

Revista
Ciência, Tecnologia & Ambiente

Efeito de estimativa de densidade do solo no cálculo de estoque de carbono

Raquel Stucchi Boschi^{1*}, Maria Leonor Ribeiro Casimiro Lopes-Assad², Gabriela Pereira da Silva Souza³, Ana Carolina Martins Cidin⁴, Eduardo Delgado Assad⁵

¹Pós-doutoranda na Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz da Universidade de São Paulo. Bolsista FAPESP. *e-mail (autor para correspondência): raboschi@gmail.com

²Professora Titular na Universidade Federal de São Carlos, Centro de Ciências Agrárias, Campus Araras / SP, Programa de Pós-Graduação em Agricultura e Ambiente – PPGAA.

³Graduanda do curso de Engenharia Agrônoma, Universidade Federal de São Carlos.

⁴Mestranda na Universidade Federal de São Carlos, Centro de Ciências Agrárias, Araras/SP, PPGAA.

⁵Pesquisador, Embrapa Informática Agropecuária, Bolsista CNPq.

RESUMO

Monitorar o estoque de carbono em solos tem sido um desafio para atender políticas que promovam a adoção de práticas agrícolas de baixa emissão de carbono. O objetivo deste trabalho foi avaliar o efeito de valores estimados de densidade do solo no cálculo do estoque de carbono em solos brasileiros. Utilizando dados de 974 amostras de solos, 12 funções de pedotransferência (PTF) foram desenvolvidas (664 dados) e testadas (310 dados), para estimar valores de densidade do solo (DS). O desempenho de cada PTF foi avaliado por meio do R^2 . Na validação, a acurácia da predição foi medida com base no cálculo do erro médio, do erro absoluto médio e da raiz quadrada do erro médio quadrático. Todas as funções superestimaram o valor de DS, sendo a função 5 (PTF 5) a que apresentou o melhor desempenho. No cálculo do estoque de carbono (EC), quatro funções (PTF5, PTF6, PTF7 e PTF10) apresentaram baixos valores de erro absoluto médio e de raiz quadrada do erro médio quadrático e os valores dos erros no cálculo de EC ficaram próximos. Conclui-se que os erros detectados na estimativa de valores de densidade do solo não se propagam no cálculo do estoque de carbono.

Palavras-chave: banco de dados de solos; pedometria; solos tropicais

ABSTRACT

Monitoring the carbon stock in soils has been a challenge to address policies that promote the adoption of agricultural practices of low-carbon. The objective of this study was to evaluate the effect of estimated values of soil density on the carbon stock calculation in Brazilian soils. Using 974 soil samples, 12 pedotransfer functions (PTF) for soil bulk density (DS) estimation were developed (664 data) and tested (310 data). The performance of pedotransfer functions was assessed by R^2 , and in the validation, the accuracy of prediction was measured based on the mean error, the mean absolute error, and the root mean squared error. All functions overestimated DS values and one of them (PTF 5) presented the best performance. In the soil carbon stock (EC) calculation, four functions (PTF5, PTF6, PTF7, and PTF10) had low values of mean absolute error and root mean squared error. Thus, the values of errors in soil carbon stock estimations were close. We conclude that the errors found in the estimation of bulk density by pedotransfer functions are not propagated in the calculation of soil carbon stock.

Keywords: soil data set; pedometry; tropical soils.

INTRODUÇÃO

Nos últimos anos, o Brasil tem implantado políticas públicas para atender às metas voluntárias assumidas na Convenção do Clima, realizada em Copenhague, em 2009, que visam contribuir para a redução das emissões de gases de efeito estufa. Uma das metas é monitorar os estoques de carbono (EC) em solos, para estimular a adoção de práticas agrícolas de baixa emissão de carbono. Portanto, é importante dispor de informações de solos que permitam a regionalização segura de políticas públicas.

As estimativas de EC no solo dependem do teor de carbono (C) e da densidade do solo (DS), usada para converter C em porcentagem de peso seco para peso de C por unidade de área (HOWARD et al., 1995). Porém, essas variáveis apresentam grande variabilidade espacial e temporal e sua quantificação é trabalhosa, pouco precisa e gera impactos negativos no ambiente (MACHADO, 2005).

