidades de 30cm, 90cm e 150cm. As espécies que haviam no local das avaliações e os resultados obtidos estão apresentados na Tabela 1.

medo

As avaliações foram realizadas ao longo do ano de 1996, abrangendo uma parte do período mais seco do ano, e posteriormente, o período chuvoso, para obtenção de uma maior amplitude de variação da umidade do solo.

Foi utilizado, nesta avaliação, um aparelho comercial da marca EASY TEST® - Polônia, com as seguintes características técnicas: pulso de 250ps, e sondas com duas linhas de transmissão de 100mm de comprimento com diâmetro de 2mm espaçadas entre si por 16mm.

Simultaneamente à avaliação da ϵ pela sonda TDR, inserida verticalmente na superfície do solo, foram coletadas amostras, com anel volumétrico de 100cm³, com 5cm de altura, para avaliação termogravimétrica da umidade volumétrica do solo (θ_{Grav}) e ρ , realizada em estufa 105° C, até peso constante.

O aparelho da EASY TEST® apresenta uma equação de calibração programada para apresentar diretamente o resultado da θ_{TDR} em %, mas é possível resgatar os valores da ϵ . A equação programada no aparelho, segundo informações do fabricante, para solos minerais compreendidos na faixa de $1,4\text{g cm}^{-3} < \rho < 1,8\text{g cm}^{-3}$, é a seguinte: se $\epsilon \leq 36 \Rightarrow \theta^* = 10,64 \sqrt{\epsilon} - 15,82$ e para $\epsilon > 36 \Rightarrow \theta^* = 17,54 \sqrt{\epsilon} - 57,21$.

O fabricante sugere que seja utilizada a equação de Malicki et al., 1996, quando os valores de ρ apresentarem um desvio de $\pm 0,2\text{g cm}^{-3}$ em relação a faixa de ρ apresentada para solos minerais.

$$\theta^*(\epsilon, \rho) = (\sqrt{\epsilon} - 0,819 - 0,168\rho - 0,159\rho^2) / (7,17 + 1,18\rho).$$

Foi verificada também, a adequabilidade da equação apresentada por Topp et al., (1980), para essas condições.

$$\theta^* = -0,0053 + 0,00292\epsilon - 0,000055\epsilon^2 + 0,0000043\epsilon^3.$$

Após análise dos desvios ($\theta_{\text{Grav}} - \theta_{\text{TDR}}$), decidiu-se realizar ajustes de calibração entre os valores de θ_{Grav} e com os valores da ϵ . através de análise e regressão, testando-se os seguintes modelos:

$$\theta_{\text{TDR}} = \beta_0 + \beta_1\epsilon;$$

$$\theta_{\text{TDR}} = \beta_0 + \beta_1\epsilon + \beta_2\epsilon;$$

$$\theta_{\text{TDR}} = \beta_0 + \beta_1\epsilon + \beta_2\epsilon + \beta_3\epsilon.$$

Para os dados da θ_{TDR} obtidos pela equação proposta por Malicki et al. (1996), equação proposta por Topp et al. (1980) e pela equação programada pelo fabricante do EASY TEST®, foram testados ajustes lineares e quadráticos, com e sem o coeficiente β_0 .

Foram determinados: os coeficientes da regressão, sua significância, os coeficientes de determinação (R^2), de determinação ajustada (R^2) e o erro padrão da média (Tabela 3). Os valores de R^2 foram calculados por serem apropriados para comparações de modelos com diferentes números de variáveis (Jacobsen & Schojonning, 1993; Draper & Smith, 1981).

Foi realizado também um ajuste por regressão múltipla, para ρ e ε , selecionando-se as variáveis que contribuíam significativamente para o modelo por procedimento de seleção stepwise (Draper & Smith, 1981).

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Na Figura 1 são apresentados os valores da ε em relação aos valores de θ_{Grav} , na Figura 2 observa-se os desvios entre os valores de θ_{TDR} estimados pelas equações de Topp et al., 1980 e Malicki et al., 1996 e aos valores apresentados diretamente no display do aparelho da EASY TEST® e os valores de θ_{Grav} . Verifica-se que estes ajustes não se adequaram bem a este conjunto de dados.

Baseado nesses resultados e dado que se pretendia obter uma maior acuracia do método, decidiu-se realizar novos ajustes para os dados, utilizando-se os modelos descritos acima. As equações obtidas, para os valores de ε apresentaram parâmetros estatísticos, pouco diferenciados (Tabela 2) entre as equações linear e quadrática, tendo a equação cúbica apresentado alguns coeficientes não significativos, sendo por este motivo descartada das análises posteriores.

Como os parâmetros, eram pouco diferenciados, optou-se por fazer análises gráficas dos desvios para as equações linear e quadrática para auxiliar na escolha da melhor ajuste (Figura 3).

A equação quadrática foi a selecionada como a que melhor ajustou os valores da ε , apresentando os coeficientes ligeiramente superiores (Tabela 2) aos do modelo linear e uma menor amplitude dos desvios (Figura 3 e 4). Resultados semelhantes de melhores ajustes para função quadrática, já foram encontrados para outras classes de solos brasileiros, em experimento de laboratório. (Tommaselli & Bacchi, 1996).

São apresentados também os ajustes lineares para as equações de Topp et al., 1980; Malicki et al., 1996 e para a equação programada no aparelho da EASY TEST, dado que alguns aparelhos comerciais, fazem o ajuste automático com estas equações, e determinadas finalidades da avaliação de θ , não necessita de elevada acuracia.

A diferença de modelos para o melhor ajuste, esta relacionada, entre outros fatores, a faixa de valores de umidade obtida para o ajuste dos dados. Em trabalhos realizados no laboratório, como os de Topp et al., 1980, e Malicki et al., 1996, há a possibilidade de criar artificialmente valores de θ . Estes valores extremos da umidade do solo podem mudar o modelo de ajuste das equações.

