

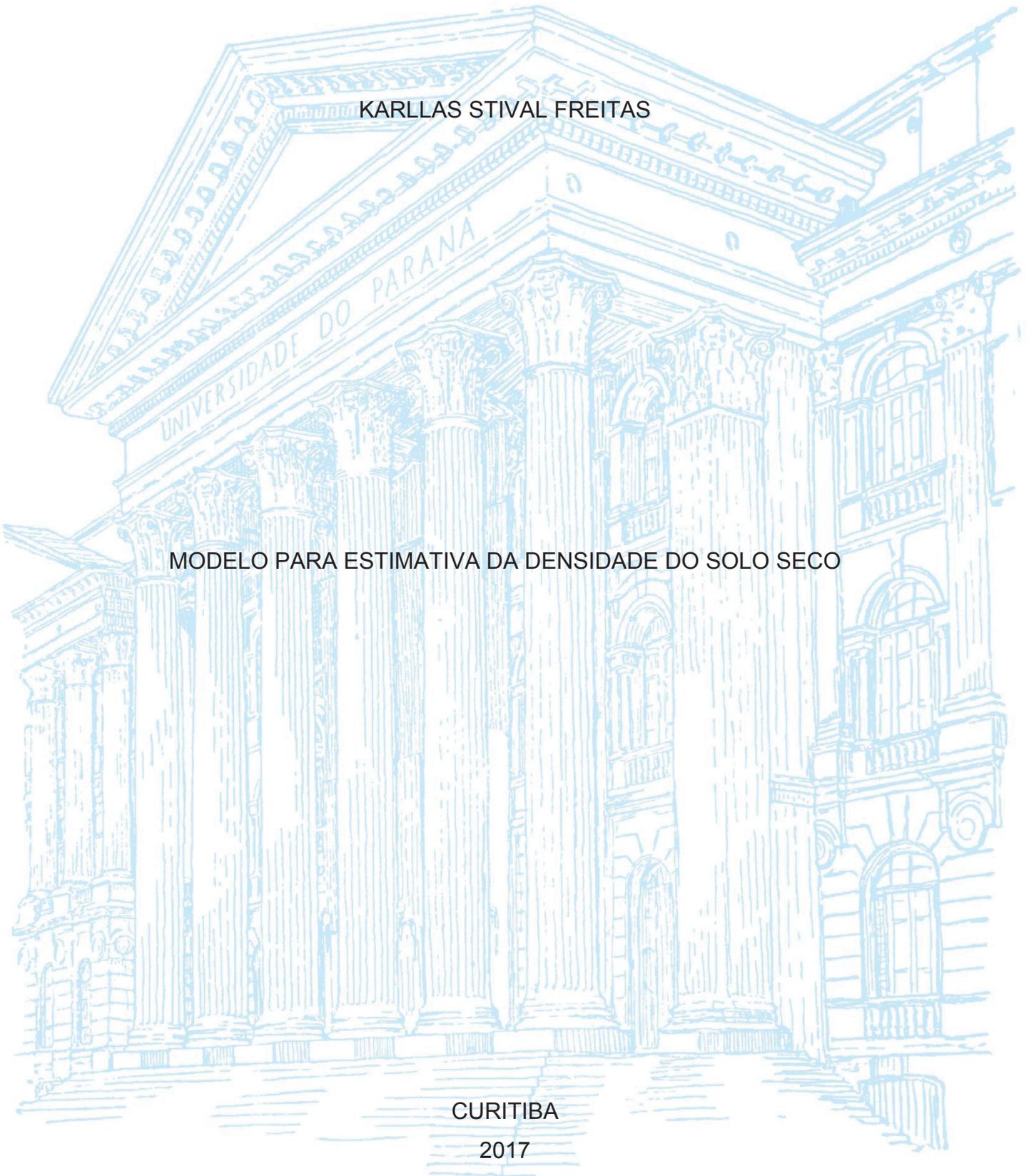
UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ

KARLLAS STIVAL FREITAS

MODELO PARA ESTIMATIVA DA DENSIDADE DO SOLO SECO

CURITIBA

2017



KARLLAS STIVAL FREITAS

MODELO PARA ESTIMATIVA DA DENSIDADE DO SOLO SECO

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo, Área de Concentração Solo e Ambiente, do Setor de Ciências Agrárias, Universidade Federal do Paraná, como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Ciência do Solo.

Orientador: Prof. Dr. Robson André Armindo

Coorientador: Prof. Dr. Luiz Fernando Pires

CURITIBA

2017

F866m

Freitas, Karllas Stival

Modelo para estimativa da densidade do solo seco / Karllas Stival Freitas. - Curitiba, 2017.

54 p.: il.

Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal do Paraná. Setor de Ciências Agrárias, Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo.

Orientador: Robson André Armindo

Coorientador: Luiz Fernando Pires

1. Solos - Densidade. 2. Solos - Análise. 3. Solos - Amostragem. 4. Solos - Umidade. I. Armindo, Robson André. II. Pires, Luiz Fernando. III. Título. IV. Universidade Federal do Paraná.

CDU 631.4

TERMO DE APROVAÇÃO



UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ
SETOR DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIA DO SOLO
Mestrado e Doutorado



PARECER

A Banca Examinadora designada para avaliar a defesa da Dissertação de Mestrado de **Karllas Stival Freitas**, intitulada: "**Modelo para estimativa da densidade do solo seco**", do Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo do Setor de Ciências Agrárias da Universidade Federal do Paraná, após análise do texto e arguição do candidato, emitem parecer pela "**APROVAÇÃO**" da referida Dissertação. A candidata atende assim um dos requisitos para a obtenção do título de **Mestre em Ciência do Solo - Área de Concentração Solo e Ambiente**.

Secretaria do Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo, em Curitiba, 02 de maio de 2017.

Prof. Dr. Robson André Armindo, Presidente

Prof. Dr. Luiz Fernando Pires, 1º. Examinador

Prof. Dr. Vitoldo Swinka Filho, 2º. Examinador

À minha avó, Gilda, pelo amor, apoio e incentivo. Aos meus pais,
Silvana e Sandro pela dedicação e paciência. Ao meu noivo, Cristian, pelo
auxílio e companheirismo.

AGRADECIMENTOS

À minha família, por acreditar em mim, me dar suporte nos momentos difíceis e por sempre me incentivar a estudar. Em especial, Gilda de Freitas, Silvana Stival de Freitas, Sandro de Freitas e Carla de Freitas.

Ao meu noivo, Cristian Mika, por sempre ser tão compreensivo e estar sempre ao meu lado, compartilhando alma e coração.

Ao meu Orientador, Robson André Armindo, pelas ideias, palavras de conforto e disposição em ajudar e despertar o melhor de mim.

Ao meu Co-orientador, Luiz Fernando Pires, por ser tão prestativo e se fazer sempre presente.

Ao professor Vitoldo Swinka Filho e professor Sebastião Ribeiro Junior pela disponibilidade em ajudar.

Ao Programa de Pós Graduação em Ciência do Solo da UFPR pela oportunidade de aprendizagem.

Aos professores que me acompanharam durante minha trajetória acadêmica, desde a graduação, compartilhando conhecimento, histórias e vida.

Aos meus amigos de vida, Luana, Mariana, Evelyn, Flávia, André Luiz, Cecília, Daniela, Bruna, Caroline, Marcieli, Briane e Eduardo. Pelas energias positivas, conversas, risadas, conselhos e bons momentos juntos.

Pela Capes, pela concessão da bolsa, tornando possível a obtenção do grau de mestre.

Por fim, gostaria de ressaltar a minha imensa gratidão por todos que já passaram e irão passar pela minha vida, que deixaram um pouco deles comigo, e também levaram consigo algo bom de mim.

*“Quero, um dia, dizer às pessoas que nada foi em vão...
Que o amor existe, que vale a pena se doar às amizades e às pessoas, que a
vida é bela sim e que eu sempre dei o melhor de mim... e que valeu a pena.”*

(Mário Quintana)

RESUMO

As propriedades do solo são parâmetros fundamentais para a determinação de práticas de manejo, tipo de cultivo, intensidade de produção, entre outros. A densidade do solo seco (ρ_b) pode auxiliar na análise da sua aptidão à produção, sendo influenciada por outros fatores do solo e do ambiente. Diversas metodologias foram desenvolvidas para determinar ou estimar ρ_b , sendo cada uma com suas vantagens e limitações. Neste trabalho, teve-se como objetivo discutir as metodologias existentes, elencando suas vantagens e desvantagens e comparando o desempenho de cada uma em diferentes cenários. Foram avaliadas amostras de Cambissolo, Latossolo e Nitossolo para determinar ρ_b sob os métodos da escavação, anel volumétrico, torrão parafinado e tomografia computadorizada. Esses resultados foram comparados com estimativas a partir de funções de pedotransferência (PTFs) desenvolvidas. A PTF avaliada com base nos valores de densidade de partículas (ρ_s) estimou valores de ρ_b concordantes com a maioria dos métodos analisados, excluindo-se apenas os da tomografia computadorizada. As PTFs avaliadas neste trabalho mostraram bom desempenho na estimativa da ρ_b de diversos solos.

Palavras-chave: densidade aparente; massa específica do solo seco; amostras irregulares, umidade do solo.

ABSTRACT

Soil properties are parameters of fundamental importance for the determination of management practices, type of crop and intensity of production, among others. Amid these properties, the dry soil bulk density (ρ_b) is especially linked to the soil health, being influenced by soil and environmental implications. Several methodologies were developed to determine or estimate ρ_b , all of them with their advantages and limitations. In this context, this study aimed to list and discuss methodologies emphasizing their advantages and disadvantages and their applicability in different scenarios. Samples taken from a Cambisol, an Oxisol and a Nitosol were evaluated to determine ρ_b using the methods of excavation, volumetric ring, paraffin sealed clod and computed tomography. After that, the results were compared with estimates using developed pedotransfer functions (PTFs). The PTF evaluated with measured values of particle density (ρ_s) estimated correlated values of ρ_b with most of the analyzed methods, excluding only computed tomography. In conclusion, the PTFs examined in this work showed good performance for estimating ρ_b of several soils.

Keywords: bulk density; specific mass of dry soil; irregular samples, soil moisture.

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO GERAL	10
2. CAPÍTULO 1. DENSIDADE DO SOLO SECO: IMPLICAÇÕES DOS MÉTODOS DE DETERMINAÇÃO E ESTIMATIVA A PARTIR DE FUNÇÕES DE PEDOTRANSFERÊNCIA	11
2.1. RESUMO	11
2.2. ABSTRACT	11
2.3. INTRODUÇÃO	11
2.4. DESENVOLVIMENTO	13
2.4.1. MÉTODOS PARA DETERMINAR A DENSIDADE DO SOLO SECO	14
2.4.1.1. Método do anel volumétrico	14
2.4.1.2. Método do torrão parafinado	14
2.4.1.3. Método da escavação	15
2.4.1.4. Métodos nucleares	15
2.4.1.5. Funções de pedotransferência	16
2.4.1.6. Vantagens e desvantagens dos métodos apresentados	17
2.5. CONCLUSÕES	18
2.6. LITERATURA CITADA	19
3. CAPÍTULO 2. ESTIMATIVA DA DENSIDADE DO SOLO SECO POR FUNÇÕES DE PEDOTRANSFERÊNCIA	22
3.3. INTRODUÇÃO	23
3.4. MATERIAL E MÉTODOS	24
3.4.1. DENSIDADE DO SOLO SECO DE AMOSTRAS INDEFORMADAS IRREGULARES	24
3.4.2. COMPARAÇÃO DO CAMBISSOLO HÁPLICO DISTRÓFICO, LATOSSOLO VERMELHO ESCURO, LATOSSOLO VERMELHO AMARELO E NITOSSOLO VERMELHO	29
3.4.3. UM CASO DE APLICAÇÃO PARA AS PTFs (EQS. 5 E 6) EXAMINADAS ...	29
3.4.4. ANÁLISE ESTATÍSTICA	30
3.5. RESULTADOS E DISCUSSÃO	30
3.5.1. DENSIDADE DO SOLO SECO DE AMOSTRAS INDEFORMADAS IRREGULARES	30
3.5.2. COMPARAÇÃO CAMBISSOLO COM LATOSSOLOS E NITOSSOLO	38
3.5.3. UM CASO DE APLICAÇÃO DO MÉTODO EXAMINADO	43
3.6. CONCLUSÕES	45
3.7. LITERATURA CITADA	45
4. CONCLUSÃO GERAL	49
5. REFERÊNCIAS	50

1. INTRODUÇÃO GERAL

O solo é um sistema complexo, formado por diferentes frações, cada uma sendo influenciada e impactada por diversos fatores. As propriedades de cada solo são resultado de um longo processo de transformações químicas e físicas, e podem ser alteradas pela ação do homem ao torná-lo um sistema agrícola (Tormena et al., 2002).

Dentre as propriedades físicas do solo, a densidade é uma das mais estudadas e monitoradas, sendo utilizada para inferir sobre o estado estrutural do solo, pois está relacionada com outras propriedades como porosidade e condutividade hidráulica, indicando também o grau de compactação do solo. Solos que apresentam valores críticos de densidade são restritivos ao crescimento radicular e, por conseguinte, à produtividade das culturas (Gonçalves et al., 2013).

A densidade é afetada por diversas práticas de manejo, pelo uso de implementos e mesmo pelo movimento da fauna edáfica ao longo do perfil do solo. O seu monitoramento é de fundamental importância na avaliação das condições físicas de crescimento radicular e de produção.

Dentre os métodos de determinação da densidade, o mais utilizado é o do anel volumétrico. Entretanto, outros métodos são existentes, tendo cada um suas vantagens e limitações, podendo gerar diferenças nos resultados. Neste contexto, o uso de funções de pedrotransferência (PTF) figura como importante alternativa no acompanhamento e monitoramento da densidade dos solos, considerando sua praticidade e menor custo.

O objetivo neste trabalho foi, no primeiro capítulo, discorrer sobre os métodos utilizados para determinação e estimativa da densidade do solo via PTFs. No segundo capítulo, objetivou-se desenvolver e avaliar o desempenho de PTFs na estimativa da densidade de amostras regulares e irregulares de solo (torrões).

-REVISÃO DE LITERATURA-

2. CAPÍTULO 1. DENSIDADE DO SOLO SECO: IMPLICAÇÕES DOS MÉTODOS DE DETERMINAÇÃO E ESTIMATIVA A PARTIR DE FUNÇÕES DE PEDOTRANSFERÊNCIA

2.1. RESUMO

A densidade do solo seco (ρ_b) é uma propriedade física desse meio poroso, associada à qualidade física, grau de compactação e estimativa do carbono orgânico, entre outros. A ρ_b é influenciada pelo manejo, textura, fauna e flora do solo estando relacionada com diversos atributos físicos do meio, como porosidade, condutividade hidráulica e retenção de água. Métodos tradicionais e nucleares como do anel volumétrico, torrão parafinado, escavação, tomografia computadorizada, sondas de superfície nêutron-gama e funções de pedotransferência têm sido utilizados na sua determinação ou estimativa. Cada metodologia apresenta vantagens e desvantagens, sendo a escolha do melhor método dependente de fatores como condições do local de amostragem, aplicabilidade, custos e extensão da área estudada.

Palavras-chave: tomografia; anel volumétrico; torrão parafinado.