Funções de pedotransferência (PTFs) para determinação da DS foram desenvolvidas a partir de conjuntos de dados específicos (BERNOUX et al., 1998; HAN et al., 2012; HONG et al., 2013), entre outros. Mas o desempenho desses modelos em conjuntos de dados diferentes do utilizado na sua geração é incerto e pode não ser satisfatório (DEVOS et al., 2005; BENITES et al., 2007).

Assim, o mais seguro é utilizar uma PTF desenvolvida para dados da área de aplicação ou para uma área com solos de gênese semelhante (NEMES et al., 2010). A estimativa de DS pode ser feita por meio de diferentes atributos de solos de fácil determinação. As frações argila, areia e silte são conhecidas por terem efeito sobre a DS (MANRIQUE; JONES, 1991; DEVOS et al., 2005). Kaur et al. (2002) utilizaram teores de argila, silte, areia e C. No Brasil, Bernoux et al. (1998), Tomasella e Hodnett (1998) e Benites et al. (2007) usaram os atributos teores de argila, silte, C e o pH em água.

Em vista do exposto, o objetivo deste trabalho foi avaliar o efeito de valores estimados de

densidade do solo no cálculo do estoque de carbono em solos brasileiros.

MATERIAL E MÉTODOS

Inicialmente foi organizado um banco de dados com informações de solos disponíveis em artigos científicos, dissertações e teses publicadas. Os atributos presentes no banco foram: local da amostra, data da coleta, classificação do solo, número do perfil, tipo de horizonte ou camada, profundidade final e inicial da amostra, espessura do horizonte ou camada, uso do solo, composição granulométrica (teores de areia fina e grossa, de silte e de argila), densidade do solo, pH (H₂O, CaCl₂ e KCl) e teor de carbono (C).

Após a avaliação crítica dos dados, para ajuste e padronização de unidades, foram eliminadas as linhas com dados faltantes e as que continham dados duvidosos (granulometria idêntica para todos os horizontes; erro maior que 2% na soma das frações granulométricas; dados de amostras coletadas em áreas erodidas ou resultantes de ensaios de compactação). Com isso, as PTFs para estimativa de DS foram estabelecidas a partir de dados de 974 amostras de solos. Os teores de argila, areia, silte e C e o pH em água (pH H₂O) foram utilizados como atributos preditores para o desenvolvimento das PTFs.

O conjunto de dados foi dividido de forma aleatória e 664 dados (68%) foram utilizados para calibração dos modelos e 310 dados (32%) para validação dos modelos (Tabela 1). Foram testados modelos disponíveis na literatura (MANRIQUE; JONES, 1991; DEVOS et al., 2005; KAUR et al., 2002; BERNOUX et al., 1998; TOMASELLA; HODNETT, 1998; BENITES et al., 2007).

Como estes não apresentaram desempenho satisfatório, foram desenvolvidas 12 PTFs para estimativa da DS, testando-se modelos de regressão linear simples, múltipla e polinomiais de segunda ordem.

As variáveis preditoras foram os teores de areia, silte, argila e C, logaritmo natural de C (ln C) e pH (H₂O). Na validação dos modelos, a acurácia da predição foi medida pela comparação dos valores

estimados com os observados. Esta comparação foi feita com base no cálculo de erro médio (ME), do erro absoluto médio (MAE) e da raiz quadrada do erro quadrático médio. O ME indica se os dados foram subestimados ou superestimados, o MAE representa a magnitude do erro obtido e o RMSE pode ser interpretado como o desvio padrão do erro de predição (TIETJE; TAPKENHINRICH, 1993).

A quantificação do EC foi feita no conjunto de validação dos modelos. Inicialmente foi feita a estimativa de DS usando-se as PTFs desenvolvidas na etapa anterior. Considerou-se a camada 0-30 cm de solo, de acordo com recomendação do IPCC/UNEP/OECD/IEA (1997). No cálculo de EC foram utilizados 233 dados de horizontes ou camadas, correspondentes a 65 perfis de solos, visto que foram

eliminados dados referentes a camadas inferiores a 30 cm.

O estoque de carbono (EC, em Mg ha⁻¹) do solo foi calculado conforme Howard et al. (1995) (Eq. 1), usando-se valores observados de DS e valores estimados por meio de cada uma das 12 PTFs geradas.

$$EC(\text{Mg ha}^{-1}) = C(\%) \times DS(\text{kg dm}^{-3}) \times \text{espessura}(\text{cm}) \quad (1)$$

Finalmente, foi feita a comparação do EC calculado com EC estimado e foram calculados os respectivos erros.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os atributos dos conjuntos de dados utilizados na calibração e na validação dos modelos apresentaram valores similares (Tabela 1).