No presente caso a faixa de variação de θ no solo foi de 22% a 53 %, que são os valores extremos encontrados no latossolo amarelo, textura muito argilosa, na região de Manaus, em condições naturais. Esta faixa de valores é semelhante aos obtidos na avaliação realizada através da técnica de moderação de neutrons, realizada por Cabral, 1991 e por Hodnett, et al., 1996, respectivamente em um seringal e floresta primária e pastagens e floresta primária, em Manaus, sob latossolo amarelo. Esses valores se encontram também dentro da faixa determinada por Medina & Júnior, 1987, quando da avaliação da capacidade de campo para esta classe de solo.

A presença de materiais orgânicos, pode levar a uma subestimação da ε , como indicado previamente no trabalho de Topp et al. (1980) e no trabalho de Herkelrath et al. (1991), posteriormente os trabalhos de Malicki, et al., 1996; Roth et al., 1992; Roth et al., 1990; Dirksen & Dasberg, 1993, comprovaram um efeito acentuado da ρ do solo sobre a ε , por essa razão foi feito o ajuste por regressão múltipla, para θ_{TDR} em função de ρ e ε , que resultou na seguinte equação:

$$\theta_{TDR} = 0,156204 + 0,00087\varepsilon^{2**} - 0,000017\varepsilon^{3**} + 0,020799\rho^{2**}$$

($R^2 = 0,9212$, $R^2 = 0,9202$ e um erro padrão da média de 0,0222).

Este tipo de ajuste foi também realizado por, Tommaselli & Bacchi, 1996; Jacobsen & Schjonning, 1993, que encontraram pequenas melhorias no ajuste como o verificado nesse estudo. Diferindo dos obtidos por Malicki et al., 1996 que com este modelo de ajuste conseguiu uma boa redução dos desvios.

Os desvios da equação múltipla estão apresentados na Figura 3, onde observa-se uma distribuição semelhantes aos das equações linear e quadrática.

Uma análise da distribuição gráfica dos resíduos (Figura 5) em relação aos valores de ρ evidenciou, um melhor ajuste dos dados, para valores de $\rho > 1,1 \text{ g cm}^{-3}$, baseado nessa evidência foi realizado um novo ajuste dos dados reagrupando-os em duas faixas de ρ , amostras com $\rho < 1,1 \text{ g cm}^{-3}$ e amostras com $\rho \geq 1,1 \text{ g cm}^{-3}$. Os modelos de equações ajustados foram os mesmos utilizados anteriormente.

Os coeficientes das equações ajustadas, e os parâmetros estatísticos, são apresentadas na Tabela 3, os melhores ajustes foram novamente os modelos linear e quadrático.

Foi realizada também uma análise de variância para testar a identidade das equações ajustadas, para os diferentes valores de ρ em relação a equação geral para os dados analisados conjuntamente (Tabela 4), onde verificou-se que os modelos são significativamente diferentes, este resultado permite recomendar um ajuste diferenciado do dados, quando se dispõe de resultados da ρ ou sua estimativa.

Relaciona-se também os menores desvios apresentados para as dados de amostras com $\rho \geq 1,1 \text{ g cm}^{-3}$, a esses dados apresentarem valores elevados de θ , isto é facilmente observado quando se compara as Figuras 6 e 7. Há uma indicação que os locais nesta, classe de solo, onde os valores de ρ são mais elevados, apresentam uma maior capacidade de retenção de água, que pode ser verificada pelos valores máximos de umidade observados no solo serem correlacionados os locais de maior ρ . Outro fato que deve estar contribuindo para a maior acuracia deste grupamento de dados refere-se a menor variância dos valores de ρ dessas amostras (Tabela 2).

Esse efeito da maior acuracia dessa técnica para valores elevados de θ , provavelmente está relacionado ao bom contato do solo com a haste guia e a inexistência de discontinuidades (como bolhas de ar, rachaduras e grandes poros no solo) que causam problemas na determinação de ε (Baker & Lascano, 1989), bem como de um efeito proporcional do maior conteúdo de água em relação aos outros constituintes que fazem parte do solo (fase gasosa e fase solida). Este fenômeno já foi verificado por outros autores (Roth et al, 1990).

A acuracia da avaliação da θ_{TDR} pode ser verificada pela análise do erro padrão da média, apresentado na Tabela 2. A magnitude dessa variação é semelhante a encontrada por outros autores como Herkelrath et al., 1991 que encontrou valores da ordem de $0,02 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$; Bohl & Roth, 1994 que encontraram valores entre 0,02 até $0,03 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ para solos minerais e $0,03 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ e $0,07 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ para solos orgânicos, Topp et al., 1980 descreve valores de $0,013 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$

A grande maioria dos estudos de calibração da técnica do TDR, encontrados na literatura foram feitos em condições de laboratório com solos peneirados, e colocado em vasos. No presente caso a variabilidade esperada para os valores de θ_{TDR} é previsivelmente maior dado que esta classe de solo, nas condições amazônicas e sob as formas de uso, onde foram coletadas as amostras favorecem uma intensa atividade na camada superficial, com mudanças em algumas características do solo de forma bastante acelerada, estas alterações ocorrem de forma bem menos acentuada nas camadas mais profunda onde há também uma menor variabilidade da ρ , como pode ser verificado

comparando-se os valores do desvio padrão das amostras coletadas superficialmente com os valores coletados em profundidade (Tabela 1).

Um outro ponto a ser abordado quando se discute a acurácia do método refere-se diretamente a precisão do método gravimétrico, tomado como padrão para a calibração, que apresenta uma boa acurácia, no entanto, uma serie de cuidados devem serem tomados (aferição da balança, amostragem com o anel volumétrico cuidadosa para se evitar compactação, volume do anel volumétrico) para que não se tenha uma propagação elevada de erros (Gardner, 1965).

Os desvios apresentados provavelmente são devidos a um somatório de pequenas interferências que podem interferir na avaliação da ϵ . No entanto fatores isolados, ou erros sistemáticos podem ocorrer (sondas defeituosas, erros de pesagem, locais com grandes rachaduras no solo), esse problema que foi detectado em algumas avaliações e amostragens, foi parcialmente resolvido, pela análise de dados discrepantes e sua eliminação quando da constatação de um erro causado por um problema desta natureza.