2.2. ABSTRACT

Bulk density (ρ_b) is a soil physical property associated with physical quality, compaction level, organic carbon availability and others. The ρ_b can be influenced by many factors such as management, texture, and fauna. Also, it can be related to other soil physical attributes as porosity, hydraulic conductivity, and water retention. Some traditional and nuclear methods as the volumetric ring, paraffin sealed clod, excavation, pedotransfer functions, and many others, have been used to calculate or estimate the ρ_b . Each methodology presents pros and cons, so, some indicator as sampling, applicability, costs, and the extension of the studied area have to be considered in the choice of a best method.

Keywords: tomography; volumetric ring method; paraffin sealed clod.

2.3. INTRODUÇÃO

A estrutura do solo é dependente de diversos fatores como textura, composição mineralógica, matéria orgânica e arranjo das partículas e agregados com o espaço poroso. Esses fatores determinam os valores de densidade do solo ideais para o crescimento e produtividade das culturas agrícolas (Reichert et al., 2009). A densidade do solo seco (ρ_b) é caracterizada pela razão entre a

massa de sólidos e o volume de solo, refletindo indiretamente no estado de adequação das partículas, sendo assim um parâmetro revelador da estrutura do solo. Assim, a ρ_b pode ser usada como um indicador de compactação, uma vez que ela está relacionada com o volume total do solo e, conseqüentemente, com o seu volume de poros (Hernanz et al., 2000; Al-Asadi e Mouazen, 2014; Rodríguez-Lado et al., 2015).

Diversas propriedades como a porosidade total (ϕ), que é uma relação entre volume de vazios (m^{-3}) e volume total (m^{-3}), umidade e condutividade hidráulica estão relacionadas com a ρ_b (Dam et al., 2005; Reichert et al., 2009). Além disso, a densidade é uma importante propriedade, pois, com base em seus valores, torna-se possível inferir sobre o manejo e carbono do solo, bem como sobre a retenção de água (Sequeira et al., 2014; Botula et al., 2015). Conseqüentemente, o tipo de manejo do solo (plantio direto ou convencional), a distribuição de partículas do solo, a matéria orgânica, o tráfego de animais e implementos agrícolas, o crescimento de raízes e o movimento da fauna na matriz do solo podem alterar significativamente a ρ_b ao longo do tempo (Stone e Silveira, 2001; Bertol et al., 2004; Agostini et al., 2014; Ferreira et al., 2015).

De acordo com Keller e Håkansson (2010), a ρ_b é inversamente proporcional à ϕ e se relaciona com o desenvolvimento das plantas, já que valores de porosidade de aeração (ϕ_{air}) inferiores a 10% podem ser críticos ao desenvolvimento do sistema radicular. O baixo valor de ϕ_{air} , muitas vezes relacionado a alta ρ_b , é o causador da menor disponibilidade de oxigênio (Watanabe et al., 2000), resultando na redução do crescimento da planta e, conseqüentemente, na queda da produtividade.

Neste trabalho, teve-se por objetivo discutir as implicações da ρ_b e sua relação com outros atributos físicos e químicos do solo, levando em consideração seus métodos de determinação e estimativa, vantagens e desvantagens. Paralelamente, serão enfatizadas as funções de pedotransferência para sua estimativa devido as suas aplicabilidades, bem como praticidade.

2.4. DESENVOLVIMENTO

A matriz do solo tem sua origem nos processos físicos, químicos e biológicos de transformação de uma rocha. O solo é um meio complexo e multifásico, constituído das fases sólida, líquida e gasosa. A fração sólida é composta pela matéria orgânica e minerais, sendo que os últimos são subdivididos granulometricamente em areia, silte e argila. A proporção entre essas partículas de diferentes tamanhos determina a textura de um solo. Na parte porosa do solo estão presentes as fases líquida e gasosa.

A partir das relações entre área, massa e volume dessas fases torna-se possível determinar diferentes atributos físicos do solo como, por exemplo, ρ_b . A ρ_b pode ser estimada também a partir do produto entre a densidade das partículas sólidas e a fração volumétrica dessas partículas. É possível encontrar diferentes valores de ρ_b no espaço e no tempo, em consequência da textura, estrutura e outros atributos físico-químicos, bem como também pela influência do método utilizado para determiná-la ou estimá-la.

Outra forma de se obter a ρ_b é por meio das umidades volumétrica (θ ; $m^3 m^{-3}$) e gravimétrica (θ_g ; $kg kg^{-1}$) e a massa específica da água (ρ_w ; $kg m^{-3}$), Eq.(1). A umidade volumétrica pode ser obtida a partir da relação entre o volume de água contido em um volume de solo (m^{-3}). Já a umidade gravimétrica se dá pela razão entre a massa de água e massa de sólidos (m^{-3}).

$$\rho_b \approx \rho_w \frac{\theta}{\theta_g} \quad (1)$$

A Eq.(1) pode ser assumida como uma função de pedotransferência (PTF), pois nela se utilizam as variáveis θ e θ_g para a obtenção da ρ_b . Dessa maneira, a obtenção da ρ_b por essa PTF apresenta-se como uma alternativa prática e rápida.

Benites et al. (2007) analisaram 1002 amostras de solos brasileiros e encontraram um ρ_b médio de $1,36 kg dm^{-3}$. Reichardt e Timm (2012) apresentaram valores de ρ_b para solos arenosos entre $1,40$ e $1,80 kg dm^{-3}$ e, para solos argilosos entre $0,90$ e $1,60 kg dm^{-3}$. Em contrapartida, Prevedello e Armindo (2015) citam variações de $1,25$ a $1,40 kg dm^{-3}$ para solos arenosos, $1,00$

a 1,40 kg dm⁻³ para solos argilosos, 0,75 a 1,00 kg dm⁻³ para solos húmíferos e, por fim, valores entre 0,20 e 0,45 kg dm⁻³ para solos turfosos.

2.4.1. MÉTODOS PARA DETERMINAR A DENSIDADE DO SOLO SECO

Existem vários procedimentos para se determinar a ρ_b . Alguns métodos são baseados na interação da radiação e eletricidade, enquanto que em outros a ρ_b é determinada a partir da razão massa-volume. Cada um dos métodos apresenta suas vantagens e desvantagens, bem como particularidades.

2.4.1.1. Método do anel volumétrico

O método padrão e mais utilizado para determinação da ρ_b é o do anel volumétrico ou do cilindro. Ele consiste no uso de uma amostra não deformada de solo contida em um cilindro com volume conhecido, sendo, portanto, uma amostra de formato regular. A amostra é secada em estufa a 105° C, permanecendo lá até que a sua massa seja constante. Como desvantagem, durante a coleta, o solo pode ser acidentalmente compactado ou sofrer outras modificações em sua estrutura gerando valores não representativos de ρ_b (Pires et al., 2004).

Ademais, em solos altamente arenosos ou com elevada concentração de raízes e rochas, torna-se difícil à retirada de amostras não deformadas com o mesmo volume interno do cilindro. A amostragem a campo, bem como a utilização desse método, é considerada dispendiosa e trabalhosa, principalmente para camadas mais profundas do que 30 cm de profundidade (Benites et al., 2007). Brahim et al. (2012) também reforçam que a determinação de ρ_b , principalmente em levantamentos de grandes áreas, é trabalhosa, dispendiosa e tediosa.

2.4.1.2. Método do torrão parafinado

Para amostras com formato irregular e volume variável, pode-se utilizar o método do torrão parafinado. Ele consiste em impermeabilizar o agregado de solo com parafina e/ou resinas específicas e colocá-lo em recipiente com água

para medição do volume deslocado (Pires et al., 2011; Auler et al., 2017). Dessa maneira, pelo princípio de Arquimedes, encontra-se o volume da amostra descontando-se o volume de parafina utilizado a partir da massa específica da parafina e sua massa.

Esse método é recomendado para amostras muito secas, ou com presença de pedregulhos e raízes, em que seja difícil a inserção do anel volumétrico (Silva et al, 2000). A principal desvantagem desse método é que a amostra pode se quebrar durante a coleta ou no procedimento de impermeabilização.

2.4.1.3. Método da escavação

Nesta técnica, retira-se um torrão de solo e coloca-se um plástico ou qualquer outro material que se molde no orifício, decorrente da retirada do torrão. Preenche-o com um elemento de massa específica conhecida, como água, areia ou outra substância, tendo por objetivo encontrar o volume de solo que havia no local. Com o volume conhecido e com a massa de solo, retirada do orifício e secado em estufa, calcula-se a ρ_b (Lichter e Costello, 1994). Recomenda-se que a aplicação dessa prática seja realizada com a superfície do orifício devidamente em nível para que não ocorram sub ou superestimativas do volume. Diferentemente do método do anel volumétrico, essa metodologia pode ser utilizada em amostras com presença de pedregulhos, pouco coesas, com muita matéria orgânica ou em horizontes muito finos (Estrada et al., 2011).

2.4.1.4. Métodos nucleares

As técnicas mais modernas de determinação da ρ_b consistem em utilizar fontes de raios gama (ou raios X) como nas sondas de superfície nêutron-gama, nos equipamentos de atenuação de raios gama e nos tomógrafos computadorizados.

As sondas de superfície nêutron-gama medem simultaneamente a densidade e a umidade do solo de camadas superficiais até 30 cm de profundidade. Porém, essa técnica somente irá medir ρ_b .

Na técnica de atenuação de raios gama é utilizado um feixe colimado de fótons gama com energias específicas e após interação do feixe com a amostra determina-se ρ_b , conhecendo-se a intensidade dos feixes incidente e transmitido, o coeficiente de atenuação de massa e a espessura da amostra de solo.

No caso da tomografia computadorizada o feixe colimado de raios-X ou gama interage com as amostras em diferentes posições. Métodos de reconstrução são utilizados para cruzar as informações das diferentes interações (posições) do feixe com a amostra, a fim de fornecer um mapa de densidades da amostra analisada. O uso dessa técnica tem se tornado interessante na área de ciência do solo com o advento de tomógrafos desenvolvidos especificamente para análises de materiais porosos (Pires et al., 2010).

Pires et al. (2011) compararam os valores de ρ_b obtidos a partir de quatro métodos: anel volumétrico, torrão parafinado, tomografia computadorizada e sonda de superfície nêutron-gama. Segundo os autores, não houve diferenças significativas na ρ_b comparando-se os métodos do anel volumétrico e de sonda de superfície nêutron-gama, entretanto, houve diferenças quando comparados os métodos de tomografia computadorizada e do torrão parafinado. Silva et al. (2000) compararam o método do anel volumétrico e do torrão parafinado em plantio direto e convencional e encontraram baixas correlações entre os dois, com menores variações no primeiro.

Por outro lado, Fante Junior et al. (2002) encontraram valores correlacionados de densidade do solo a partir do método do torrão parafinado e da tomografia computadorizada, destacando-se o último por detalhar muito bem a estrutura e densidade ao longo de todo perfil do solo.

2.4.1.5. Funções de pedotransferência

Uma função de pedotransferência (PTF) consiste em transformar informações conhecidas em outras desconhecidas, reduzindo-se tempo e custos. As PTFs podem relacionar a densidade com outras propriedades do solo como, por exemplo, textura e matéria orgânica (Rodríguez-Lado et al., 2015).

Benites et al. (2007) testaram os modelos de pedotransferência propostos por Bernoux et al. (1998), Tomasella e Hodnett (1998) e Manrique e Jones (1991). Eles verificaram que a ρ_b de solos brasileiros pode ser encontrada

a partir de regressões multivariadas com nitrogênio, argila, soma de bases, relação carbono nitrogênio, óxido de alumínio e a soma de cálcio e magnésio. Segundo esses autores, essas variáveis explicam 70% da alteração da densidade do solo. Outro modelo que utilizava carbono orgânico, soma de bases e argila, explicou 66% da variação da densidade.

Botula et al. (2015); Sequeira et al. (2014); Nanko et al. (2014); Al-Asadi e Mouazen (2014); e Brahim et al. (2012) também desenvolveram PTFs de ρ_b em diversas regiões do mundo, utilizando algumas variáveis do solo. Keller e Hakansson (2010) encontraram baixos valores de correlação entre a ρ_b e a distribuição das partículas de areia, silte e argila. Além disso, os autores correlacionaram a ρ_b com as partículas minerais e matéria orgânica do solo ($R^2=0,81$).

Adams (1973) apresentou na Eq. (2) outra PTF de ρ_b valendo-se da porcentagem de matéria orgânica (MO; %), densidade da fração de matéria orgânica (ρ_{fo} ; kg m^{-3}) e densidade das partículas minerais (ρ_{fm} ; kg m^{-3}).

$$\rho_b = 100 / [(MO/\rho_{fo}) + (100 - MO)/\rho_{fm}] \quad (2)$$

Por outro lado, Al-Asadi e Mouazen (2014) estimaram a ρ_b a partir da Eq.(1) medindo θ com a técnica de reflectometria no domínio da frequência (FDR) e a θ_g com uma função da espectroscopia no infravermelho próximo e visível (vis-NIRS). De acordo com os autores, o método apresentou valores precisos de densidade do solo.

Por fim, Bernoux et al. (1998) afirmaram que muitos modelos de avaliação de riscos ambientais, de mudanças globais ambientais e sistemas agrícolas utilizam dados de ρ_b . Entretanto, em diversas situações, esses dados não estão disponíveis tornando-se necessário o uso de PTFs de ρ_b . Bernoux et al. (1998) ressaltam a importância de se obter precisas e exatas PTFs de ρ_b a partir do carbono orgânico, textura e pH.

2.4.1.6. Vantagens e desvantagens dos métodos apresentados

A escolha do método de determinação da ρ_b é importante para a análise estrutural e da dinâmica da água no solo, uma vez que seus valores são dependentes da metodologia escolhida. A determinação de ρ_b pode ser mais

detalhada com o uso de equipamentos tecnológicos, contudo eles podem possuir custo elevado devendo-se, assim, escolher o método com base nos atributos de cada solo, na quantidade de amostras a serem avaliadas, na disponibilidade de equipamentos e no custo da pesquisa.

Vários são os métodos de medida ou estimativa de ρ_b e cada um apresenta suas particularidades. O método do anel volumétrico é o mais conhecido e tem como vantagem a facilidade de encontrar o volume total da amostra, já que seu formato é regular. Contudo, muitas vezes, há a dificuldade da penetração do anel em solos com a presença de raízes e pedregulhos, bem como possíveis alterações de estrutura durante a coleta. No método do torrão parafinado são utilizadas amostras de formato irregular e nele podem ocorrer subestimativas do volume devido à entrada de parafina nos poros da amostra.

O método da escavação apresenta a vantagem de poder ser realizado a campo, quando for necessária a rápida obtenção de ρ_b , entretanto, isso pode ocasionar resultados imprecisos e inexatos. Nos métodos modernos de determinação de ρ_b , como na tomografia computadorizada e sonda de superfície nêutron-gama, tem-se maior precisão e exatidão. Porém, a utilização desses equipamentos é de custo elevado, sendo que ainda poucos são os equipamentos disponíveis para este fim no Brasil.

Por fim, as PTFs se fazem importantes quando é necessária a estimativa da ρ_b em grandes áreas por serem de baixo custo. A principal desvantagem é que, normalmente, as PTFs empíricas são aplicáveis somente para solos em que foram calibradas.

2.5. CONCLUSÕES

A ρ_b é um indicador da qualidade estrutural do solo sendo sua obtenção imprescindível quando se estuda a ação de processos naturais e antropogênicos nesse meio poroso. Contudo, diversos são os métodos utilizados para sua determinação, cada um com suas particularidades: (a) consumo de tempo; (b) custo; (c) precisão e (d) equipamento, tornando-se necessária uma análise criteriosa do procedimento a ser utilizado para obtenção de ρ_b . As funções de pedotransferência oferecem uma alternativa rápida e viável para a estimativa de ρ_b a partir da relação entre as umidades volumétrica e gravimétrica, bem como

a partir de outros atributos do solo, reduzindo custos e tempo laboratorial e/ou de campo.