Tabela 1. Estatística descritiva dos dados dos conjuntos utilizados.

Atributo	Média	DP	Min	Q1	Mediana	Q3	Max
Conjunto de calibração (n = 664)							
Areia (g kg ⁻¹)	503	245	15	290	540	698	966
Silte (g kg ⁻¹)	159	118	10	85	125	190	696
Argila (g kg ⁻¹)	338	197	2	180	320	475	920
pH H ₂ O	5,3	0,7	3,5	4,9	5,4	5,8	8,2
C (g kg ⁻¹)	14,9	13,1	0,6	6,8	11,4	18,2	111,7
DS (kg dm ⁻³)	1,4	0,25	0,45	1,23	1,43	1,58	2,1
Conjunto de validação (n = 310)							
Areia (g kg ⁻¹)	468	261	20	230	510	674	951
Silte (g kg ⁻¹)	163	118	10	83	130	210	680
Argila (g kg ⁻¹)	369	208	1	211	340	559	910
pH H ₂ O	5,4	0,7	3,8	4,9	5,4	5,9	7,1
C (g kg ⁻¹)	15,3	11,9	1,3	7,3	11,9	19,9	99,1
DS (kg dm ⁻³)	1,36	0,25	0,46	1,19	1,41	1,56	1,8

DP - desvio padrão; Min - valor mínimo; Max - valor máximo; Q1 - 1^o quartil; Q3 - 3^o quartil; DS - densidade do solo; C - carbono orgânico.

No conjunto de calibração, 29% das amostras foram classificadas como de textura argila (Cl), 21% como franco argilo arenosa (SaClLo) e 17% como textura franco arenosa (SaLo) (Figura 1A). No conjunto de validação, 39% das amostras foram classificadas como de textura argila (Cl), 25%

como franco argilo arenosa (SaClLo) e 13% como textura franco arenosa (SaLo) (Figura 1B). O teor de carbono (g kg⁻¹) na Figura 1 está expresso de acordo com o tamanho dos círculos e observa-se que, em ambos os conjuntos, os teores de carbono mais elevados ocorreram em solos siltosos.