As pequenas interferências que isoladamente são desprezíveis para alteração de resultados, quando ocorrem em conjuntos ou em casos específicos podem ser a explicação para estes desvios. É importante que neste tipo de avaliação se conheça as causas dessas interferências, como uma forma de se evitar, atenuar ou controlar as mesmas.

A área de influência da avaliação pela propagação das ondas pelas haste guias é descrita por Baker & Lascano, 1989, correlacionada com áreas ao redor da haste(s) guia(s), não havendo diferenças ao longo de seu comprimento. O volume de solo avaliado pela sonda da EASY TEST, segundo informações do manual, é basicamente um cilindro que circunda as hastes guias, tem uma área de influência de aproximadamente 5cm de diâmetro com 13 de comprimento, perfazendo um volume avaliado mais que duas vezes superior ao amostrado pelo anel volumétrico, no entanto pressupõe-se que as maiores possibilidade da área avaliada ter causados desvios, está relacionada a gradientes de umidade que ocorrem no sentido vertical no solo.

Se no momento da avaliação estiver ocorrendo o deslocamento de uma frente de molhamento na parte avaliada, isto dificulta a interpretação automática do sinal por algoritmos programados no aparelho (Dasberg & Hopmans, 1992), recomenda-se a interpretação gráfica do sinal manualmente, esse efeito não foi controlado nessas avaliações, pelo fato do aparelho utilizado não apresentar os gráficos do sinal. Deve ser melhor estudado, pois em grande parte do ano, ocorrem precipitações bastante freqüentes, na região amazônica, que podem causar desvios inaceitáveis, principalmente

em medições automáticas, com intervalo de leituras rápidas, ou com haste guias de grande comprimento.

A instalação horizontal das hastes guias, pode atenuar o efeito da frente de molhamento, assim como reduzir o efeito da variabilidade na transecção vertical, entretanto nem sempre esta instalação é possível de ser realizada pela necessidade da escavação do local para a sua instalação.

As avaliações foram realizadas imediatamente após a inserção das hastes guias no solo, isso pode causar uma interferência pela compressão da água na região próxima as hastes quando da sua instalação (Jacobsen & Schjonning, 1993), este problema provavelmente teve um efeito reduzido nessas avaliações pelo pequeno diâmetro das hastes guias utilizadas nestas avaliações (2 mm).

Dado que a ϵ é uma propriedade que tem relação com a temperatura (Pepin et al., 1995), a avaliação da umidade em diferentes condições de temperatura pode alterar os valores, esses efeitos da temperatura é mais pronunciados quanto a θ do solo é mais elevada, isso está relacionado ao efeito da temperatura afetar de forma mais intensa a parte líquida do solo, em relação a fase gasosa e sólida, este fato provavelmente teve pequena interferência nestas avaliações dado que a grande maioria dos locais onde foram realizadas as avaliações, sofre baixa incidência direta da radiação solar, é a magnitude da variação da temperatura, nestes locais serem reduzidas (Cabral, 1996). Entretanto o efeito da temperatura, pode ser um fator importante, se ocorrerem mudanças de forma mais acentuada em outras condições, como é um parâmetro de fácil mensuração avaliação recomenda-se avaliá-lo em estudos que requerem grande precisão dos dados.

A variação dos valores de ρ está diretamente relacionados ao uso do solo (espécie presente e o manejo praticado), este pode ser um importante fator a ser considerado, pois as mudanças nesta característica do solo, podem ser alteradas de uma forma rápida, e consequentemente podem alterar os processos físico-hídricos e químicos do solo, especialmente os relacionados ao movimento da água no solo.

Neste estudo diferenças importantes, entre a ρ foram observadas entre as áreas cultivadas e as áreas de floresta primária. Os valores reduzidos de ρ próximo as plantas de pupunha, em relação a outras espécies cultivadas como o cupuaçu e a kudzu, se deve uma elaborada trama com elevada massa de raízes na superfície do solo (D. Haag., anexo 1 deste relatório), e não há espaços porosos no solo, como poderia se imaginar.

É importante o conhecimento das diferentes propriedades do solo que podem interferir na avaliação da θ_{TDR} , através dos quais é possível evitar ou controlar estas interferências através de calibração no campo.

Para a decisão sobre o melhor modelo de ajuste de calibração deve se considerar a precisão desejada ou necessária, a qual está relacionada diretamente aos objetivos para o qual se está determinando θ .

Bibliografia citada

CABRAL, O.M.R. Armazenamento de água no solo da floresta e de terra firme e seringal implantado. INPE, São José dos Campos, 103p. (Dissertação de mestrado).

BISCEGLI, C.I ; VAZ, C.M.P; CRUVINEL, P.E.;RABELLO, L.M. Outros equipamentos e métodos. In: CRESTANA,S; CRUVINEL.P.E; MASCARENHAS,S. eds. Instrumentação agropecuária - Contribuições no limiar do novo século. Brasília, Embrapa-Spi, 1996, p. 228-262.

CABRAL, O.M.R. Climatological observations recorded during the period 1993 to 1995 at Shift project site in Manaus, Central Amazônia. In: GASPARROTO, L. & PREISINGER, H. eds. Recuperação de áreas degradadas e abandonadas, através de sistemas de policultivo. Manaus, Embrapa-Cpaa/ Universidade de Hamburg, 1996, p.34-46.

BAKER, J.M. & LASCANO, R.J. The spacial sensitvity of time domain reflectometry. Soil Science, 147(5): 378 - 384.1989

BOHL, H. & ROTH, K. Evaluation of dielectric mixing models to describe the $q(e)$ relation. In : SYMPOSIUM AND WORKSHOP ON TIME DOMAIN REFLECTOMETRY IN ENVIRONMENTAL, INFRASTRUCTURE AND MINIG APPLICATIONS. Evanston, 1994. Proceedings. Evanston, United States Departament of interior bureau of mines, 1994. p. 309-319 (Special publication SP 19-94).