2.6. LITERATURA CITADA

ADAMS, W. A. The effect of organic matter on the bulk and true densities of some uncultivated podzolic soils. **Journal of Soil Science**, v. 24, p. 10-17, 1973.

AGOSTINI, M. L. A.; MONTERUBBIANESI, M. G.; STUDDERT, G. A.; MAURETTE, S. Un método simple y práctico para la determinación de densidad aparente. **Ciencia Del Suelo**, v. 32, p. 171-176, 2014.

AL-ASADI, R. A.; MOUAZEN, A. M. Combining frequency domain reflectometry and visible and near infrared spectroscopy for assessment of soil bulk density. **Soil & Tillage Research**, v. 135, p. 60-70, 2014.

AULER, A.C.; PIRES, L. F.; BRINATTI, A.M.; SAAB, S. C. Densidade de agregados de solo: Uso da balança de Jolly em aulas de física experimental para educação em ciência do solo. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, v. 39, n. 1, e1506, 2017.

BENITES, V. M.; MACHADO, P. L. O. A.; FIDALGO, E. C. C.; COELHO, M. R.; MADARI, B. E. Pedotransfer functions for estimating soil bulk density from existing soil survey reports in Brazil. **Geoderma**, v. 139, p. 90-97, 2007.

BERNOUX, M.; ARROUAYS, D.; CERRI, C.; VOLKOFF, B.; JOLIVET, C. Bulk Densities of Brazilian Amazon Soils Related to Other Soil Properties. **Soil Science Society of America Journal**, v. 62, p. 743-749, 1998.

BERTOL, I.; ALBUQUERQUE, J. A.; LEITE, D.; AMARAL, A.J.; ZOLDAN JUNIOR, W. A. Propriedades físicas do solo sob preparo convencional e semeadura direta em rotação e sucessão de culturas, comparadas às do campo nativo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 28, p.155-163, 2004.

BOTULA, Y.; NEMES, A.; RANST, E.V.; MAFUKA, P.; CORNELIS, J. D. P. W. M. Hierarchical Pedotransfer Functions to Predict Bulk Density of Highly Weathered Soils in Central Africa. **Soil Science Society of America Journal**, v. 79, p. 476-486, 2015.

BRAHIM, N.; BERNOUX, M.; GALLALI, T. Pedotransfer functions to estimate soil bulk density for Northern Africa: Tunisia case. **Journal of Arid Environments**, v. 81, p. 77-83, 2012.

DAM, R. F.; MEHDI, B. B.; BURGESS, M. S. E.; MADRAMOOTOO, C. A.; MEHUYS, G. R.; CALLUM, I. R. Soil bulk density and crop yield under eleven consecutive years of corn with different tillage and residue practices in a sandy loam soil in central Canada. **Soil & Tillage Research**, v. 84, p. 41-53, 2005.

ESTRADA, M.S.; FERNÁNDEZ, J.D.; SEGUEL, O. S.; BECERRA, J. C.; SALAZAR, D.R. **Métodos de análisis físico de suelos**, 2011.

FANTE JUNIOR, L.; OLIVEIRA, J. C. M.; BASSOI, L.H.; VAZ, C. M. P.; MACEDO, A.; BACCHI, O. O. S.; REICHARDT, K.; CAVALCANTI, A.C.; SILVA, F. H. B. B. Tomografia computadorizada na avaliação da densidade de um solo do semiárido brasileiro. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 26, p. 835-842, 2002.

FERREIRA, T.R.; BORGES, J. A. R.; PIRES, L.F. Representative elementary area for soil bulk density measurements of samples collected in volumetric rings by CT image analyses. **Soil & Tillage Research**, v. 152, p. 74-84, 2015.

HERNANZ, J.L.; PEIXOTO, H.; CERISOLA, C.; SÁNCHEZ-GIRÓN, V. An empirical model to predict soil bulk density profiles in field conditions using penetration resistance, moisture content and soil depth. **Journal of Terramechanics**, v. 37, p. 167-184, 2000.

KELLER, T.; HÅKANSSON, I. Estimation of reference bulk density from soil particle size distribution and soil organic matter content. **Geoderma**, v. 154, p. 398-406, 2010.

LICHTER, J.M.; COSTELLO, L.R. An evaluation of volume excavation and core sampling techniques for measuring soil bulk density. **Journal of Arboriculture**, v. 20, p. 160-164, 1994.

MANRIQUE, L.A.; JONES, C. A. Bulk density of soils in relation to soil physical and chemical properties. **Soil Science Society Journal**, v. 55, p. 476-481, 1991.

NANKO, K.; UGAWA, S.; HASHIMOTO, S.; IMAYA, A.; KOBAYASHI, M.; SAKAI, H.; ISHIZUKA, S.; MIURA, S.; TANAKA, N.; TAKAHASHI, M.; KANEKO, S. A pedotransfer function for estimating bulk density of forest soil in Japan affected by volcanic ash. **Geoderma**, v. 213, p. 36-45, 2014.

PIRES, L. F.; BACCHI, O. O. S.; REICHARDT, K. Damage to soil physical properties caused by soil sampler devices assessed by gamma ray computed tomography. **Australian Journal of Soil Research**, v. 42, p. 857-863, 2004.

PIRES, L. F.; BACCHI, O. O. S.; REICHARDT, K. Twenty-five years of computed tomography in soil physics: A literature review of the Brazilian contribution. **Soil & Tillage Research**, v. 110, p. 197-210, 2010.

PIRES, L. F.; ROSA, J. A.; TIMM, L. C. Comparação de métodos de medida da densidade do solo. **Acta Scientiarum Agronomy**, v. 33, p. 161-170, 2011.

PREVEDELLO, C. L.; ARMINDO, R. A. **Física do Solo com Problemas Resolvidos**. 2 ed. Curitiba: Celso Luiz Prevedello; 2015.

REICHARDT, K.; TIMM, L. C. **Solo, planta e atmosfera: conceitos, processos e aplicações**. 2 ed. Barueri: Manole; 2012.

REICHERT, J. M.; SUZUKI, L. E. A. S. S.; REINERT, D. J.; HORN, R.; HÅKANSSON, I. Reference bulk density and critical degree-of-compactness for no-till crop production in subtropical highly weathered soils. **Soil & Tillage Research**, v. 102, p. 242-254, 2009.

RODRÍGUEZ-LADO, L.; RIAL, M.; TABOADA, T.; CORTIZAS, A. M. A. Pedotransfer function to map soil bulk density from limited data. **Procedia Environmental Sciences**, v. 27, p. 45-48, 2015.

SEQUEIRA, C. H.; WILLS, S. A.; SEYBOLD, C.A.; WEST, L. T. Predicting soil bulk density for incomplete databases. **Geoderma**, v. 213, p. 64-73, 2014.

SILVA, V. R.; REINERT, D. J.; REICHERT, J. M. Comparação entre os métodos do cilindro e do torrão na determinação da porosidade e da densidade do solo. **Ciência Rural**, v. 30, p. 1065-1068, 2000.

STONE, L. F.; SILVEIRA, P. M. Efeitos do sistema de preparo e da rotação de culturas na porosidade e densidade do solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 25, p. 395-401, 2001.

TOMASELLA, J.; HODNETT, M. G. Estimating soil water retention characteristics from limited data in Brazilian Amazonia. **Soil Science**, v. 163, p. 190-202, 1998.

WATANABE, S. H.; TORMENA, C. A.; ARAUJO, M. A.; GONÇALVES, A. C. A.; SILVA, A. P.; PINTRO, J. C.; COSTA, A. C. S.; VIDIGAL FILHO, P. S. Resistência do solo à penetração e porosidade de aeração de um Latossolo vermelho distrófico sob plantio direto por dois anos. **Acta Scientiarum**, v. 22, p. 1055-1060, 2000.

3. CAPÍTULO 2. ESTIMATIVA DA DENSIDADE DO SOLO SECO POR FUNÇÕES DE PEDOTRANSFERÊNCIA

3.1. RESUMO

Determinar a densidade do solo seco (ρ_b) é uma tarefa difícil e onerosa quando grandes áreas e amostras com formatos irregulares, com presença de raízes e pedregulhos são envolvidas. O uso de funções de pedotransferência (PTF) é uma alternativa para superar essas dificuldades. Neste trabalho foram propostas e avaliadas três PTFs visando estimar ρ_b de amostras irregulares de um Cambissolo, Latossolo e Nitossolo. Os resultados das PTFs foram comparados com aqueles obtidos por outros métodos de medida (método da escavação, anel volumétrico, torrão parafinado e tomografia computadorizada). O volume total das amostras foi estimado a partir de PTFs em que se somava o volume de poros e o volume de sólidos medido, ou estimado, sendo corrigido por um coeficiente de expansão de poros. A PTF avaliada com valores medidos de densidade de partículas (ρ_s) estimou valores de ρ_b concordantes com a maioria dos métodos analisados, excluindo-se apenas a tomografia computadorizada. A PTF avaliada com o valor adotado de $2,65 \text{ kg dm}^{-3}$ de ρ_s apresentou maior correlação com outros métodos. O coeficiente de expansão de poros mostrou-se como uma variável importante para corrigir o volume total do solo (V_t) em condição de saturação. Dessa forma, as PTFs examinadas nesse trabalho foram eficientes na determinação da ρ_b de amostras irregulares de solo.

Palavras-chave: massa específica do solo seco; amostras irregulares; densidade aparente; umidade do solo.

3.2. ABSTRACT

The soil bulk density (ρ_b) determination is a hard task when big areas with uneven samples are involved. Based on it, the use of pedotransfer functions (PTFs) can help on the process of ρ_b estimation. This paper examined three PTFs in order to estimate the ρ_b in uneven samples in a Cambisol, a Latosol and a Nitosol, and then comparing their results to the results obtained with other methods (excavation method, volumetric ring, sealed clod, and tomography). The total sample volume was estimated by the PTFs, which calculate this volume by the sum of the volume of the solids and pore, using a pore expansion coefficient to correct it. Both examined PTFs presented ρ_b values concordant with the most of the analyzed data, excluding only the tomography method. The evaluated PTF, with the solid density value of $2,65 \text{ kg dm}^{-3}$ presented the best correlation with the other methods. The pore expansion coefficient shows up as an interesting variable for correcting the total soil volume in saturated condition. Thus, the examined PTFs were efficient in the bulk PTF estimation, presenting itself as a good alternative for uneven samples.

Keywords: Specific soil mass; irregular samples; total volume; soil moisture.

3.3. INTRODUÇÃO

A densidade do solo seco (ρ_b) é entendida pela relação entre a massa de solo seco que ocupa um determinado volume. A ρ_b é considerada um dos parâmetros mais utilizados para analisar a estrutura do solo, sendo um indicador de compactação por estar relacionada com o volume total do solo e, conseqüentemente, com o seu volume de poros (Hernanz et al., 2000). Infelizmente, a coleta de amostras para determinação da ρ_b para grandes profundidades é difícil e trabalhosa, assim como determinar o volume total de amostras de formato irregular é complexo, quando comparado com uma amostra que tem formato geométrico definido. Ademais, mesmo na superfície do solo, a amostragem representativa em áreas heterogêneas e extensas pode ser onerosa. Com isso, alternativas para estimativa de ρ_b , como as Funções de Pedotransferência (PTFs), fazem-se necessárias (Pádua et al., 2015).

Minasny e Hartemink (2011) descreveram que as PTFs são alternativas práticas e simples para estimar atributos do solo, quando suas determinações são trabalhosas e morosas. Além disso, os autores citam que elas podem ser utilizadas apenas com o objetivo de estimar atributos do solo (*i*) ou de facilitar a tomada de decisões em sistemas de manejo com PTFs mais complexas (*ii*).

As PTFs vêm sendo amplamente utilizadas na literatura para estimar a ρ_b (Adams, 1973; Al-Asadi e Mouazen, 2014; Barros e Fearnside, 2015; Benites et al., 2007; Bernoux et al., 1998; Botula et al., 2015; Brahim et al., 2012; Casanova et al., 2016; Gomes, 2014; Hernanz et al., 2000; Keller e Håkansson, 2010; Marcolin e Klein, 2011; Nanko et al., 2014; Nasri et al., 2015; Pádua et al., 2015; Rodríguez-Lado et al., 2015; Sequeira et al., 2014; Suuster et al., 2011; Xiangsheng et al., 2016). Apesar de elas serem uma opção para estimar a ρ_b , Barros e Fearnside (2015) ressaltam que a amostragem a campo sempre deve ser considerada, já que as PTFs podem apresentar variáveis complexas e com grande variabilidade espacial.

Devido a hipótese de que a ρ_b de amostras irregulares pode ser fisicamente estimada com o uso de outros atributos, objetivou-se neste trabalho examinar PTFs para sua estimativa, comparando-as com os resultados obtidos com outros métodos de medida (método da escavação, anel volumétrico, torrão parafinado e tomografia computadorizada).

3.4. MATERIAL E MÉTODOS

3.4.1. DENSIDADE DO SOLO SECO DE AMOSTRAS INDEFORMADAS IRREGULARES

Para determinação de ρ_b foram coletados 70 torrões na região de Curitiba (PR), entre coordenadas geográficas 25°22' latitude sul e 49°07' longitude oeste, em um Cambissolo Háplico Distrófico (CHD) de classe textural muito argilosa. As coletas das amostras foram realizadas sempre em local nivelado. Já em Piracicaba-SP, coordenadas 22°04' latitude sul e 47°38' longitude oeste, foram coletadas, em anéis volumétricos, 6 amostras de um Latossolo Vermelho Escuro (LVE), 6 amostras de um Latossolo Vermelho-Amarelo (LVA) e 6 amostras de um Nitossolo Vermelho (NV) com a classificação textural apresentada na Tabela 1. As 18 amostras coletadas em Piracicaba-SP foram obtidas pelo método do anel volumétrico (VRM), proposto por Blake e Hartge (1986).

Para o Cambissolo, o primeiro método usado para a determinação da ρ_b foi o da escavação retirando-se torrões de orifícios escavados. Um plástico filme para recobrir as paredes dos orifícios foi utilizado, acomodando-o bem para seu total preenchimento com água, valendo-se de uma proveta e uma seringa para “ajustes finos”. Assim, mediu-se o volume de água utilizado em cada orifício e, conseqüentemente, o volume do torrão, descontando-se o volume do plástico filme (calculado pela razão entre a sua massa e massa específica). Todos os torrões foram saturados e secos ao ar quatro vezes, com a finalidade de permanecerem geometricamente estáveis.

No segundo método, para o CHD, LVA, LVE, NV, estimou-se a ρ_b por uma PTF baseada na relação física entre as umidades volumétrica (θ) e gravimétrica (θ_g), apresentada na Eq.(1).

$$\rho_b \approx (\theta/\theta_g)\rho_w \quad (1)$$

em que ρ_b é a densidade do solo seco (kg dm^{-3}), θ é a umidade volumétrica ($\text{dm}^3 \text{dm}^{-3}$), ρ_w é a massa específica da água (kg dm^{-3}) e θ_g a umidade gravimétrica (kg kg^{-1}).

Tabela 1 - Classificação, tipo, e textura das amostras de solo do Cambissolo, Latossolos e Nitossolo.