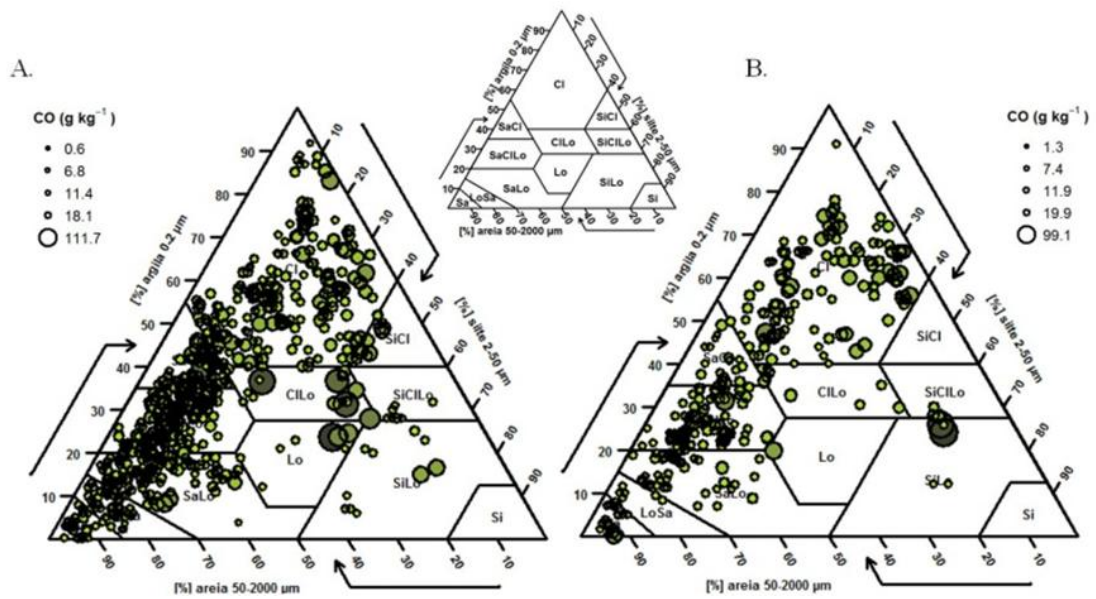


Figura 1. Triângulo textural proposto pelo Departamento de Agricultura dos Estados Unidos (USDA) (SOIL SURVEY STAFF, 1951), com as classes de textura e com o teor de carbono (CO) expresso pelo diâmetro dos círculos: (A.) conjunto de calibração; (B.) conjunto de validação. Ci = argilosa; SaCl = argilo arenosa; SaClLo = franco argilo arenosa; Sa = arenosa; LoSa = areno siltosa; SaLo = franco arenosa, CILo = franco argilosa; Lo = franca; SiCl = argilo siltosa; SiClLo = franco argilo arenosa; SiLo = franco siltosa; Si = siltosa.

As maiores correlações com DS foram observadas para os teores de areia e de argila (Figura 2). O coeficiente de correlação de Pearson (r) apresentou valores positivos para

todos os atributos (areia: $r = 0,63$; argila: $r = 0,60$; pH (H₂O): $r = 0,31$; e silte: $r = 0,32$), com exceção do carbono ($r = -0,54$).

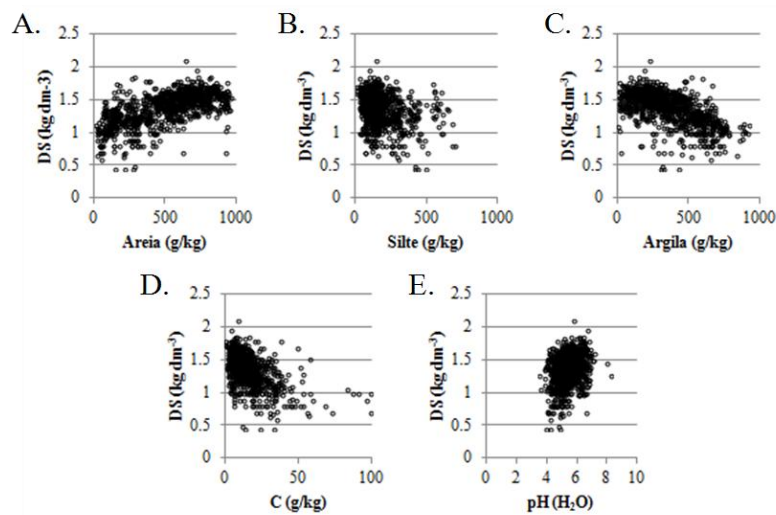


Figura 2. Plots da densidade do solo (DS) versus teores de areia (A), silte (B) e argila (C), carbono orgânico (C) (D) e pH em água (pH H₂O) (E).

Os 12 modelos desenvolvidos (Tabela 2) apresentaram valores de R^2 entre 0,09 e 0,59 indicando que as variáveis predictoras explicaram de 9% a 59% da variância da DS. PTFs desenvolvidas por outros autores e utilizando de 60 a mais de 19 mil dados apresentaram valores de R^2 de 0,41 a 0,75.

Manrique e Jones (1991) desenvolveram uma PTF para 19.651 dados de perfis estudados nos USA, Havaí, Porto Rico e outros países e encontraram um R^2 de 0,41 ao estimar DS a partir de dados de carbono orgânico. Huntington et al. (1989) obtiveram um R^2 de 0,75 para estimar DS a partir de teores de

matéria orgânica de 60 dados de solos. Utilizando 224 amostras de solos de uma mesma região (microbacias hidrográficas no Distrito de Almora, na Índia) e as mesmas variáveis adotadas neste trabalho,

Kaur et al. (2002) obtiveram um R^2 de 0,50. Utilizando atributos químicos e físicos de 1.542 horizontes de solos do Brasil, Benites et al. (2007) encontraram R^2 ajustado variando de 0,488 a 0,709.

Tabela 2. Funções de pedotransferência (PTFs) desenvolvidas para estimar a densidade do solo (DS) e seu desempenho avaliado pelo coeficiente de determinação ajustado (R^2).