ROTH, C.H; MALICKI, M.A. & PLAGGE. Empirical evaluation of the relationship between soil dielectric constant and volumetric water content as the basis for calibratin gois moisture measurements by TDR. Journal of Soil Science, 43:1-13, 1992.

DRAPER, N. & SMITH, H. Applied regression analysis, 2.ed., New York, J. Wiley, 1981. 709 p.

DIRKSEN, C. & DASBERG, S. Improved calibration of time domain reflectometry soil water content measurements. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 57:660-667, 1993.

DASBERG, S. & HOPMANS, W. Time domain reflectometry calibration for uniformly and nonuniformly wetted sandy and clayey loam soils. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 56:1341-1345, 1992.

GARDNER, W.H. Water content. In. BLACK, C. A. ed. *Methods of soil analysis - Part 1. Physical and mineralogical properties, including statistics of measurement and sampling*. Madison, SSSA, 1965. p. 82-125.

JACOBSEN, O.H. & SCHJONNING. A laboratory calibration of time domain reflectometry for soil water measurement including effects of bulk density and texture. *Journal of Hydrology.*, 151: 147-157, 1993.

HERKELRATH, W. N., HAMBURG, S. P. & MURPHY, F. Automatic, real-time monitoring of soil moisture in a remote field area with time domain reflectometry. *Wat. Resour. Res.*, 27:857-864, 1991.

HODNETT, M.G., OYAMA, M.D., TOMASELLA, J. & MARQUES FILHO, A. de O. Comparisons of long term soil water storage behaviour under pasture and forest in three areas of Amazonia. In : GASH, J. H. C; NOBRE, C.A.; ROBERTS, J. M. & VICTORIA R. L. eds. *Amazonian deforestation and climate*. New York, John Wiley, 1996. p.79-101.

HOOK, W.R. & LIVINGSTON, N.J. Propagation velocity errors in time domain reflectometry measurements of soil water. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 59:92-96, 1995.

MALICKI, M. A., PLAGGE, R. & ROTH, C. H. Improving the calibration of dielectric TDR soil moisture determination taking into account the solid soil. *Euro. J. Soil Sci.*, 47:357-366, 1996.

MEDINA, B.F. & OLIVEIRA JUNIOR, R.C. Relações entre a capacidade de campo determinada in situ e em laboratório em latossolo amarelo, muito argiloso. *R. bras. Ci. Solo*, 11:91-95, 1987.

PEPIN, S; LIVINGSTON, N.J. & HOOK W. R. Temperature-dependent measurement errors in time domain reflectometry determinations of soil water. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 59:38-43, 1995.

PETERSEN, L.W.; THOMSEN, A. MOLDRUP, P. JACOBSEN, O.H. & ROLSTON, D. E. High resolution time domain reflectometry: sensitivity dependency on probe-design. *Soil Science*. 159 (3) : 149-154, 1994.

ROTH, K., SCHULIN, R., FLUHLER, H. & ATTINGER, W. Calibration of time domain reflectometry measurements for water content measurement using a composite dielectric approach. *Wat. Resour. Res.* 26:2267-2273.

TOPP, G.C & DAVIS, J. L. Measurement of soil water content using time- domain reflectometry (TDR): A field evaluation. *Soil Sci. S. Am. J.* 49: 19-24, 1985)

TOPP, G. C., DAVIS, J. L. & ANNAN, A. P. Electromagnetic determination of soil water content: measurement in coaxial transmission lines. *Water Resour. Res.*, 16: 574-582, 1980.

TOMMASELLI, J.T.G. & BACCHI, O.O.S. Calibração de um TDR utilizando modelos empíricos para cinco solos paulistas. In: CONGRESSO PAN AMERICANO DE CIÊNCIA DO SOLO, 23., Águas de Lindóia, 1996. Anais. Águas de Lindóia, Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 1996, Cd-Rom Solo-Suelo.

ZEGELIN, S. J., WHITE, I. & RUSSEL, G. F. A critique of the time domain reflectometry technique for determining field soil-water content. In: TOPP, G. C., REYNOLDS, W. D. & GREEN R. E. eds. *Advance in mesurement of soil physical properties: bringing theory into practice.* Madison, Soil Science Society of America, 1992. p.187-208 (Special publication, 30).

Tabela 1- Valores da umidade volumétrica e densidade do solo avaliados próximo a diferentes espécies de plantas, e em três profundidades num latossolo amarelo, textura muito argilosa, Manaus.

| Tratamento | θ (%) – umidade volumétrica | | | | | ρ - densidade do solo (g cm^{-3}) | | | |
|--|------------------------------------|-------|---------------|--------|-----------|---|---------------|--------|--------|
| | n | Média | Desvio padrão | Mínimo | Máximo | Média | Desvio padrão | Mínimo | Máximo |
| Floresta primária | | | | | | | | | |
| Matá-matá (<i>Eschweilera spp</i>) | 19 | 34,10 | 6,49 | 25,40 | 47,7 0 | 0,78 | 0,11 | 0,62 | 0,98 |
| Bacaba (<i>Oenocarpus bacaba</i>) | 18 | 41,44 | 5,81 | 30,20 | 48,7 0 | 0,81 | 0,10 | 0,63 | 1,00 |
| Áreas cultivadas | | | | | | | | | |
| Pupunha (<i>Bactris gasipaes</i>) -Fruto | 20 | 26,71 | 3,15 | 22,20 | 33,0 0 | 0,94 | 0,13 | 0,73 | 1,22 |
| Pupunha -Palmito | 38 | 34,68 | 7,26 | 20,27 | 47,7 5 | 0,91 | 0,10 | 0,71 | 1,16 |
| Cupuaçu (<i>Theobroma grandiflorum</i>) | 33 | 41,81 | 2,61 | 34,67 | 46,6 8 | 1,10 | 0,21 | 0,91 | 1,54 |
| Pueraria (<i>Pueraria phaseoloides</i>) | 20 | 36,20 | 2,90 | 30,80 | 42,5 0 | 1,05 | 0,06 | 1,18 | 0,93 |
| Avaliação do perfil em três profundidades | | | | | | | | | |
| 30cm | 26 | 43,62 | 3,07 | 34,50 | 47,4 0 | 1,23 | 0,06 | 1,06 | 1,33 |
| 90cm | 27 | 48,27 | 3,05 | 40,80 | 53,4 0 | 1,21 | 0,06 | 1,05 | 1,30 |
| 150cm | 25 | 48,28 | 3,05 | 44,50 | 53,2 0 | 1,22 | 0,06 | 1,14 | 1,29 |