Solo		Tipo	Areia		Silte		Argila		Número amostras	Local de Coleta	Parafina	Métodos	
Classificação	Sigla		kg	kg ⁻¹	kg	kg ⁻¹	Eq.(5) e Eq.(6)	Tomografia					
Cambissolo Hápico Distrófico	CHD	Muito argilosa	0,25	0,06	0,69	0,70	Curitiba	Sim	24 amostras				
Latossolo Vermelho Escuro	LVE	Argilosa	0,26	0,26	0,48	6	Piracicaba	Sim	Todas				
Latossolo Vermelho Amarelo	LVA	Franco argilo arenoso	0,66	0,06	0,28	6	Piracicaba	Sim	Todas				
Nitossolo Vermelho	NV	Argilosa	0,24	0,33	0,43	6	Piracicaba	Sim	Todas				

Para a determinação das umidades θ e θ_g as amostras coletadas permaneceram em bandeja até que estivessem saturadas por capilaridade. A saturação foi atingida quando a variação da massa úmida das amostras, depois de longos tempos em saturação capilar, tornou-se desprezível. Posteriormente, a massa das amostras foi medida durante vários tempos de secagem ao ar (Figura 1).

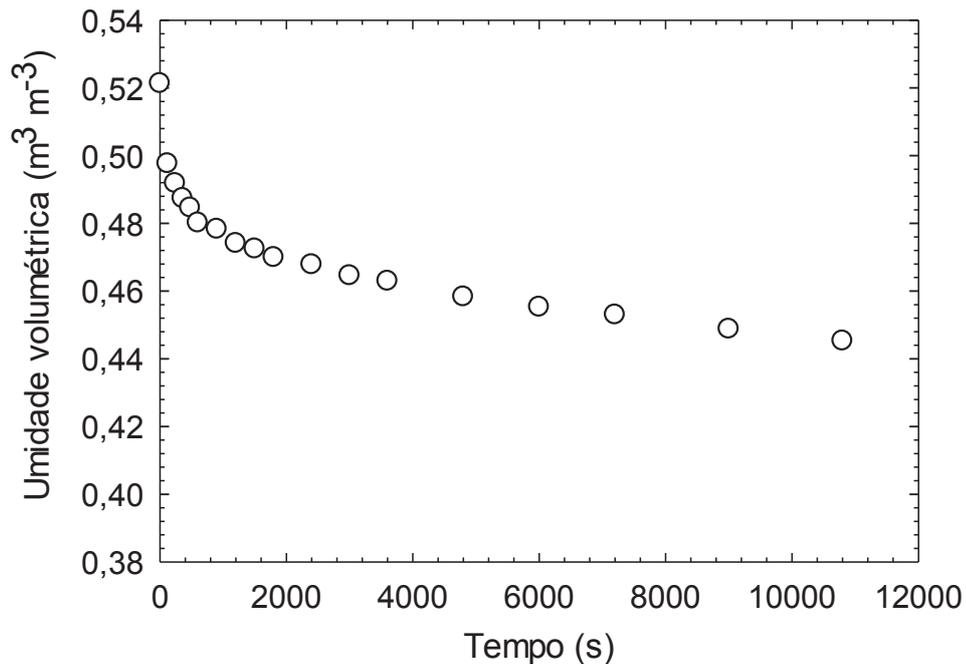


Figura 1 - Redução da umidade volumétrica de uma amostra de torrão saturado durante seu tempo de drenagem.

No terceiro método, a ρ_b foi determinada pela tomografia computadorizada. O método de tomografia do CHD foi diferente do realizado no LVA, LVE, NV. Para o CHD, dos 70 torrões coletados, escolheram-se 24 torrões e se determinou a ρ_b medindo-se o V_t das amostras pela técnica de tomografia de raios-X. O tomógrafo foi ajustado com tensão de 70 kV e corrente elétrica entre 100 μ A e 1 mA, dependendo da fonte de radiação utilizada. A sensibilidade do detector foi de 0,25 ou 0,5 pF e o tempo de exposição variou de 1 a 4 s, com tempo de envio de 2,5 s. Foram obtidas 180 radiografias de cada amostra, rotacionando-se cada uma por um passo angular de 1°. Com as imagens de resolução de 2048 x 2048 pixels, fez-se a aquisição de fatias de quantidade variável, dependendo de cada amostra, para a reconstrução 2D e 3D utilizando-se o *software* “CT 2.0.0.51 Tomografia Computadorizada” que fornece os valores do V_t e da área superficial de cada torrão (A_s). Com isso, os cálculos da ρ_b

e das superfícies específicas gravimétricas (S_g) e volumétricas (S_v) de cada amostra foram realizados. A S_g foi encontrada a partir da divisão entre a A_s do torrão, fornecido pelo *software*, e a m_s . Contudo, a S_v foi calculada pela razão entre A_s e o V_t .

O método da tomografia computadorizada, utilizado nas amostras de LVA, LVE e NV foi feito por meio de atenuação de raios gama, estimando-se ρ_b , a partir de uma fatia 2D, como descrito por Pires (2006). A ρ_b foi calculada a partir da $\rho_b = 1/\mu_s^* (TU/\beta - \mu_w^* \cdot \rho_w \cdot \theta_g)$ em que TU são as unidades tomográficas, β é o coeficiente de correlação entre o coeficiente de atenuação linear e TU (dm^{-1}) e μ_s^* e μ_w^* são coeficientes de atenuação do solo e da massa de água.

O quarto método examinado foi o do torrão parafinado, utilizando-se de todas as amostras coletadas de CHD, LVE, LVA e NV. Depois dos torrões serem impermeabilizados com parafina líquida aquecida a 60 °C, mediou-se o V_t de cada torrão + parafina, colocando-os em proveta, de 37 mm de diâmetro, para aferição do volume de água deslocado. Cuidadosamente, a parafina foi retirada e a sua massa foi medida e, com sua massa específica, calculou-se o volume de parafina utilizado, encontrando-se por diferença o volume do torrão. Assim, a ρ_b foi determinada pela razão entre a m_s e o V_t do torrão.

Depois de retirada a parafina, os torrões foram levados à estufa em 105 °C para determinação de ρ_b pelo quinto método, uma PTF chamada de método proposto medido. Neste método, o V_t do torrão foi calculado somando-se os volumes de sólidos (V_s), água (V_w) e ar (V_{air}) presentes em cada torrão. Em saturação, o volume de poros contendo ar pode ser desprezado, dessa forma, o V_t do torrão foi calculado pela soma do V_s e de poros (V_p), sendo V_p tomado como o volume de água na condição de saturação (V_{w-sat}), $V_p = V_{w-sat}$. O V_s foi determinado pela metodologia do balão volumétrico de Flint e Flint (2002), enquanto que V_{w-sat} foi calculado pela diferença entre a massa do torrão saturado (m_{t-sat}) e a massa de sólidos do torrão seco (m_s), admitindo-se a densidade relativa da água unitária, sendo assim ρ_b reescrita por Eq.(2):

$$\rho_b = \frac{m_s}{V_{w-sat} + V_s} \quad (2)$$

O sexto e último método proposto foi uma derivação do anterior, também uma PTF, chamado de método proposto estimado. A determinação de ρ_b foi realizada em acordo com o que foi descrito anteriormente no quinto método. Entretanto, ao invés

de medido, V_s foi estimado assumindo-se a densidade média das partículas ($\rho_s=2,65$ kg dm⁻³), $V_s=m_s/\rho_s = m_s /2,65$.

No quinto e no sexto métodos (Eq.5 e Eq.6), assumindo-se que as argilas apresentam processos expansivos, calculou-se um coeficiente de expansão dos poros (cp) para corrigir o volume total estimado. O cp foi estimado a partir da relação entre a fração volumétrica de água medida na fase úmida em saturação ($\theta_s=V_{w-sat}/V_t$) e a fração volumétrica na fase seca ($V_{p-dried}$), porosidade total do solo ($\phi=1-\rho_b/\rho_s$), $cp=\theta_s/\phi$. Sempre que houver dilatação dos poros preenchidos por água, cp será maior que 1 sendo, nesse caso, o volume de água na saturação maior que o volume de poros quando obtidos em condições de solo seco ($\theta\approx 0$). Entretanto, se $cp<1$ a saturação plena não foi atingida, devido à presença de poros oclusos na amostra, não ocorrendo assim à expansão ou dilatação dos poros, ou seja, $\theta_s<\phi$. Quando $V_{w-sat} \neq V_{p-dried}$, na Eq.(2) deve ser introduzido um erro (δ) obtendo-se a Eq.(3).

$$\rho_b = \frac{m_s}{V_{w-sat} + V_s} \pm \delta \quad (3)$$

Para minimizar esse erro, o termo cp foi, portanto, introduzido na Eq.(3), chegando-se a Eq.(4), a partir da correção do V_{w-sat} .

$$\rho_b = \frac{m_s}{(V_{w-sat} / cp) + V_s} \quad (4)$$

em que um valor representativo de cp será encontrado para diminuir os desvios existentes, para cada um dos tipos de solo. Uma vez que o V_{w-sat} é determinado por $\rho_w(m_{w-sat} - m_s)$, e $V_s = m_s/\rho_s$, chega-se a Eq.(5) avaliada como quinto método.

$$\rho_b = \frac{m_s}{\frac{\rho_w(m_{t-sat} - m_s)}{cp} + \frac{m_s}{\rho_s}} \quad (5)$$

Já no sexto método, a Eq. (5) aplicada foi simplificada assumindo-se $\rho_s=2,65$ kg dm⁻³ e $\rho_w=1,00$ kg dm⁻³, obtendo-se a Eq.(6), sendo testada para 50 amostras coletadas em anel volumétrico, com o objetivo de validar o método.

$$\rho_b = \frac{m_s}{\frac{m_{t-sat} - m_s}{c_p} + \frac{m_s}{2,65}} \quad (6)$$

3.4.2. COMPARAÇÃO DO CAMBISSOLO HÁPLICO DISTRÓFICO, LATOSSOLO VERMELHO ESCURO, LATOSSOLO VERMELHO AMARELO E NITOSSOLO VERMELHO

Um total de 88 amostras foi coletado nas duas localidades, fazendo-se uma matriz de correlação entre todos os métodos examinados. Apenas os métodos da escavação e anel volumétrico foram excluídos da análise por corresponderem a distintas metodologias de coleta, não podendo, portanto, serem comparadas entre si. Além da matriz de correlação, todos os métodos foram comparados com o método do torrão parafinado, considerado padrão nesse trabalho, por meio de regressão linear. As regressões lineares foram apresentadas em retas 1:1 para a comparação dos resultados.

3.4.3. UM CASO DE APLICAÇÃO PARA AS PTFS (EQS. 5 E 6) EXAMINADAS

A curva de retenção da água no solo (SWRC) é uma função hidráulica que relaciona a tensão matricial (h) com a umidade do solo. Vários são os métodos para sua obtenção, sendo um deles o da psicrometria utilizando o Decagon WP4C Water Potential Meter (Decagon Devices, Inc, Pullman, WA). Nesse equipamento, o potencial matricial da água da amostra é medido a partir da água contida na mesma, que condensa e embaça o espelho do equipamento (Decagon, 2015).

A cápsula com o solo é colocada no equipamento e permanece até que seja atingido o equilíbrio com o vapor da câmara do WP4. Com isso, é possível encontrar a umidade relativa por meio do embaçamento do espelho resfriado. O espelho presente na câmara é resfriado até o ponto de orvalho, de maneira que a água na amostra se condense (Tuller e Or, 2005). Quando o ponto de orvalho é obtido, medem-

se as temperaturas do espelho e da amostra, permitindo que o equipamento forneça os valores de potenciais matriciais no intervalo de $-0,1$ MPa até -300 MPa.

Como no psicrômetro utilizam-se amostras deformadas para determinação da SWRC, muitos trabalhos descrevem a SWRC na relação $\theta_g \times h$ (Carducci et al., 2011; Klein et al., 2010; Tuller e Or, 2005). Para a aplicação neste estudo, modelou-se um torrão com o uso de um pincel fino para o preenchimento da cápsula do psicrômetro tendo-se, portanto, uma amostra não deformada para a obtenção dos pontos da SWRC na relação $\theta \times h$. Com a modelagem do torrão com o pincel, garantiu-se que a amostra preencheu toda a cápsula do psicrômetro para adequado funcionamento do equipamento. De posse dos dados, plotaram-se os pontos da SWRCs nas relações $\theta_g \times h$ e $\theta \times h$, determinando θ pelos diferentes métodos de determinação de ρ_b , e estimaram-se os parâmetros da equação de van Genuchten (1980).

3.4.4. ANÁLISE ESTATÍSTICA

A análise dos resultados foi realizada por retas de comparação 1:1 e por validação cruzada entre os dados medidos e estimados pelas seis metodologias avaliadas. Assim, verificaram-se os erros aleatórios (correlação de Pearson, r) e sistemáticos por meio da raiz quadrada do erro médio (RMSE), $RMSE = [\sum(X_i - Y_i)^2/n]^{0,5}$, e do erro médio absoluto (MAE), $MAE = \sum|X_i - Y_i|/n$, sendo X_i o i -ésimo valor observado, Y_i o i -ésimo valor estimado e n o número de amostras. Quanto menor forem RMSE e MAE, maior é a exatidão dos métodos avaliados, ao passo que quanto maior for r , maior é a precisão dos resultados gerados por esses métodos.

3.5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.5.1. DENSIDADE DO SOLO SECO DE AMOSTRAS INDEFORMADAS IRREGULARES

Na Figura 2 observam-se os valores de ρ_b a partir de seis métodos avaliados: torrão parafinado, escavação, método proposto medido (Eq.5), estimado (Eq.6), anel volumétrico e tomografia computadorizada. Para o Cambissolo, os valores do torrão parafinado, Eq.(5) e Eq.(6) seguiram tendências semelhantes, diferentemente dos

valores do método da escavação que foram discrepantes dos outros métodos de análise em alguns pontos amostrais. Os maiores e menores valores encontrados no método da escavação podem ser resultado da dificuldade de medição do V_t do torrão a campo. Pois mesmo em pontos onde o solo é nivelado, é difícil preencher exatamente a forma do orifício com água e admitir que o V_t do torrão retirado tenha exatamente o volume do orifício modelado pelo plástico filme. Assim, super ou subestimativas de V_t podem ocorrer, afetando a obtenção de valores representativos de ρ_b . Entretanto, o método pode ser vantajoso em amostras muito desagregadas, como as de solos arenosos ou com alta densidade de raízes (Estrada et al., 2011).

Para os Latossolos e o Nitossolo (LVE, LVA, NV) o método do torrão parafinado, superestimou os valores de ρ_b em relação ao método da tomografia e do anel volumétrico, enquanto que a tomografia apresentou os menores valores de ρ_b (Figura 2). Apesar dessas diferenças, os métodos do torrão parafinado, anel volumétrico, Eq.(5) e Eq.(6) apresentaram valores de ρ_b concordantes em quase todas as amostras. Não foi avaliado o método da escavação para esses tipos de solo.