Modelos	PTFs	R^2
1	$DS = 1,076 + (0,0006355 \text{Areia})$	0,4023
2	$DS = 1,495 + (0,000622 \text{Silte})$	0,0915
3	$DS = 1,646 - (0,000747 \text{Argila})$	0,3617
4	$DS = 1,562 - (0,011217C)$	0,3572
5	$DS = 1,112 + (0,0002913 \text{Areia}) - (0,007817C) - (0,0002217 \text{Argila}) + (0,06125 \text{pHH}_2\text{O})$	0,5923
6	$\log DS = 0,0494 + (0,0003201 \text{Areia}) - (0,09596C) - (0,00002059 \text{Argila}) + (0,06428 \text{pHH}_2\text{O})$	0,5262
7	$DS = 1,123 + (0,0003687 \text{Areia}) - (0,1201 \log C) - (0,00008775 \text{Argila}) + (0,07601 \text{pHH}_2\text{O})$	0,5567
8	$DS = 1,247 + (0,0004609 \text{Areia}) - (0,0002475 \text{Argila})$	0,4107
9	$DS = 1,541 + (0,0002017 \text{Areia}) - (0,0003757 \text{Argila}) - (0,008141C)$	0,5683
10	$DS = 1,8515 + (0,188561 \log CO)$	0,3401
11	$DS = 0,9872 + (0,0003752 \text{Areia}) - (0,00007724C^2) - (0,0002302 \text{Argila}) + (0,06110 \text{pHH}_2\text{O})$	0,543
12	$DS = 1,034 + (0,0003176 \text{Areia}) - (0,00008003C^2) - (0,0000004179 \text{Argila}^2) + (0,05532 \text{pHH}_2\text{O})$	0,5576

DS - densidade do solo (kg dm^{-3}); C - carbono orgânico (g kg^{-1}); Areia, silte, argila em g kg^{-1} .

A PTF5 apresentou um R^2 ajustado de 0,5923, superior ao das demais PTFs. As PTF7, PTF9, PTF11 e PTF12 apresentaram valores muito próximos de R^2 , sendo que destas, a mais simples (PTF9) apresentou o maior valor. Todas as PTFs, com destaque para a PTF2 e a PTF4, superestimaram o valor da DS ($ME > 0$) (Figura 3 e Tabela 3).

O MAE (Tabela 3) variou de 0,13 a 0,18, sendo o menor valor observado para as PTF5, PTF11 e PTF12 e o maior valor para as PTF2 e PTF10. O RMSE (Tabela 3) variou de 0,18 a 0,24, sendo que as PTF5, PTF7, PTF11 e PTF12 apresentaram o menor valor e a PTF2 o maior. O RMSE é um dos índices mais utilizados na avaliação de PTFs (DONATELLI et al., 2004). Na literatura, observa-se uma ampla gama de valores obtidos tanto no ajuste de modelos,

quanto na avaliação de modelos já disponíveis. Al-Qinna e Jaber (2013) obtiveram valores de RMSE entre 0,12 e 0,40 no desenvolvimento de PTFs por diferentes métodos.

Sequeira et al. (2014) utilizaram um método mais robusto (Random Forest) na geração de PTFs e obtiveram valores de RMSE entre 0,10 e 0,15. Na avaliação de PTFs disponíveis na literatura, De Vos et al. (2005) encontraram RMSE entre 0,20 e 0,56. Nanko et al. (2014) também avaliaram PTFs disponíveis na literatura e os valores de RMSE variaram de 0,15 a 0,54.

As PTF5, PTF11 e PTF12 apresentaram os menores valores do MAE e do RMSE sendo, portanto, consideradas as melhores. Considerando o valor do R^2 ajustado, a PTF5 foi a que apresentou o melhor desempenho (Tabela 3).

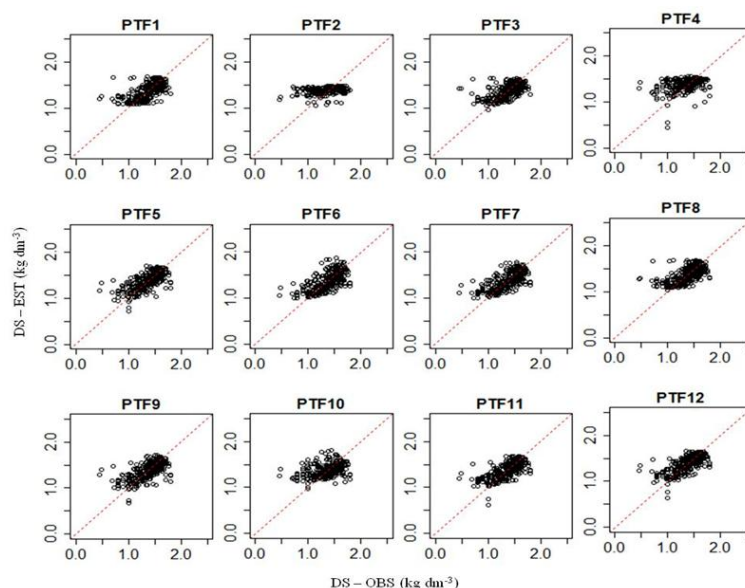


Figura 3. Densidade do solo estimada (EST) pelas 12 funções de pedotransferência desenvolvidas versus densidade do solo observada (OBS).