Tabela 2 - Coeficientes das equações de regressão para os modelos ajustados.

| β_0 | β_1 | β_2 | β_3 | R^2 | R^2 ajustado | Erro padrão ($\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$) |
|---|------------------------|-------------------------|-------------------------|--------|----------------|--|
| $\theta (\epsilon)$ | | | | | | |
| 0,108794** | 0,013690** | - | - | 0,9079 | 0,9075 | 0,0239 |
| 0,046367** | 0,020444** | -0,000169** | - | 0,9123 | 0,9115 | 0,0233 |
| 0,142527* | 0,004207 ^{ns} | 0,0000684 ^{ns} | -0,000014 ^{ns} | 0,9133 | 0,9127 | 0,0233 |
| $\theta(\epsilon, \rho)^+$ -Equação de Malicki, et al., 1996. | | | | | | |
| -0,03289* | 1,0795** | - | - | 0,7875 | 0,7866 | 0,0362 |
| - | 0,9994** | - | - | 0,9920 | 0,9919 | 0,0365 |
| $\theta (\epsilon)^{++}$ -Equação de Topp et al., 1980. | | | | | | |
| 0,2082* | 1,0766** | - | - | 0,9082 | 0,9078 | 0,0238 |
| - | 0,9965** | - | - | 0,9965 | 0,9965 | 0,0241 |
| $\theta (\epsilon)^{+++}$ - Easy Test [®] | | | | | | |
| 0,03065** | 1,1259** | - | - | 0,9113 | 0,9109 | 0,0234 |
| - | 1,2159** | - | - | 0,9964 | 0,9965 | 0,0241 |

** e *: significativo ao nível de 1% e 5% de probabilidade, respectivamente, pelo teste de F.; ns: não significativo; +: fórmula proposta por Malicki et al., 1996; ++: fórmula proposta por Topp et al., 1980; fórmula embutida no aparelho EASY TEST[®]

Obs.: Nomes comerciais e industriais aqui incluídos são em benefício do leitor e não implica em preferência ou recomendação dos produtos pelos autores ou instituições.

Tabela 3 - Coeficientes das equações de regressão para os modelos ajustados para os dados analisados conjuntamente e separados pelos valores de densidade aparente do solo (ρ) em amostras com ρ menor que $1,1 \text{ g cm}^{-3}$ e ρ maiores ou iguais a $1,1 \text{ g cm}^{-3}$.

| β_0 | β_1 | β_2 | β_3 | R^2 | R^2 ajustado | Erro padrão ($\text{cm}^3 \text{ cm}^{-3}$) |
|--|-------------------------|--------------------------|-------------------------|--------|----------------|---|
| $\theta (\epsilon) - \text{Todos os dados (n = 226)}$ | | | | | | |
| 0,108794** | 0,013690** | - | - | 0,9079 | 0,9075 | 0,023869 |
| 0,046367** | 0,020444** | -0,000169** | - | 0,9123 | 0,9115 | 0,023339 |
| 0,142527** | 0,0042070 ^{ns} | 0,0000684 ^{ns} | -0,000014 ^{ns} | 0,9133 | 0,9127 | 0,023260 |
| $\theta (\epsilon) - \text{Densidade menor } 1,1 \text{ g cm}^{-3} (\text{n} = 134)$ | | | | | | |
| 0,105602** | 0,013687** | | | 0,8929 | 0,8921 | 0,02396 |
| 0,068213* | 0,018129** | - 0,000122 ^{ns} | | 0,8944 | 0,8928 | 0,02388 |
| 0,143210 ^{ns} | 0,004446 ^{ns} | 0,000664 ^{ns} | -0,000014 ^{ns} | 0,8950 | 0,8926 | 0,02390 |
| $\theta (\epsilon) - \text{Densidade maior ou igual } 1,1 \text{ g cm}^{-3} (\text{n} = 92)$ | | | | | | |
| 0,0178980** | 0,011077** | - | - | 0,7621 | 0,7595 | 0,02135 |
| - 0,077161 ^{ns} | 0,032686** | - | - | 0,7833 | 0,7784 | 0,02049 |
| -0,0312368 ^{ns} | 0,06422 ^{ns} | -0,001825 ^{ns} | 0,000020 ^{ns} | 0,7844 | 0,7771 | 0,02055 |

** e *: significativo ao nível de 1% e 5% de probabilidade, respectivamente, pelo teste de F.; ns : não significativo .

Tabela 4: Resultados da análise de variância para testar a identidade dos modelos ajustados para a constante dielétrica em diferentes densidades aparentes do solo.

| Fonte de variação | Graus de liberdade | Soma de Quadrados | Quadrado médio | Valor de F calculado |
|-------------------|--------------------|-------------------|----------------|----------------------|
| Modelo Linear | | | | |
| Parâmetro (c) | (4) | 37,13576 | | |
| Parâmetro (r) | 2 | 37,11459 | | |
| Redução(Ho) | 2 | 0,02117 | 0,10585 | 8,64* |
| Resíduo | 222 | 0,27199 | 0,0012251 | |
| Total | 226 | 37,40775 | | |
| Modelo Quadrático | | | | |
| Parâmetro (c) | (4) | 37,2920 | | |
| Parâmetro (r) | 2 | 37,28323 | | |
| Redução(Ho) | 2 | 0,00877 | | |
| Resíduo | 222 | 0,11575 | 0,004385 | |
| Total | 226 | 37,40775 | 0,0005213 | 8,41 |

Valores de F (2,226) $\alpha_5 = 3,00$; $\alpha_1 = 4,6$; ** significativo a 1% pelo teste de F.