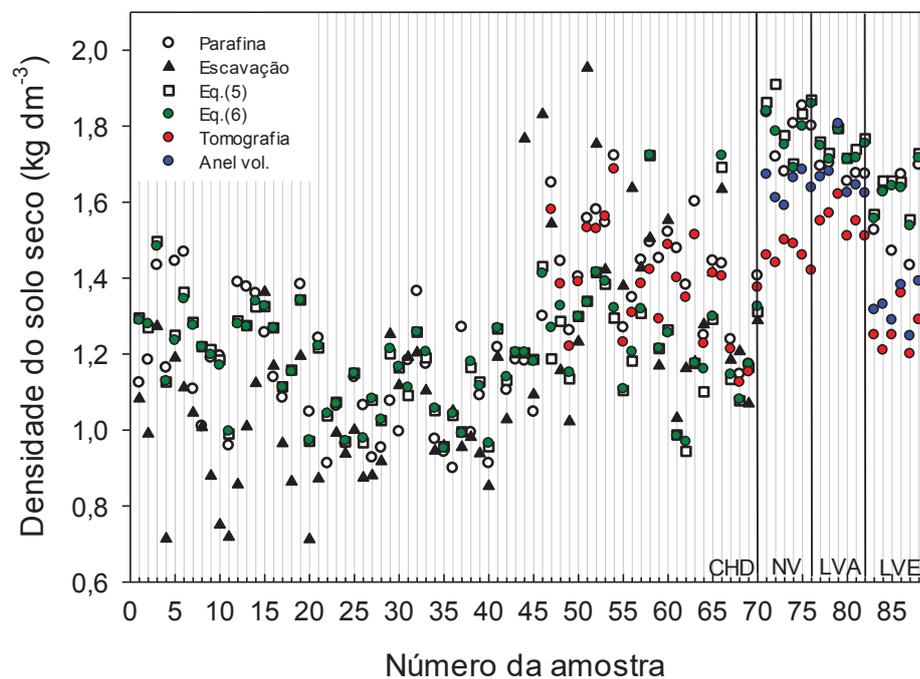


Figura 2 - Valores de densidade do solo seco avaliados para cada ponto amostrado, utilizando os métodos do torrão parafinado, escavação, Eq.(5), Eq.(6), tomografia e anel volumétrico.

A partir da amostra 46 até a amostra 70 (Figura 2), tem-se a comparação dos resultados do método do torrão parafinado, escavação, Eq.(5) e Eq.(6) com o método da tomografia computadorizada para os Cambissolos (CHD). Na maioria dos pontos observados, os valores obtidos pela Eq.(5) e Eq.(6) subestimaram os valores de ρ_b em relação ao método do torrão parafinado e ao da tomografia, conseqüentemente pelos maiores valores de V_t encontrados nessas metodologias. Isso pode ter ocorrido, pois normalmente o V_t encontrado no método do torrão parafinado é menor do que em outros métodos, já que ele não considera o espaço poroso externo ao torrão, bem como podem ocorrer possíveis entradas de parafina no espaço poroso interno do torrão ou eventuais perdas de solo (Pires et al., 2011).

Já a tomografia para o Cambissolo, a partir da amostra 46 até a 70, também apresentou valores de ρ_b maiores quando comparados aos métodos da Eq.(5) e Eq.(6), e um $r=0,407$ (Tabela 2) em relação a Eq.(5). Isso pode ter ocorrido, pois no método da tomografia, determinou-se o V_t do torrão, sendo ρ_b calculada pela relação entre m_s e V_t . É válido lembrar que é impossível a obtenção de um volume bem definido do torrão devido à resolução do sistema tomográfico. A escolha dos filtros também pode afetar a qualidade dos resultados obtidos em virtude dos valores de ρ_b e a parafina utilizada na impermeabilização, sendo uma possível explicação para os resultados obtidos. A ρ_b também pode ser obtida pela tomografia a partir das unidades tomográficas, embora esse não tenha sido o procedimento adotado nesse caso.

A comparação do método da escavação, anel volumétrico, Eq.(5), Eq.(6) e tomografia com o método do torrão parafinado estão presentes na Figura 3. Percebe-se que os valores de ρ_b estimados pela Eq.(5) e Eq.(6) formam uma nuvem de pontos próxima à reta 1:1 encontrada para ρ_b do torrão parafinado. O mesmo é observado para o método da tomografia. Já o método da escavação apresentou alguns pontos mais distantes da linha de tendência central, enquanto que o método do anel volumétrico e da tomografia apresentaram valores que ficaram abaixo da reta 1:1.

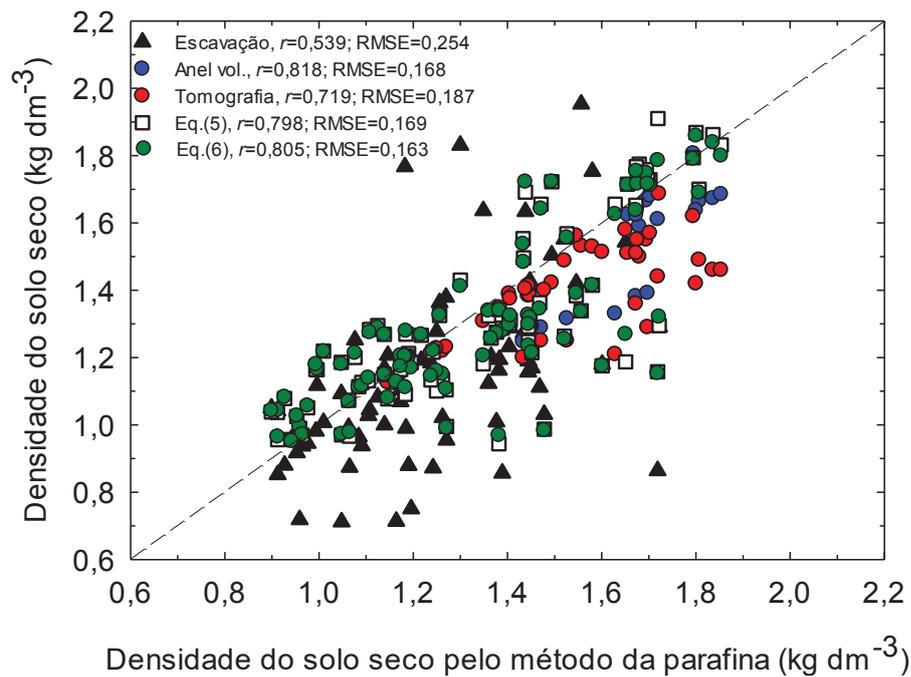


Figura 3 - Comparação dos métodos avaliados com o método de torrão parafinado.

Tem-se na Figura 4A, para uma amostra de Cambissolo a reconstrução 2D, em escala de cinza, de uma fatia de uma das amostras estudadas, ao passo que na Figura 4B é apresentada a reconstrução em 3D. Na imagem 2D, as bordas possuem tons de cinza mais escuros, indicando maiores valores de ρ_b , ao passo que as regiões mais claras, localizadas no centro da amostra, representam menores valores. As maiores ρ_b encontradas na parte externa são, possivelmente, resultado de alterações que ocorreram no momento da coleta do torrão. Isso se deve à compactação que eventualmente acontece durante o manuseio das ferramentas usadas na retirada. Pires et al. (2004) analisaram o impacto do uso de diferentes ferramentas no momento da coleta do solo. Eles concluíram que anéis volumétricos utilizados durante a coleta, alteram os valores de ρ_b .

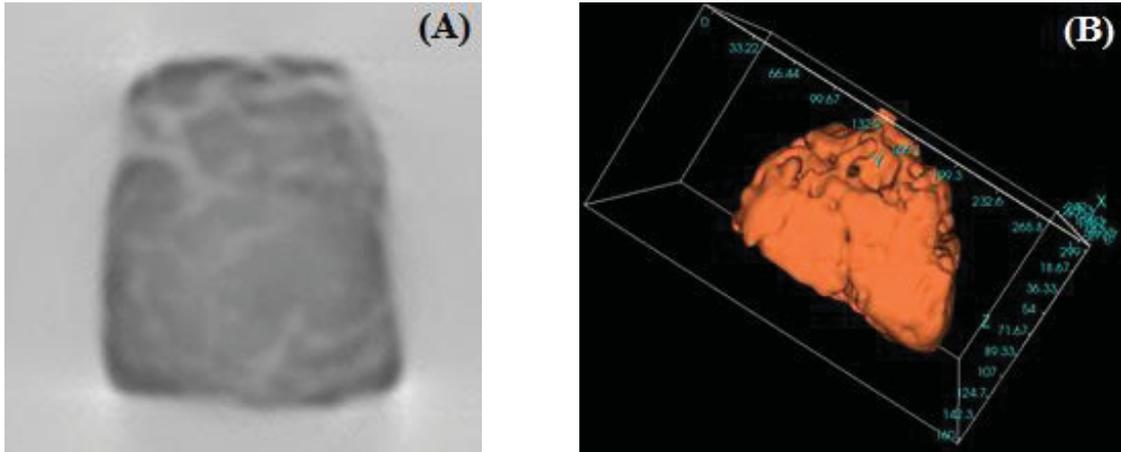


Figura 4 - Imagens obtidas a partir do método da tomografia, que fornecem reconstrução 2D, em que as áreas escuras representam os maiores valores de densidade do solo seco e as regiões claras representam os menores valores de densidade do solo seco (A); e reconstrução 3D (B).

Os resultados dos índices r , RMSE e MAE para as amostras analisadas do Cambissolo, Nitossolo e os dois Latossolos estão apresentados na Tabela 2. A correlação entre Eq.(5) e Eq.(6) apresentou valores elevados de r em todos os tipos de solo. Isso ocorreu, pois os valores de volume de sólidos estimados ou medidos apresentaram-se semelhantes, uma vez que ρ_s variou pouco no espaço, apresentando, na maioria das vezes, valores, medidos pela metodologia de Flint e Flint (2002), em torno de $2,65 \text{ kg dm}^{-3}$ (Schjonning et al, 2017).

Na Tabela 2 tem-se a comparação entre o método da Eq.(5) com o torrão parafinado, anel volumétrico, Eq.(6) e tomografia para o LVA, LVE e NV. Para esses três tipos de solo os métodos que apresentaram maior exatidão dos dados foi a Eq. (5) e a Eq.(6), devido aos menores valores de RMSE e MAE. É possível observar que para o Latossolo Vermelho escuro, a menor correlação encontrada foi entre a Eq.(5) e a tomografia, com um valor alto de $\text{RMSE}=0,380 \text{ kg dm}^{-3}$. Para o Latossolo Vermelho amarelo, a Eq.(5) e o método do anel volumétrico apresentaram um RMSE baixo quando comparados ao método da parafina e da tomografia, contudo o menor erro médio absoluto foi entre a Eq.(5) e o método do torrão parafinado.

Tabela 2 - Índices r , RMSE e MAE da Eq.(5) comparado com os quatro métodos analisados (torrão parafinado, escavação, Eq.(6), e tomografia) para o Cambissolo e quatro métodos (torrão parafinado, anel volumétrico, eq.(6), e tomografia) para os Latossolos e Nitossolo.

	R	RMSE	MAE
	-	---- kg dm ⁻³ ----	
Cambissolo Háplico Distrófico			
Eq.(5) × Torrão parafinado	0,567	0,184	0,022
Eq.(5) × Escavação	0,587	0,221	0,026
Eq.(5) × Eq.(6)	0,995	0,017	0,002
Eq.(5) × Tomografia	0,407	0,221	0,015
Latossolo Vermelho Escuro			
Eq.(5) × Torrão parafinado	0,755	0,093	0,038
Eq.(5) × Escavação	0,758	0,312	0,127
Eq.(5) × Eq.(6)	0,995	0,018	0,007
Eq.(5) × Tomografia	0,468	0,380	0,155
Latossolo Vermelho Amarelo			
Eq.(5) × Torrão parafinado	0,767	0,059	0,024
Eq.(5) × Escavação	0,692	0,090	0,037
Eq.(5) × Eq.(6)	0,971	0,013	0,005
Eq.(5) × Tomografia	0,566	0,201	0,082
Nitossolo Vermelho			
Eq.(5) × Torrão parafinado	0,000	0,102	0,042
Eq.(5) × Escavação	-0,111	0,198	0,081
Eq.(5) × Eq.(6)	0,818	0,055	0,022
Eq.(5) × Tomografia	-0,811	0,375	0,153

Comparando a Eq.(5) e o método da escavação para o Cambissolo, encontrou-se um $r=0,587$. Esse valor de r pode ser consequência de que no método da escavação, o V_t foi medido a campo, igualando-o ao V_{ag} adicionado no orifício em que foi retirado o torrão e, posteriormente, descontando-se o volume do plástico filme, ocorrendo erros na quantidade de água colocada e de menisco na proveta. Ademais, como os torrões foram saturados em água e secos ao ar por mais de três vezes, para adquirirem volume constante, eventuais perdas de sólidos podem ter ocorrido, bem como alterações na geometria porosa em consequência dos repetidos processos de umedecimento e secagem, como verificado por Pires et al. (2005).

Analogamente, durante a medição do V_t a campo pelo método da escavação, a umidade do solo era diferente da umidade em que se mediu o V_t para Eq.(5) em laboratório. Com isso, a diferença de água presente nos torrões durante a coleta e nas medições em laboratório pode diferenciar os valores de ρ_b , pois a umidade na condição de campo era diferente da encontrada em laboratório.

No caso do Nitossolo Vermelho, a Eq.(5) e a tomografia apresentaram uma correlação negativa de -0,811. Isso significa que elas são inversamente proporcionais, ou seja, quando um valor de ρ_b aumenta, o outro conseqüentemente diminui e vice-versa. Para esse tipo de solo, a Eq.(5) e o método do torrão parafinado apresentaram valores de RMSE=0,102 kg dm⁻³ e MAE=0,042 kg dm⁻³.

Na Tabela 3, encontra-se o resumo estatístico dos métodos examinados. Os valores médios de ρ_b para o Cambissolo são semelhantes entre si, sendo o método da tomografia computadorizada o que apresentou a maior diferença. O menor valor para o método da tomografia foi ainda maior, quando comparado aos outros, ocasionando maiores valores médios. A presença desse *outlier* pode ter sido o fator que contribuiu para elevar o valor médio de ρ_b , já que o número de amostras é reduzido nesse método.

O método da Eq.(5) superestimou a média de ρ_b para os Latossolos e Nitossolo, bem como os maiores e menores valores em geral (Tabela 3). A menor média foi encontrada para o método da tomografia, enquanto que a Eq.(5), Eq.(6) e torrão parafinado apresentaram médias próximas entre si.

A partir da Tabela 3, é possível observar que o método da tomografia apresentou tendências diferentes entre os solos analisados. No Cambissolo, o valor médio da tomografia superou os valores encontrados nos outros métodos, enquanto que nos Latossolos e no Nitossolo, os valores médios de ρ_b da tomografia foram menores. Isso pode ser resultado das diferenças de metodologia aplicadas nas amostras.

Gonçalves et al. (2013) analisaram dois métodos para determinar a ρ_b , anel volumétrico e torrão parafinado. Eles encontraram, assim como nos dados de Piracicaba e no de Siqueira et al. (2008), valores médios utilizando torrão parafinado maiores que quando utilizado anel volumétrico, justificando que a parafina pode penetrar pelos poros e fendas. Com isso, o valor de V_t diminui e o de ρ_b aumenta. Isso também pode ser resultado de que no anel volumétrico, o solo geralmente é coletado em condições úmidas, podendo haver expansão do espaço poroso e conseqüentemente uma superestimativa do V_t , ocasionando valores menores de ρ_b .

Tabela 3 - Resumo estatístico dos resultados dos métodos da escavação, torrão parafinado, Eq.(5), Eq.(6) e tomografia, avaliados no Cambissolo bem como para o método do anel volumétrico, torrão parafinado, eq.(5), eq.(6) e tomografia avaliados para os Latossolos e para o Nitossolo.