Tabela 3. Valores do erro médio (ME), erro médio absoluto (MAE) e da raiz quadrada do erro médio quadrático (RMSE) da densidade do solo (DS) estimada para cada PTF desenvolvida.

PTF	ME	MAE	RMSE
	----- kg dm ⁻³ -----		
PTF1	0,01	0,14	0,19
PTF2	0,03	0,18	0,24
PTF3	0,01	0,14	0,20
PTF4	0,03	0,17	0,23
PTF5	0,02	0,13	0,18
PTF6	0,01	0,14	0,19
PTF7	0,02	0,14	0,18
PTF8	0,01	0,14	0,19
PTF9	0,01	0,14	0,19
PTF10	0,02	0,18	0,23
PTF11	0,02	0,13	0,18
PTF12	0,02	0,13	0,18

O valor do EC observado a 30 cm (Obs) variou de 11 Mg ha⁻¹ a 290 Mg ha⁻¹, com uma média de 62 Mg ha⁻¹ (Tabela 4). O valor máximo foi observado para amostras de Terras Pretas Arqueológicas, solos com alta fertilidade, coloração escura e presença de fragmentos cerâmicos (KÄMPF; KERN, 2005). Estes solos apresentaram elevado teor de C que, neste caso, chegou a 99 g kg⁻¹, a 30 cm de profundidade. O menor valor de EC foi observado em um solo arenoso sob pastagem no Piauí, onde o teor de C observado foi de no máximo 3,65 g kg⁻¹. Assad et al. (2013) observaram EC a 30 cm variando de 27,3 a 123 Mg ha⁻¹ sob vegetação nativa, de 15 a 115 Mg ha⁻¹ em cultivos anuais e de 16 a 100 Mg ha⁻¹ em

sistema de pastagem. Bernoux et al. (2002) encontraram valores de EC a 30 cm variando de 15 a 417 Mg ha⁻¹ para diferentes solos e usos no Brasil.

No presente estudo, 75% dos valores de EC a 30 cm, calculados por meio de PTF para estimar densidade, situaram-se entre 72,55 e 79,71 Mg ha⁻¹ (Q3), ou seja, próximos ao EC observado, que foi de 75,94 Mg ha⁻¹ (Tabela 4). Por outro lado, os valores máximos de EC calculados por meio das PTFs apresentaram discrepâncias quando comparados com o valor máximo observado (290 Mg ha⁻¹), ocorrendo valores muito abaixo, como na PTF4 (155 Mg ha⁻¹), e valores muito acima, como na PTF3 (425 Mg ha⁻¹) (Tabela 4).

Tabela 4. Valores do estoque de C (Mg ha^{-1}) calculado a partir da densidade do solo observada (Obs) e da densidade do solo estimada a partir das 12 PTFs desenvolvidas.

DS	Média	DP	Min	Q1	Mediana	Q3	Max
	Mg ha^{-1}						
Obs	62,04	39,49	11,18	37,08	57,58	75,94	290,40
PTF1	66,02	48,96	12,45	38,79	54,86	75,62	339,78
PTF2	68,35	51,37	11,06	35,80	58,67	79,71	323,02
PTF3	67,44	56,76	12,26	38,44	54,04	78,37	425,14
PTF4	61,85	31,47	11,66	36,28	58,44	76,61	155,41
PTF5	61,63	33,11	12,80	39,19	56,45	74,52	214,98
PTF6	62,48	42,23	13,88	38,80	54,72	72,55	310,74
PTF7	63,33	43,26	13,37	38,82	55,61	73,59	319,30
PTF8	66,28	50,92	12,49	38,89	54,70	75,85	364,71
PTF9	61,48	32,73	12,78	38,91	55,45	74,85	200,80
PTF10	63,76	42,44	12,72	35,88	56,59	74,99	286,85
PTF11	62,55	33,61	12,56	39,31	55,93	76,48	190,58
PTF12	62,47	33,54	12,35	39,20	55,75	77,01	192,41

DS - densidade do solo; DP - desvio padrão; Min - valor mínimo; Max - valor máximo; Q1 - 1^o quartil; Q3 - 3^o quartil.