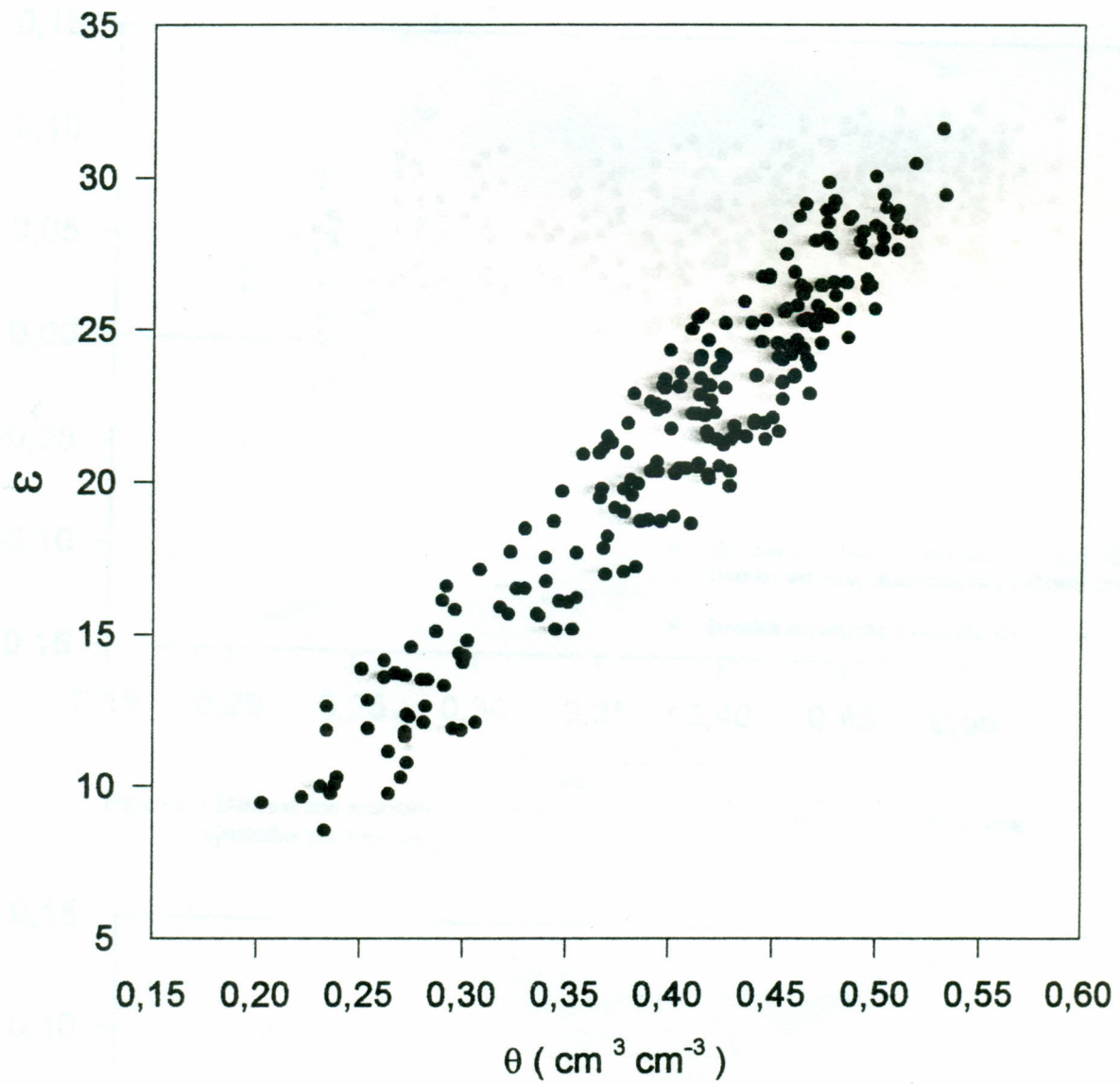


Figura 1 - Relação entre a constante dielétrica aparente do solo (ϵ) e umidade volumétrica (θ).