Cambissolo					
n = 70	Escavação	Parafina	Eq.(5)	Eq.(6)	Tomografia
Média (kg dm ⁻³)	1,153	1,249	1,198	1,204	1,383
Maximo (kg dm ⁻³)	1,953	1,722	1,723	1,723	1,687
Mínimo (kg dm ⁻³)	0,712	0,899	0,944	0,952	1,125
DP (kg dm ⁻³)	0,269	0,212	0,154	0,154	0,144
CV	0,234	0,170	0,129	0,128	0,104
Latossolo Vermelho Escuro					
n = 6	Anel volumétrico	Parafina	Eq.(5)	Eq.(6)	Tomografia
Média (kg dm ⁻³)	1,326	1,571	1,635	1,619	1,260
Maximo (kg dm ⁻³)	1,391	1,698	1,728	1,716	1,360
Mínimo (kg dm ⁻³)	1,247	1,433	1,554	1,537	1,200
DP (kg dm ⁻³)	0,055	0,110	0,065	0,065	0,059
CV	0,041	0,070	0,039	0,040	0,047
Latossolo Vermelho Amarelo					
n = 6	Anel volumétrico	Parafina	Eq.(5)	Eq.(6)	Tomografia
Média (kg dm ⁻³)	1,674	1,699	1,750	1,739	1,552
Maximo (kg dm ⁻³)	1,806	1,795	1,794	1,790	1,620
Mínimo (kg dm ⁻³)	1,623	1,654	1,715	1,712	1,510
DP (kg dm ⁻³)	0,068	0,050	0,028	0,031	0,041
CV	0,041	0,029	0,016	0,018	0,027
Nitossolo Vermelho					
n = 6	Anel volumétrico	Parafina	Eq.(5)	Eq.(6)	Tomografia
Média (kg dm ⁻³)	1,643	1,783	1,825	1,787	1,462
Maximo (kg dm ⁻³)	1,685	1,854	1,910	1,859	1,500
Mínimo (kg dm ⁻³)	1,590	1,680	1,700	1,690	1,420
DP (kg dm ⁻³)	0,037	0,068	0,076	0,061	0,030
CV	0,023	0,038	0,041	0,034	0,020

Correlações lineares entre os valores de S_g , S_v e ρ_b das amostras, obtidos pela tomografia foram realizadas (Figura 5). Verificou-se que a ρ_b é inversamente proporcional à S_g (Figura 5A) e diretamente proporcional à S_v (Figura 5B), pois quando se aumenta a massa de sólidos em um mesmo volume, aumenta-se também a ρ_b e, conseqüentemente, há uma diminuição da S_g ($S_g=S/m_s$) (Prevedello e Armindo, 2015). Todavia, diminuindo-se V_t , há maiores valores de ρ_b e, por conseguinte, maiores valores de S_v [$S_v=S/(m_s/\rho_s)$].

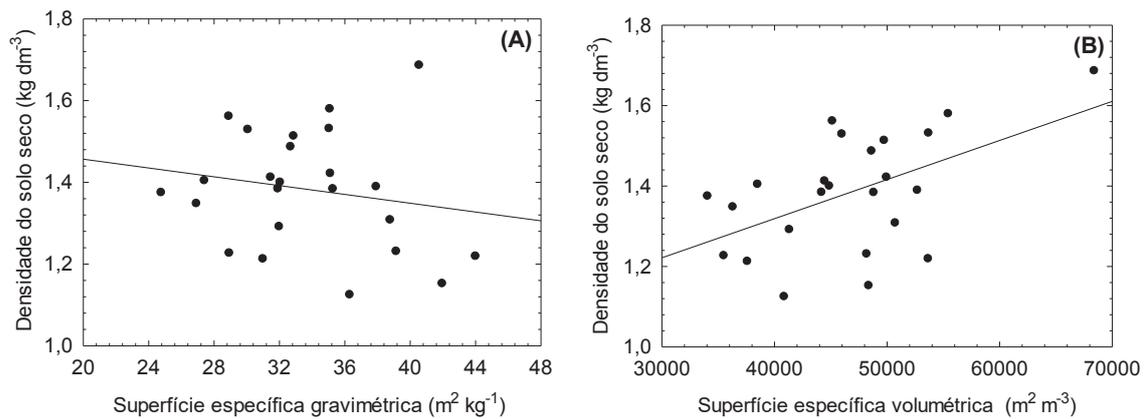


Figura 5 - Relação entre a densidade do solo seco e superfície específica gravimétrica (A) e superfície específica volumétrica (B).

3.5.2. COMPARAÇÃO CAMBISSOLO COM LATOSSOLOS E NITOSSOLO

Os valores de ρ_b foram estimados a partir das equações de regressão entre cada um dos métodos e o torrão parafinado (Figura 6). Verificou-se que os métodos apresentaram valores concordantes aos do torrão parafinado, considerado neste caso como o método padrão. Contudo, os dados de tomografia, Eq.(5), Eq.(6) e escavação, apresentaram valores estimados semelhantes entre si. O anel volumétrico foi o que mais se diferiu do torrão parafinado, podendo ser consequência do menor número de amostras analisadas entre esses dois métodos.

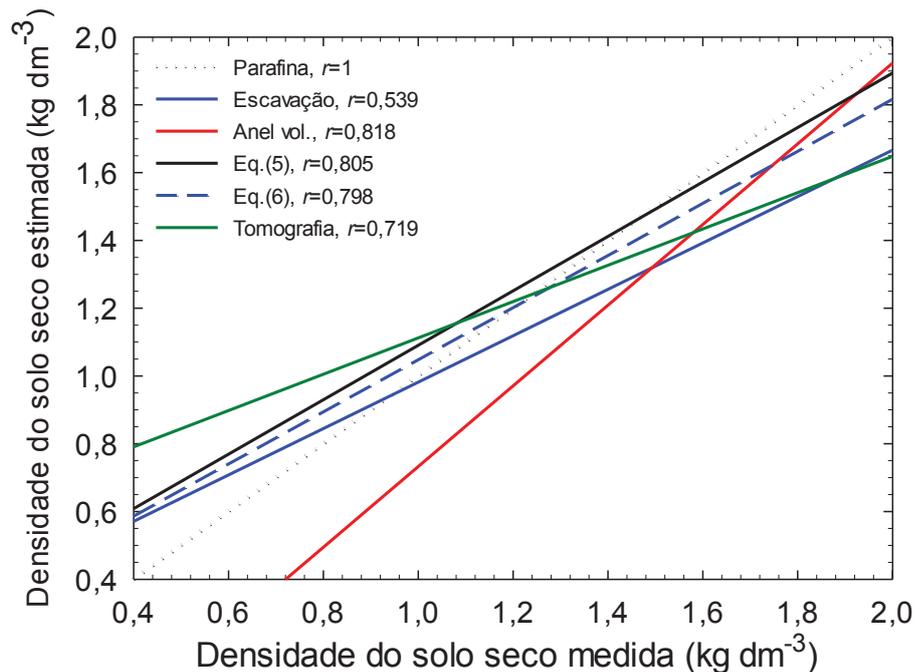


Figura 6 - Retas 1:1 de comparação entre densidade do solo seco medida pelo método do torrão parafinado (método padrão), e estimada pelos outros métodos avaliados.

Na Tabela 4 apresenta-se uma matriz de correlação dos métodos estudados para as 88 amostras. Observaram-se as menores correlações entre o método da escavação \times tomografia, Eq.(5) \times tomografia, e Eq.(6) \times tomografia. A tomografia, por ser um método moderno, apresentou valores adequados de ρ_b devido ao detalhamento que o equipamento é capaz de fornecer. Com ele, foi possível encontrar valores de ρ_b para cada fatia da amostra, em cada ponto (pixel ou voxel) desejado com alta precisão.

Tabela 4 - Matriz de correlação de Pearson (r) entre os métodos do torrão parafinado, escavação, Eq.(5), Eq.(6), tomografia, e anel volumétrico.

	Parafina	Escavação	Eq.(5)	Eq.(6)	Tomografia	Anel vol. ⁽¹⁾
Anel vol. ⁽¹⁾	0,818	-	0,757	0,817	0,946	1
Tomografia	0,719	0,484	0,361	0,378	1	-
Eq.(6)	0,805	0,609	0,997	1	-	-
Eq.(5)	0,798	0,587	1	-	-	-
Escavação	0,539	1	-	-	-	-
Parafina	1	-	-	-	-	-

(1) Anel vol.: anel volumétrico.

Uma das menores correlações encontradas foi entre os métodos da escavação e torrão parafinado. Em contraste, Casanova et al. (2016) compararam três técnicas de determinação de ρ_b : anel volumétrico, escavação e torrão parafinado. Eles observaram que o método da escavação apresentou maior variação, teoricamente devido a não uniformidade das amostras coletadas. Constataram também que a técnica do torrão parafinado se diferiu do anel volumétrico e escavação, apresentando maiores valores de ρ_b . Isso não foi observado neste trabalho, já que o método da parafina mostrou resultados bem correlacionados aos resultados do anel volumétrico, Eq.(5) e Eq.(6). Similarmente, Pires et al. (2011) encontraram diferenças significativas entre os valores obtidos entre o método do anel volumétrico com o torrão parafinado e com a tomografia computadorizada. Entretanto, neste trabalho o anel volumétrico gerou resultados bem correlacionados àqueles dos outros métodos.

A Eq.(6) apresentou correlações maiores com os outros métodos quando comparada à Eq.(5). Esse resultado mostra que a determinação do V_t do torrão pode ser ainda mais simplificada, já que, assumindo-se $\rho_s=2,65 \text{ kg dm}^{-3}$ na determinação de V_s , bastaria apenas medir a massa do torrão na condição saturada para encontrar o V_t .

Na Figura 7A é apresentada a correlação da ρ_b medida pelo método do torrão parafinado com a ρ_b estimada pela Eq.(1) para as amostras de Curitiba e Piracicaba. Al-Asadi e Mouazen (2014) também estimaram a ρ_b a partir da Eq.(1). Eles determinaram θ utilizando reflectometria no domínio da frequência (FDR) e θ_g com uma função da espectroscopia no infravermelho próximo e visível (vis-NIRS), encontrando $r=0,81$ e $RMSE=0,095 \text{ kg dm}^{-3}$. Esses autores concluíram que bons resultados de ρ_b dependem da exatidão na medição de θ e θ_g .

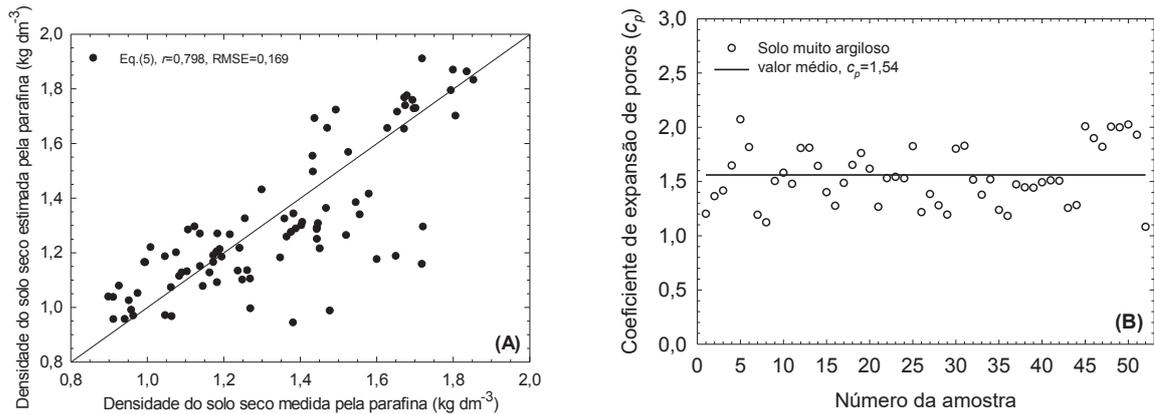


Figura 7 - Relação entre a densidade do solo seco estimada pela Eq.(1) e medida pelo método do torrão parafinado (A) e coeficiente de expansão de poros para amostras de Cambissolo (B).

O coeficiente de expansão dos poros (c_p) das amostras de Curitiba e Piracicaba é apresentado na Figura 7B. Em todos os pontos, o c_p foi maior do que um, mostrando que a água presente no volume de solo alterou a geometria do espaço poroso, expandindo-o.

Foram encontrados valores de $c_p > 2$. Esses resultados são consequência de elevados valores de umidade volumétrica na saturação (θ_s), quando comparados aos de ϕ na fase seca. Isso ocorreu, pois θ é calculada a partir da razão entre volume de água na saturação e V_t . Porém, V_t foi determinado a partir do método do torrão parafinado, estando completamente seco no momento em que estava recoberto com parafina. Com isso, torna-se difícil encontrar corretamente a θ_s , já que o volume de água na saturação é encontrado quando amostra está úmida, e durante a determinação de V_t de amostras irregulares, normalmente as amostras encontram-se secas, independentemente do método utilizado. Ferreira et al. (2009) analisaram um Vertissolo e encontraram que a quantidade de água presente pode alterar/expandir o volume do solo, justificando assim, que mudanças em θ alteram o V_t , mesmo que nos solos estudados não apresentem argilas 2:1. Dessa forma, o ideal, porém utópico, seria determinar individualmente o V_t em diferentes quantidades de água, a fim de se obter valores de θ condizentes.

Na Figura 8 estão apresentados os gráficos que correlacionam o método do torrão parafinado com os dados obtidos a partir da Eq.(2), Eq.(5) e Eq.(6) para as diferentes classes texturais de solo: muito argiloso (Figura 8A), argiloso (Figura 8B) e franco argilo arenoso (Figura 8C). A principal diferença entre a Eq.(2) e as Eq.(5) e

Eq. (6) é que na primeira o V_t do torrão não é corrigido pelo c_p . Dessa forma, a ρ_b é calculada a partir de um V_t que leva em consideração V_p e V_s , desconsiderando qualquer tipo de expansão do espaço poroso. O solo que apresentou maior c_p médio foi o solo argiloso ($c_p=1,63$), seguido do muito argiloso ($c_p=1,56$) e, por último, franco argilo arenoso ($c_p=1,37$). Esses valores indicam que os solos muito argilosos podem expandir seu espaço poroso em aproximadamente 56% na condição saturada, valendo-se de 63% para solos argilosos e 37% para franco argilo arenoso.