Das 12 PTFs desenvolvidas, apenas as PTF4, PTF5 e PTF9 subestimaram ($\text{ME} < 0$) o cálculo do EC em 30 cm de solo. A PTF5, considerada a de melhor desempenho, está entre as que obtiveram menor MAE e menor RMSE, com valores de 6,21 Mg ha^{-1} e 12,88 Mg ha^{-1} , respectivamente (Tabela 5).

Tabela 5. Valores do erro médio (ME), erro médio absoluto (MAE) e da raiz quadrada do erro médio quadrático (RMSE) na estimativa do estoque de carbono em 30 cm de solo obtido com cada uma das doze funções de pedotransferência (PTFs) desenvolvidas.

PTFs	ME	MAE	RMSE
	Mg ha^{-1}		
PTF1	3,98	8,24	15,98
PTF2	6,31	10,63	20,01
PTF3	5,4	8,95	22,22
PTF4	-0,19	9,33	22,41
PTF5	-0,41	6,21	12,88
PTF6	0,44	6,27	9,8
PTF7	1,29	6,09	10,12
PTF8	4,24	8,36	17,13
PTF9	-0,56	6,89	14,93
PTF10	1,72	7,46	12,6
PTF11	0,51	6,85	15,99
PTF12	0,43	6,76	15,68

A PTF6 e a PTF7 apresentaram MAE e RMSE muito próximos aos observados para a PTF5 na estimativa da DS e conseqüentemente os valores dos erros para EC ficaram próximos. A PTF10 também apresentou um baixo valor de MAE e RMSE

na estimativa do EC e constitui uma boa alternativa para aplicação, uma vez que utiliza apenas o teor de carbono como atributo de entrada. Já a PTF2 foi a que obteve maior MAE e a PTF4 o maior RMSE.

Esses resultados indicam que erros observados nas estimativas de DS não se propagaram no cálculo de EC. A confirmação por meio dos testes realizados neste trabalho constitui uma importante contribuição para a definição de estratégias de monitoramento de EC em solos brasileiros. Dependendo dos dados disponíveis, pode-se estimar DS por meio de uma das quatro PTFs (PTF5, PTF6, PTF7 e PTF10) que apresentaram baixos valores de MAE e de RMSE e medir o teor de carbono (ou de matéria orgânica) do solo, que constitui análise de rotina em laboratórios de solos.

CONCLUSÕES

1. Todas as funções de pedotransferência, estabelecidas por meio de variáveis facilmente determináveis, superestimaram o valor da densidade do solo.

2. A função de pedotransferência 5 (PTF5) apresentou o melhor desempenho, dados o maior valor de R^2 ajustado e os menores valores do erro absoluto médio e da raiz quadrada do erro quadrático médio.

3. No cálculo do estoque de carbono, quatro funções de pedotransferência (PTF5, PTF6, PTF7 e

PTF10) apresentaram baixos valores de erro absoluto médio e de raiz quadrada do erro quadrático médio e, portanto, os valores dos erros no cálculo do estoque de carbono ficaram próximos.

4. Os erros detectados na estimativa de densidade do solo por meio de função de pedotransferência não se propagaram no cálculo de estoque de carbono.

REFERÊNCIAS

AL-QINNA, M. I.; JABER, S. M. Predicting soil bulk density using advanced pedotransfer functions in an arid environment. *Transactions of the ASABE - American Society of Agricultural and Biological Engineers*, v. 56, n. 3, p. 963-976, 2013.

ASSAD, E. D.; PINTO, H. S.; MARTINS, S. C.; GROppo, J. D.; SALGADO, P. R.; EVANGELISTA, B.; SANO, E. E.; PAVÃO, E.; LUNA, R.; MARTINELLI, L. A. Changes in soil carbon stocks in Brazil due to land use: paired site comparisons and a regional pasture soil survey. *Biogeosciences*, v. 10, n. 1, p. 6141-6160, 2013.

BERNOUX, M., ARROUAYS, D., CERRI, C. C., VOLKOFF, B., JOLIVET, C. Bulk densities of Brazilian Amazon soils related to other soil properties. *Soil Science Society of America Journal*, v. 62, n. 3, p. 743-749, 1998.