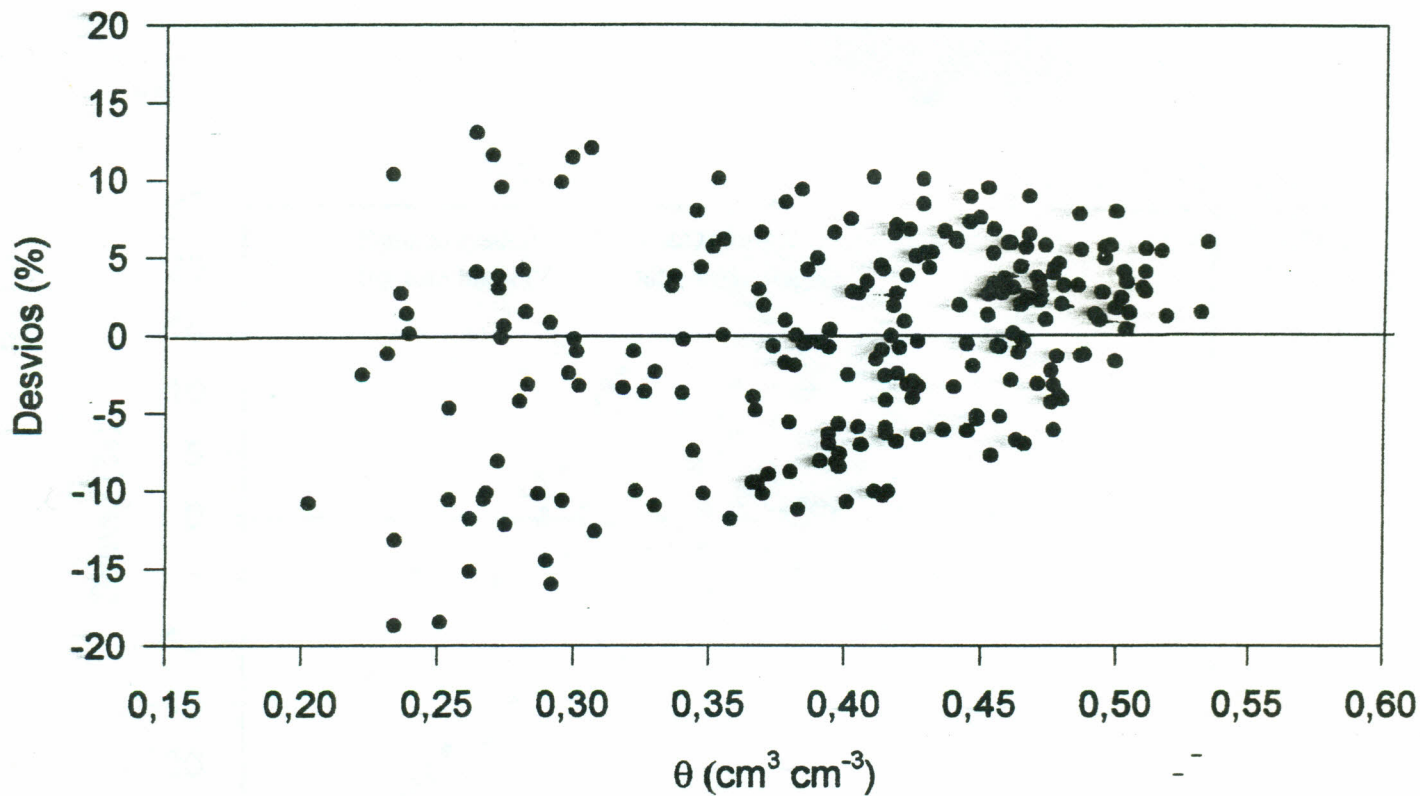


Figura 4 - Desvios em % após ajuste pela equação quadrática em relação aos valores de θ .

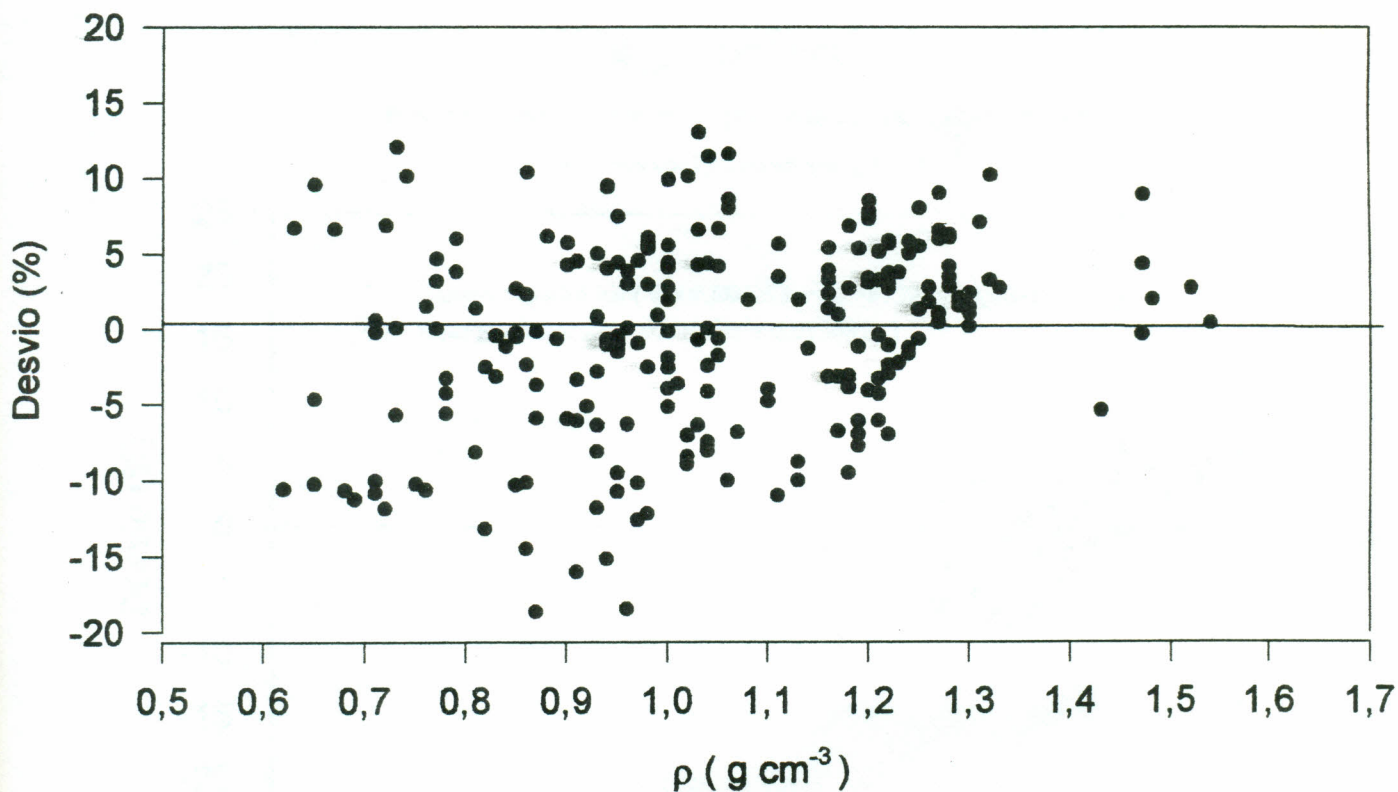


Figura 5 - Desvios em % após ajuste pela equação quadrática em relação aos valores de ρ .