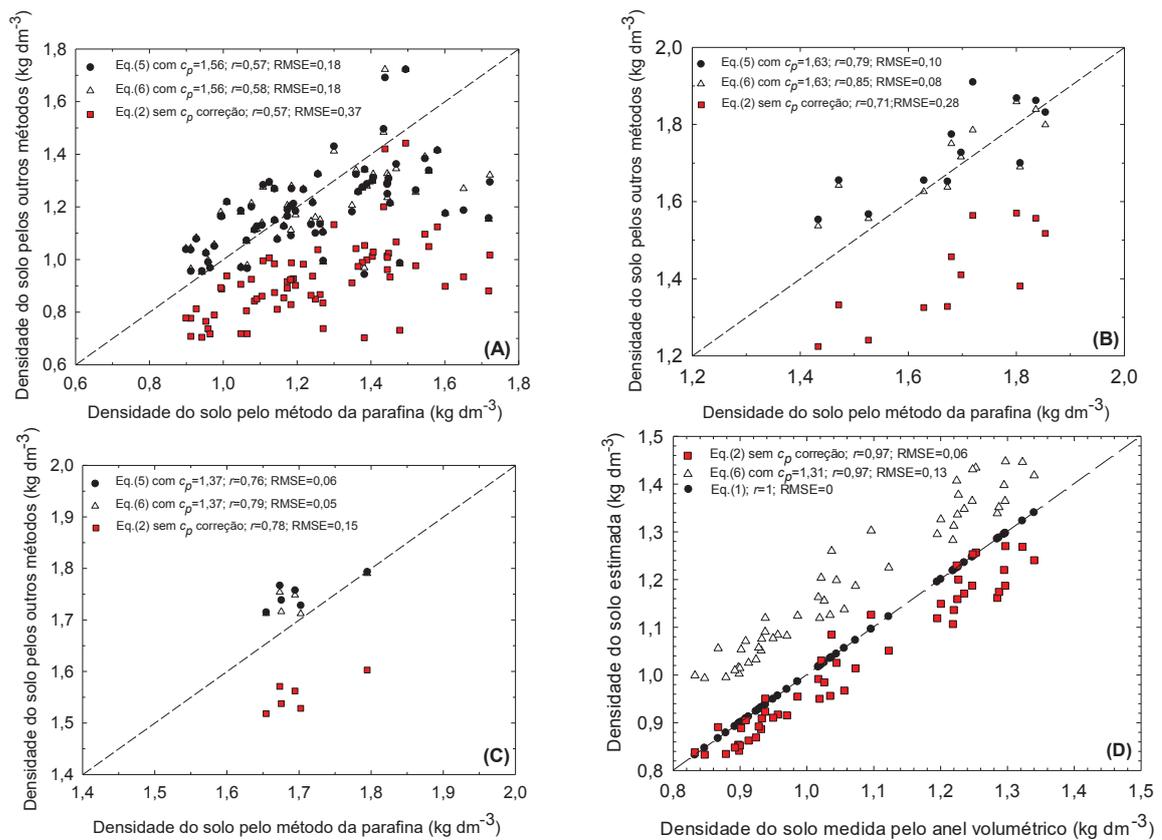


Figura 8 - Comparação entre a densidade do solo seco medida pelo método do torrão parafinado e Eq.(5), Eq.(6), e Eq.(2) relativa à textura muito argilosa (A), textura argilosa (B) e textura franca argilo arenosa (C). Comparação entre a densidade do solo seco medida pelo método do anel volumétrico e Eq.(1), Eq.(6), e Eq.(2) relativa à textura muito argilosa (D).

Percebe-se que para todas as classes texturais os valores estimados de ρ_b pela Eq.(2) ficaram mais distantes da reta 1:1 do método padrão (torrão parafinado), enquanto que os dados estimados pela Eq.(5) e Eq. (6) estão bem próximos da reta de comparação. Isso demonstra a importância do cálculo de correção do espaço

poroso encontrado na condição de saturação, por meio do coeficiente c_p , para encontrar valores de ρ_b mais condizentes ao método padrão para amostras irregulares.

Ressalva-se que os valores de c_p foram encontrados a partir da relação θ_s/ϕ . Os valores de θ_s foram determinados com base no V_t medido pelo método da parafina, assim como ϕ ($\phi=1-\rho_b/\rho_s$) foi calculado com base nos valores de ρ_b do torrão parafinado. Dessa forma, as subestimativas do V_t no método do torrão parafinado, e maiores ρ_b podem ter alterado também os valores de c_p , sendo essencial encontrar valores de c_p a partir de outros métodos como, por exemplo, anel volumétrico ou tomografia computadorizada.

Na Figura 8D estão apresentados os dados de ρ_b estimados pelas Eq.(1), Eq.(2) e Eq.(6) comparados com a ρ_b medida por anéis volumétricos. As equações foram altamente correlacionadas com a metodologia do anel volumétrico. A Eq.(6) superestimou os valores de ρ_b em relação ao método em questão, contudo os altos valores de correlação indicam a utilização da Eq.(6) para encontrar ρ_b mais facilmente. O c_p altera-se dependendo da metodologia utilizada na sua determinação, já que, utilizando-se a mesma classificação textural, o método da parafina apresentou $c_p=1,56$, enquanto que o anel volumétrico $c_p=1,31$. Essas diferenças dos valores de c_p , dentre outros motivos, são resultado das subestimativas do V_t no método do torrão parafinado, bem como da redução da expansão dos poros devido à barreira físico-metálica do anel.

3.5.3. UM CASO DE APLICAÇÃO DO MÉTODO EXAMINADO

Na Figura 9A são apresentados os pontos das diferentes curvas de retenção de água no solo (SWRCs) medidas utilizando um psicrômetro (Figura 9B). Os pontos foram apresentados na forma de umidade gravimétrica e volumétrica, obtida com as variações dos valores de ρ_b obtidos pelo método do torrão parafinado, tomografia, escavação e pelas Eqs. (5) e (6). As Eqs. (5) e (6) representam apenas uma curva, pois o valor de ρ_b foi igual nas duas equações.

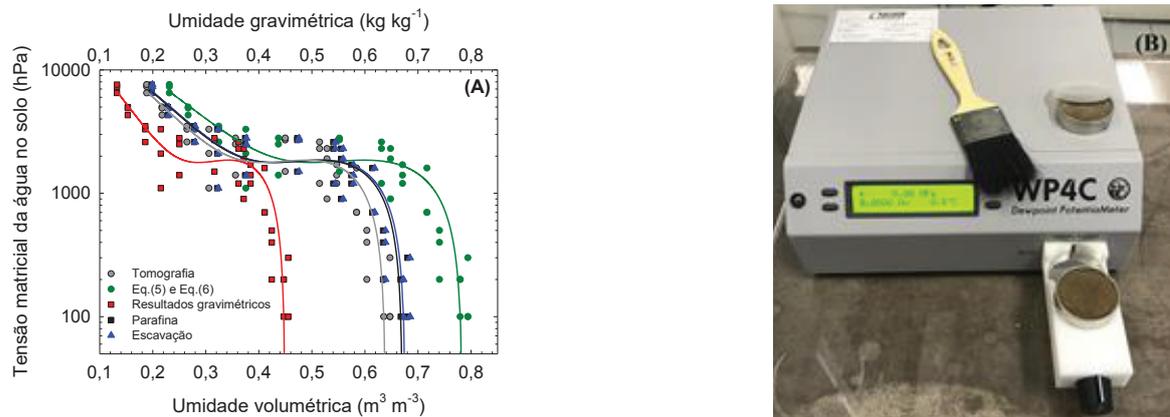


Figura 9 - Pontos gravimétricos do potencial matricial de água no solo determinados pelo Dewpoint Meter, e pontos volumétricos do potencial matricial de água no solo corrigidos pelos métodos do torrão parafinado, tomografia, Eq.(5), Eq.(6), e escavação (A). amostra de solo usada no Dewpoint Meter (B).

Observou-se que os diferentes métodos de análise de ρ_b forneceram diferentes resultados de θ , e conseqüentemente, diferentes parâmetros de ajuste de van Genuchten (1980) das SWRCs (Tabela 5), que podem levar a aplicações enganosas em estudos de dinâmica da água, qualidade estrutural do solo, entre outros.

Tabela 5 - Parâmetros de Van Genuchten (1980) da curva de retenção da água no solo usando diferentes métodos de determinação de densidade do solo

Parâmetros	Gravimétrico	Escavação	Parafina	Eq.(5) e (6)	Tomografia
θ_r	0,1585	0,1984	0,1980	0,2129	0,1877
θ_s	0,4550	0,6850	0,6799	0,7940	0,6473
α (hPa^{-1})	0,0005	0,0005	0,0003	0,0004	0,0005
N	3,6175	3,1312	2,5000	5,7776	3,2475

θ_r : umidade volumétrica residual, θ_s : umidade volumétrica na saturação, α e n : parâmetros de ajuste.

3.6. CONCLUSÕES

A função de pedotransferência (PTF) avaliada pela Eq.(5) apresentou valores razoáveis de correlação com a maioria dos métodos analisados, diferindo-se apenas quando comparado ao método da tomografia ($r=0,361$). A PTF avaliada pela Eq.(6) mostrou valores de densidade do solo (ρ_b) semelhantes ao da Eq.(5), já que a densidade das partículas pouco variou no espaço, resultando em valores semelhantes de volume de sólidos. Além disso, a Eq.(6) apresentou correlações com outros métodos superiores a Eq.(5). A Eq.(1) é uma alternativa adequada para estimar ρ_b , já que os valores por ela fornecidos são semelhantes ao do método do torrão parafinado. O coeficiente de expansão dos poros mostrou-se como uma variável viável de correção do volume total (V_t) do solo, que pode ser alterado em condições úmidas, modificando conseqüentemente a ρ_b .

3.7. LITERATURA CITADA

ADAMS, W. A. The effect of organic matter on the bulk and true densities of some uncultivated podzolic soils. **Journal of Soil Science**, v. 24, p. 10-17, 1973.

AL-ASADI, R. A.; MOUAZEN, A. M. Combining frequency domain reflectometry and visible and near infrared spectroscopy for assessment of soil bulk density. **Soil & Tillage Research**, v. 135, p. 60-70, 2014.

BARROS, H. S.; FEARNside, P. M. Pedo-transfer functions for estimating soil bulk density in central Amazonia. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 39, p. 397-407, 2015.

BENITES, V. M.; MACHADO, P. L. O. A.; FIDALGO, E. C. C.; COELHO, M. R.; MADARI, B. E. Pedotransfer functions for estimating soil bulk density from existing soil survey reports in Brazil. **Geoderma**, v. 139, p. 90-97, 2007.

BERNOUX, M.; ARROUAYS, D.; CERRI, C.; VOLKOFF, B.; JOLIVET, C. Bulk Densities of Brazilian Amazon Soils Related to Other Soil Properties. **Soil Science Society of America Journal**, v. 62, p. 743-749, 1998.

BLAKE, G. R.; HARTGE, K. H. Bulk Density. In: Klute A. (Ed.). *Methods of soil analysis: Physical and Mineralogical Methods. Part 1.* **Madison: American Society of Agronomy**, p. 363-375, 1986.

BORGES, J. R.; PIRES, L. F. Representative elementary area (REA) in soil bulk density measurements through gamma ray computed tomography. **Soil & Tillage Research**, v. 123, p. 43-49, 2012.

BOTULA, Y.; NEMES, A.; RANST, E.V.; MAFUKA, P.; CORNELIS, J. D. P. W. M. Hierarchical Pedotransfer Functions to Predict Bulk Density of Highly Weathered Soils in Central Africa. **Soil Science Society of America Journal**, v. 79, p. 476-486, 2015.

BRAHIM, N.; BERNOUX, M.; GALLALI, T. Pedotransfer functions to estimate soil bulk density for Northern Africa: Tunisia case. **Journal of Arid Environments**, v. 81, p. 77-83, 2012.

CARDUCCI, C. E.; OLIVEIRA, G. C.; SEVERIANO, E. C.; ZEVIANI, W. M. Modelagem da curva de retenção de água de Latossolos utilizando a equação duplo Van Genuchten. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 35, p. 77-86, 2011.

CASANOVA, M.; TAPIA, E.; SEGUÉL, O.; SALAZAR, O. Direct measurement and prediction of bulk density on alluvial soils of central Chile. **Chilean Journal of Agricultural Research**, v. 76, p. 105-113, 2016.

DECAGON DEVICES, Inc. WP4C Dew Point PotentiaMeter - Operator's Manual. Pulmann: Decagon Devices; 2015.

ESTRADA, M.S.; FERNÁNDEZ, J.D.; SEGUÉL, O. S.; BECERRA, J. C.; SALAZAR, D.R. **Métodos de análisis físico de suelos**, 2011.

FERREIRA, S. R. M.; FERREIRA, M. G. V. X. Mudanças de volume devido à variação do teor de água em um Vertissolo no semiárido de Pernambuco. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 33, p. 779-791, 2009.

FLINT, A. L.; FLINT, L. E. Particle density. In: Dane JH, Topp GC. Methods of soil analysis: part 4 – physical methods. **Madison: American Society of America**, p.229-240, 2002.

GOMES, A. S. **Funções de pedotransferência para a estimativa da densidade de solos da Bacia do Solimões, sob Floresta Tropical Amazônica**. 2014. 63 f. Dissertação. Seropédica: Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, 2014.

GONÇALVES, F. C.; MARASCA, I.; SOUZA, S. F. G.; TAVARES, L. A. F.; SILVA, P. R. A. Métodos de determinação da densidade do solo em diferentes sistemas de manejo. **Energia na Agricultura**, v. 28, p. 165-169, 2013.

HERNANZ, J.L.; PEIXOTO, H.; CERISOLA, C.; SÁNCHEZ-GIRÓN, V. An empirical model to predict soil bulk density profiles in field conditions using penetration resistance, moisture content and soil depth. **Journal of Terramechanics**, v. 37, p. 167-184, 2000.

KELLER, T.; HÅKANSSON, I. Estimation of reference bulk density from soil particle size distribution and soil organic matter content. **Geoderma**, v. 154, p. 398-406, 2010.

KLEIN, V. S.; BASEGGIO, M.; MADALOSSO, T.; MARCOLIN, C. D. Textura do solo e a estimativa do teor de água no ponto de murcha permanente com psicrômetro. **Ciência Rural**, v. 40, p. 1550-1556, 2010.

MARCOLIN, C. D.; KLEIN, V. A. Determinação da densidade relativa do solo por uma função de pedotransferência para a densidade do solo máxima. **Acta Scientiarum Agronomy**, v. 33, p. 349-354, 2011.

MINASNY, B.; HARTEMINK, A. E. Predicting soil properties in the tropics. **Earth-Science Reviews**, v. 106, p. 52-62, 2011.

NANKO, K.; UGAWA, S.; HASHIMOTO, S.; IMAYA, A.; KOBAYASHI, M.; SAKAI, H.; ISHIZUKA, S.; MIURA, S.; TANAKA, N.; TAKAHASHI, M.; KANEKO, S. A pedotransfer function for estimating bulk density of forest soil in Japan affected by volcanic ash. **Geoderma**, v. 213, p. 36-45, 2014.

NASRI, B.; FOUCHÉ, O.; TORRI, D. Coupling published pedotransfer functions for the estimation of bulk density and saturated hydraulic conductivity in stony soils. **Catena**, v. 131, p. 99-108, 2015.

PÁDUA, E. J.; GUERRA, A. R.; ZINN, Y. L. Modelagem da densidade do solo em profundidade sob vegetação nativa em Minas Gerais. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 39, p. 725-736, 2015.

PIRES, L. F. **Tomografia computadorizada, atenuação dos raios gama e análise micromorfológica na avaliação de alteração na estrutura e retenção de água pelo solo. 2006.** 229 f. Tese - Centro de Energia Nuclear na Agricultura da Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2006.

PIRES, L. F.; BACCHI, O. O. S.; REICHARDT, K. Gamma ray computed tomography to evaluate wetting/drying soil structure changes. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research*, v. 229, p. 443-456, 2005.

PIRES, L. F.; ROSA, J. A.; TIMM, L. C. Comparação de métodos de medida da densidade do solo. **Acta Scientiarum Agronomy**, v. 33, p. 161-170, 2011.

PREVEDELLO, C. L.; ARMINDO, R. A. **Física do Solo com Problemas Resolvidos.** 2 ed. Curitiba: Celso Luiz Prevedello; 2015.

RODRÍGUEZ-LADO, L.; RIAL, M.; TABOADA, T.; CORTIZAS, A. M. A. Pedotransfer function to map soil bulk density from limited data. **Procedia Environmental Sciences**, v. 27, p. 45-48, 2015.