BERNOUX, M.; CARVALHO, M. D. S.; VOLKOFF, B.; CERRI, C. C. Brazil's soil carbon stocks. *Soil Science Society of America Journal*, v. 66, n. 3, p. 888-896, 2002.

DE VOS, B.; VAN MEIRVENNE, M.; QUATAERT, P.; DECKERS, J.; MUYLS, B. Predictive quality of pedotransfer functions for estimating bulk density of forest soils. *Soil Science Society of America Journal*, v. 69, n. 2, p. 500-510, 2005.

DONATELLI, M.; ACUTIS, M.; NEMES, A.; WOSTEN, H. Methods to evaluate pedotransfer function: Integrated indices for pedotransfer function. In: Pachepsky, Y. A.; Rawls, W. J., (Eds.). *Development of pedotransfer function in soil hydrology*. Amsterdam: Elsevier Science, 2004. p. 357-411.

HAN, G.-Z.; ZHANG, G.-L.; GONG, Z.-T.; WANG, G.-F. Pedotransfer functions for estimating soil bulk

density in China. *Soil Science*, v. 177, n. 3, p. 158-164, 2012.

HONG, S. Y.; MINASNY, B.; HAN, K. H.; KIM, Y.; LEE, K. Predicting and mapping soil available water capacity in Korea. *PeerJ*, e71, p. 1-31, 2013.

HOWARD, P. J. A.; LOVELAND, P. J.; BRADLEY, R. I.; DRY, F. T.; HOWARD, D. M.; HOWARD, D. C. The carbon content of soil and its geographical distribution in Great Britain. *Soil use and management*, v. 11, n. 1, p. 9-15, 1995.

HUNTINGTON, T. G.; JOHNSON, C. E.; JOHNSON, A. H.; SICCAMI, T. G.; RYAN, D. F. Carbon, organic matter, and bulk density relationships in a forested spodosol. *Soil Science*, v. 148, n. 5, p. 380-386, 1989.

INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE - IPCC. *Revised 1996 IPCC Guidelines for National GREENHOUSE Gas Inventories*. Paris; 1997.

KÄMPF, N.; KERN, D. C. O solo como registro da ocupação humana pré-histórica na Amazônia. In: VIDAL-TORRADO, P.; ALLEONI, L. R. F.; COOPER, M.; SILVA, A. P.; CARDOSO, E. J. (Eds.). *Tópicos em ciência do solo*. Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2005. p. 277-320.

KAUR, R.; KUMAR, S.; GURUNG, H. P. A pedotransfer function soil data and its comparison with existing PTFs. *Australian Journal of Soil Research*, v. 40, n. 5, p. 847-857, 2002.

MACHADO, P. L. O. A. Carbono do solo e a mitigação da mudança climática global. *Química Nova*, v. 28, n. 2, p. 329-334, 2005.

MANRIQUE, L. A.; JONES, C. A. Bulk-density of soils in relation to soil physical and chemical properties. *Soil Science Society of America Journal*, v. 55, n. 2, p. 476-481, 1991.

NANKO, K.; UGAWA, S.; HASHIMOTO, S.; IMAYA, A.; KOBAYASHI, M.; SAKAI, H.; ISHIZUKA, S.; SATORU, M.; NAGAHARU, T.; MASAMICHI, T.; SHINJI, K. A pedotransfer function for estimating bulk density of forest soil in Japan affected by volcanic ash. *Geoderma*, v. 213, p. 36-45, 2014.

- NEMES, A.; QUEBEDEAUX, B.; TIMLIN, D. J. Ensemble approach to provide uncertainty estimates of soil bulk density. **Soil Science Society of America Journal**, v. 74, n. 6, p. 1938-1945, 2010.
- SEQUEIRA, C. H.; WILLS, S. A.; SEYBOLD, C. A.; WEST, L. T. Predicting soil bulk density for incomplete database. **Geoderma**, v. 213, p. 64-73, 2014.
- SOIL SURVEY STAFF. **Soil survey manual**. Washington: Department of Agriculture Handbook 18, 1951.
- TIETJE, O.; TAPKENHINRICHS, M. Evaluation of pedotransfer functions. **Soil Science Society of America Journal**, v.57, n.4, p.1088-1095, 1993.
- TOMASELLA, J.; HODNETT, M. G. Estimating soil water retention characteristics from limited data in Brazilian Amazonia. **Soil Science**, v. 163, n. 3, p. 190-202, 1998.