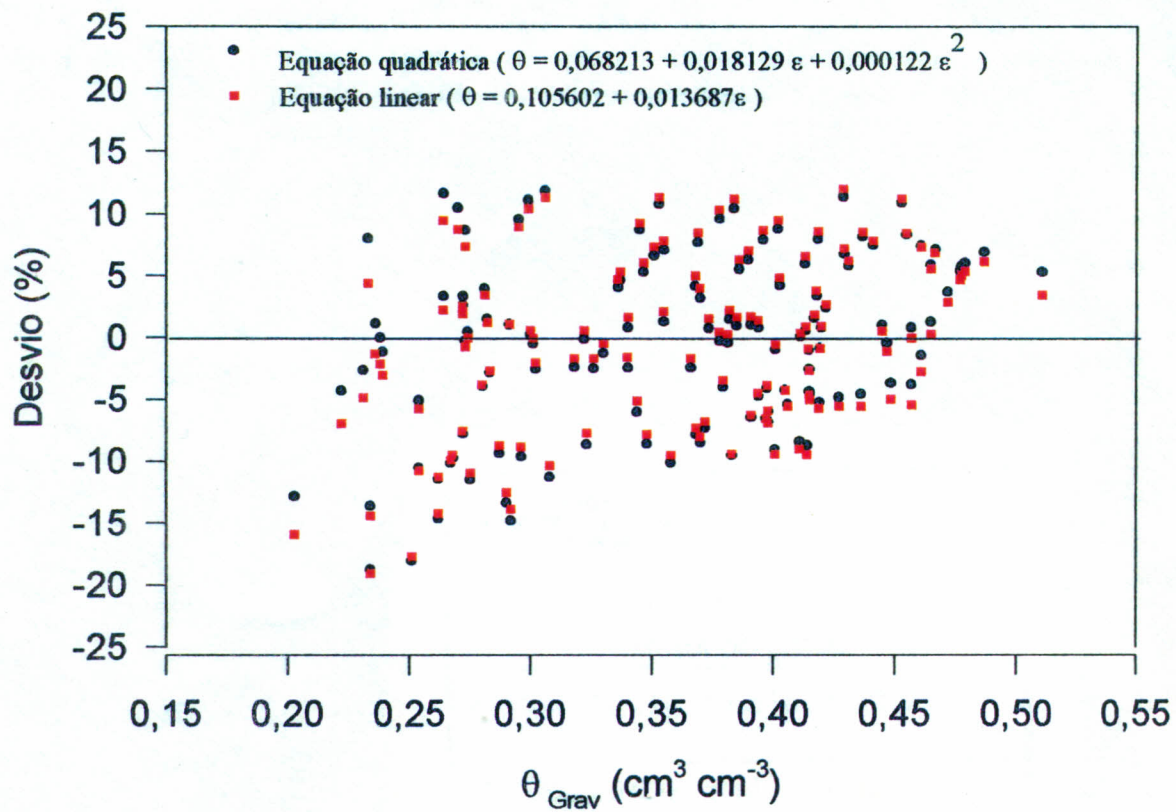


Figura 6 - Desvios em % após ajuste pela equação linear e quadrática para amostras com ρ menor que $1,1 \text{ g cm}^{-3}$

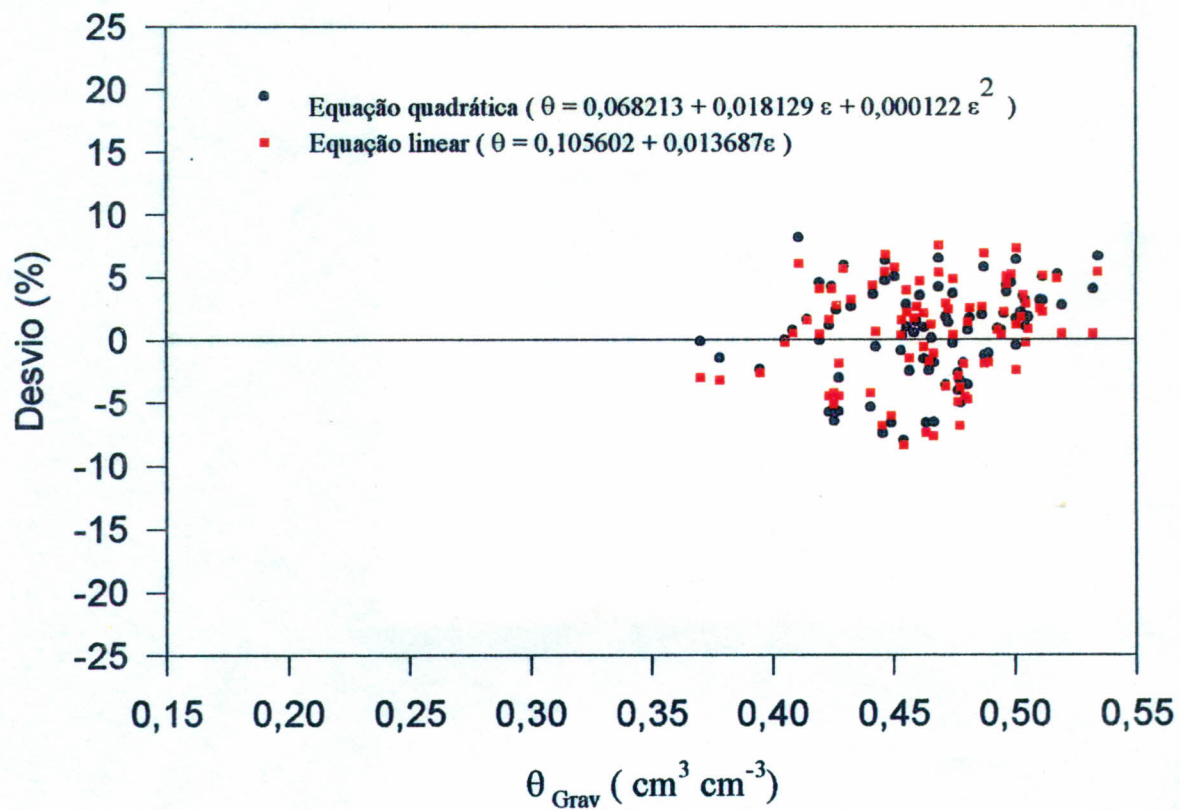


Figura 7 - Desvios em % após ajuste pelas equações linear e quadrática para amostras com ρ maior ou igual a $1,1 \text{ g cm}^{-3}$