SCHJONNING, P.; MCBRIDE, R. A.; KELLER, T.; OBOUR, P. B. Predicting soil particle density from clay and soil organic matter contents. **Geoderma**, v. 286, p. 83-87, 2017.

SEQUEIRA, C. H.; WILLS, S. A.; SEYBOLD, C.A.; WEST, L. T. Predicting soil bulk density for incomplete databases. **Geoderma**, v. 213, p. 64-73, 2014.

SILVA, V. R.; REINERT, D. J.; REICHERT, J. M. Comparação entre os métodos do cilindro e do torrão na determinação da porosidade e da densidade do solo. **Ciência Rural**, v. 30, p. 1065-1068, 2000.

SIQUEIRA, G. M.; VIEIRA, S. R.; CEDDIA, M. B. Variabilidade de atributos físicos do solo determinados por métodos diversos. *Bragantia*. 2008; 67:203-211.

SUUSTER, E.; RITZ, C.; ROOSTALU, H.; REINTAM, E.; KÖLLI, R.; ASTOVER, A. Soil bulk density pedotransfer functions of the humus horizon in arable soils. *Geoderma*, v. 163, p. 74-82, 2011.

TULLER, M.; OR, D. Water films and scaling of soil characteristic curves at low water contents. *Water Resources Research*, v. 41, p 1-6, 2005.

VAN GENUCHTEN, M. T. A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. *Soil Science Society of America Journal*, v. 44, p. 892-898, 1980.

XIANGSHENG, Y.; GUOSHENG, L.; YANYU, Y. Pedotransfer Functions for Estimating Soil Bulk Density: A Case Study in the Three-River Headwater Region of Qinghai Province, China. *Pedosphere*, v. 26, p. 362-373, 2016.

4. CONCLUSÃO GERAL

As diversas metodologias analisadas para determinação da densidade de amostras regulares e irregulares de do solo (ρ_b) geraram diferenças nos resultados. Da mesma forma, o uso das PFTs mostrou-se viável e eficaz para estimativa da ρ_b a partir da relação entre as umidades volumétrica, gravimétrica e do coeficiente de expansão de poros, reduzindo custos e tempo de análise.

Baseado na comparação entre as metodologias avaliadas, a PTF descrita pela equação 6 foi melhor correlacionada com os valores obtidos pelas demais metodologias, ainda que os valores estimados pela equação 5 tenham sido bem correlacionados. Por fim, a proposição e aplicação do coeficiente de expansão dos poros foi viável como fator de correção do volume total das amostras de solo.

5. REFERÊNCIAS

- ADAMS, W. A. The effect of organic matter on the bulk and true densities of some uncultivated podzolic soils. **Journal of Soil Science**, v. 24, p. 10-17, 1973.
- AGOSTINI, M. L. A.; MONTERUBBIANESI, M. G.; STUDDERT, G. A.; MAURETTE, S. Un método simple y práctico para la determinación de densidad aparente. **Ciencia Del Suelo**, v. 32, p. 171-176, 2014.
- AL-ASADI, R. A.; MOUAZEN, A. M. Combining frequency domain reflectometry and visible and near infrared spectroscopy for assessment of soil bulk density. **Soil & Tillage Research**, v. 135, p. 60-70, 2014.
- AULER, A.C.; PIRES, L. F.; BRINATTI, A.M.; SAAB, S. C. Densidade de agregados de solo: Uso da balança de Jolly em aulas de física experimental para educação em ciência do solo. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, v. 39, n. 1, e1506, 2017.
- BARROS, H. S.; FEARNside, P. M. Pedo-transfer functions for estimating soil bulk density in central Amazonia. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 39, p. 397-407, 2015.
- BENITES, V. M.; MACHADO, P. L. O. A.; FIDALGO, E. C. C.; COELHO, M. R.; MADARI, B. E. Pedotransfer functions for estimating soil bulk density from existing soil survey reports in Brazil. **Geoderma**, v. 139, p. 90-97, 2007.
- BERNOUX, M.; ARROUAYS, D.; CERRI, C.; VOLKOFF, B.; JOLIVET, C. Bulk Densities of Brazilian Amazon Soils Related to Other Soil Properties. **Soil Science Society of America Journal**, v. 62, p. 743-749, 1998.
- BERTOL, I.; ALBUQUERQUE, J. A.; LEITE, D.; AMARAL, A.J.; ZOLDAN JUNIOR, W. A. Propriedades físicas do solo sob preparo convencional e semeadura direta em rotação e sucessão de culturas, comparadas às do campo nativo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 28, p.155-163, 2004.
- BLAKE, G. R.; HARTGE, K. H. Bulk Density. In: Klute A. (Ed.). *Methods of soil analysis: Physical and Mineralogical Methods. Part 1.* **Madison: American Society of Agronomy**, p. 363-375, 1986.
- BORGES, J. R.; PIRES, L. F. Representative elementary area (REA) in soil bulk density measurements through gamma ray computed tomography. **Soil & Tillage Research**, v. 123, p. 43-49, 2012.
- BOTULA, Y.; NEMES, A.; RANST, E.V.; MAFUKA, P.; CORNELIS, J. D. P. W. M. Hierarchical Pedotransfer Functions to Predict Bulk Density of Highly Weathered Soils in Central Africa. **Soil Science Society of America Journal**, v. 79, p. 476-486, 2015.
- BRAHIM, N.; BERNOUX, M.; GALLALI, T. Pedotransfer functions to estimate soil bulk density for Northern Africa: Tunisia case. **Journal of Arid Environments**, v. 81, p. 77-83, 2012.

CARDUCCI, C. E.; OLIVEIRA, G. C.; SEVERIANO, E. C.; ZEVIANI, W. M. Modelagem da curva de retenção de água de Latossolos utilizando a equação duplo Van Genuchten. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 35, p. 77-86, 2011.

CASANOVA, M.; TAPIA, E.; SEGUÉL, O.; SALAZAR, O. Direct measurement and prediction of bulk density on alluvial soils of central Chile. **Chilean Journal of Agricultural Research**, v. 76, p. 105-113, 2016.

DAM, R. F.; MEHDI, B. B.; BURGESS, M. S. E.; MADRAMOOTOO, C. A.; MEHUYS, G. R.; CALLUM, I. R. Soil bulk density and crop yield under eleven consecutive years of corn with different tillage and residue practices in a sandy loam soil in central Canada. **Soil & Tillage Research**, v. 84, p. 41-53, 2005.

DECAGON DEVICES, Inc. WP4C Dew Point PotentiaMeter - Operator's Manual. Pulmann: Decagon Devices; 2015.

ESTRADA, M.S.; FERNÁNDEZ, J.D.; SEGUÉL, O. S.; BECERRA, J. C.; SALAZAR, D.R. **Métodos de análisis físico de suelos**, 2011.

FANTE JUNIOR, L.; OLIVEIRA, J. C. M.; BASSOI, L.H.; VAZ, C. M. P.; MACEDO, A.; BACCHI, O. O. S.; REICHARDT, K.; CAVALCANTI, A.C.; SILVA, F. H. B. B. Tomografia computadorizada na avaliação da densidade de um solo do semiárido brasileiro. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 26, p. 835-842, 2002.

FERREIRA, S. R. M.; FERREIRA, M. G. V. X. Mudanças de volume devido à variação do teor de água em um Vertissolo no semiárido de Pernambuco. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 33, p. 779-791, 2009.

FERREIRA, T.R.; BORGES, J. A. R.; PIRES, L.F. Representative elementary area for soil bulk density measurements of samples collected in volumetric rings by CT image analyses. **Soil & Tillage Research**, v. 152, p. 74-84, 2015.

FLINT, A. L.; FLINT, L. E. Particle density. In: Dane JH, Topp GC. Methods of soil analysis: part 4 – physical methods. **Madison: American Society of America**, p.229-240, 2002.

GOMES, A. S. **Funções de pedotransferência para a estimativa da densidade de solos da Bacia do Solimões, sob Floresta Tropical Amazônica**. 2014. 63 f. Dissertação. Seropédica: Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, 2014.

GONÇALVES, F. C.; MARASCA, I.; SOUZA, S. F. G.; TAVARES, L. A. F.; SILVA, P. R. A. Métodos de determinação da densidade do solo em diferentes sistemas de manejo. **Energia na Agricultura**, v. 28, p. 165-169, 2013.

HERNANZ, J.L.; PEIXOTO, H.; CERISOLA, C.; SÁNCHEZ-GIRÓN, V. An empirical model to predict soil bulk density profiles in field conditions using penetration resistance, moisture content and soil depth. **Journal of Terramechanics**, v. 37, p. 167-184, 2000.

KELLER, T.; HÅKANSSON, I. Estimation of reference bulk density from soil particle size distribution and soil organic matter content. **Geoderma**, v. 154, p. 398-406, 2010

KLEIN, V. S.; BASEGGIO, M.; MADALOSSO, T.; MARCOLIN, C. D. Textura do solo e a estimativa do teor de água no ponto de murcha permanente com psicrômetro. **Ciência Rural**, v. 40, p. 1550-1556, 2010.

LICHTER, J.M.; COSTELLO, L.R. An evaluation of volume excavation and core sampling techniques for measuring soil bulk density. **Journal of Arboriculture**, v. 20, p. 160-164, 1994.

MANRIQUE, L.A.; JONES, C. A. Bulk density of soils in relation to soil physical and chemical properties. **Soil Science Society Journal**, v. 55, p. 476-481, 1991.

MARCOLIN, C. D.; KLEIN, V. A. Determinação da densidade relativa do solo por uma função de pedotransferência para a densidade do solo máxima. **Acta Scientiarum Agronomy**, v. 33, p. 349-354, 2011.

MINASNY, B.; HARTEMINK, A. E. Predicting soil properties in the tropics. **Earth-Science Reviews**, v. 106, p. 52-62, 2011.

NANKO, K.; UGAWA, S.; HASHIMOTO, S.; IMAYA, A.; KOBAYASHI, M.; SAKAI, H.; ISHIZUKA, S.; MIURA, S.; TANAKA, N.; TAKAHASHI, M.; KANEKO, S. A pedotransfer function for estimating bulk density of forest soil in Japan affected by volcanic ash. **Geoderma**, v. 213, p. 36-45, 2014.

NASRI, B.; FOUCHÉ, O.; TORRI, D. Coupling published pedotransfer functions for the estimation of bulk density and saturated hydraulic conductivity in stony soils. **Catena**, v. 131, p. 99-108, 2015.

PÁDUA, E. J.; GUERRA, A. R.; ZINN, Y. L. Modelagem da densidade do solo em profundidade sob vegetação nativa em Minas Gerais. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 39, p. 725-736, 2015.

PIRES, L. F. **Tomografia computadorizada, atenuação dos raios gama e análise micromorfológica na avaliação de alteração na estrutura e retenção de água pelo solo. 2006.** 229 f. Tese - Centro de Energia Nuclear na Agricultura da Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2006.

PIRES, L. F.; BACCHI, O. O. S.; REICHARDT, K. Damage to soil physical properties caused by soil sampler devices assessed by gamma ray computed tomography. **Australian Journal of Soil Research**, v. 42, p. 857-863, 2004.

PIRES, L. F.; BACCHI, O. O. S.; REICHARDT, K. Gamma ray computed tomography to evaluate wetting/drying soil structure changes. **Nuclear Instruments and Methods in Physics Research**, v. 229, p. 443-456, 2005.

PIRES, L. F.; BACCHI, O. O. S.; REICHARDT, K. Twenty-five years of computed tomography in soil physics: A literature review of the Brazilian contribution. **Soil & Tillage Research**, v. 110, p. 197-210, 2010.

PIRES, L. F.; ROSA, J. A.; TIMM, L. C. Comparação de métodos de medida da densidade do solo. **Acta Scientiarum Agronomy**, v. 33, p. 161-170, 2011.

PREVEDELLO, C. L.; ARMINDO, R. A. **Física do Solo com Problemas Resolvidos**. 2 ed. Curitiba: Celso Luiz Prevedello; 2015.

REICHARDT, K.; TIMM, L. C. **Solo, planta e atmosfera: conceitos, processos e aplicações**. 2 ed. Barueri: Manole; 2012.

REICHERT, J. M.; SUZUKI, L. E. A. S. S.; REINERT, D. J.; HORN, R.; HÅKANSSON, I. Reference bulk density and critical degree-of-compactness for no-till crop production in subtropical highly weathered soils. **Soil & Tillage Research**, v. 102, p. 242-254, 2009.

RODRÍGUEZ-LADO, L.; RIAL, M.; TABOADA, T.; CORTIZAS, A. M. A. Pedotransfer function to map soil bulk density from limited data. **Procedia Environmental Sciences**, v. 27, p. 45-48, 2015.

SCHJONNING, P.; MCBRIDE, R. A.; KELLER, T.; OBOUR, P. B. Predicting soil particle density from clay and soil organic matter contents. **Geoderma**, v. 286, p. 83-87, 2017.

SEQUEIRA, C. H.; WILLS, S. A.; SEYBOLD, C.A.; WEST, L. T. Predicting soil bulk density for incomplete databases. **Geoderma**, v. 213, p. 64-73, 2014.

SILVA, V. R.; REINERT, D. J.; REICHERT, J. M. Comparação entre os métodos do cilindro e do torrão na determinação da porosidade e da densidade do solo. **Ciência Rural**, v. 30, p. 1065-1068, 2000.

SIQUEIRA, G. M.; VIEIRA, S. R.; CEDDIA, M. B. Variabilidade de atributos físicos do solo determinados por métodos diversos. *Bragantia*. 2008; 67:203-211.

STONE, L. F.; SILVEIRA, P. M. Efeitos do sistema de preparo e da rotação de culturas na porosidade e densidade do solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 25, p. 395-401, 2001.

SUUSTER, E.; RITZ, C.; ROOSTALU, H.; REINTAM, E.; KÖLLI, R.; ASTOVER, A. Soil bulk density pedotransfer functions of the humus horizon in arable soils. **Geoderma**, v. 163, p. 74-82, 2011.

TOMASELLA, J.; HODNETT, M. G. Estimating soil water retention characteristics from limited data in Brazilian Amazonia. **Soil Science**, v. 163, p. 190-202, 1998.

TORMENA, C. A.; BARBOSA, M. C.; COSTA, A. C. S.; GONÇALVES, C. A. Densidade, porosidade e resistência à penetração em Latossolo cultivado sob diferentes sistemas de preparo do solo. **Scientia Agricola**, v. 59, p. 795-801, 2002.

TULLER, M.; OR, D. Water films and scaling of soil characteristic curves at low water contents. **Water Resources Research**, v. 41, p 1-6, 2005.

WATANABE, S. H.; TORMENA, C. A.; ARAUJO, M. A.; GONÇALVES, A. C. A.; SILVA, A. P.; PINTRO, J. C.; COSTA, A. C. S.; VIDIGAL FILHO, P. S. Resistência do solo à penetração e porosidade de aeração de um Latossolo vermelho distrófico sob plantio direto por dois anos. **Acta Scientiarum**, v. 22, p. 1055-1060, 2000.

VAN GENUCHTEN, M. T. A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. **Soil Science Society of America Journal**, v. 44, p. 892-898, 1980.

XIANGSHENG, Y.; GUOSHENG, L.; YANYU, Y. Pedotransfer Functions for Estimating Soil Bulk Density: A Case Study in the Three-River Headwater Region of Qinghai Province, China. **Pedosphere**, v. 26, p. 362-373, 2016.