



Aplicação da técnica de espectroscopia de refletância difusa na predição do carbono orgânico do solo⁽¹⁾.

Jean Michel Moura-Bueno⁽²⁾; Ricardo Simão Diniz Dalmolin⁽³⁾; André Carnieletto Dotto⁽⁴⁾; Alexandre ten Caten⁽⁵⁾; João Pedro Moro Flores⁽⁶⁾; Cassiane Rodrigues Rosário⁽⁶⁾.

⁽¹⁾ Trabalho executado com recursos do CNPq, CAPES e FAPESC.

⁽²⁾ Doutorado do Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo; Universidade Federal de Santa Maria (UFSM); Santa Maria, RS; buenojm1@gmail.com; ⁽³⁾ Professor do Departamento de Solos; Universidade Federal de Santa Maria; ⁽⁴⁾ Doutorando do Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo; ⁽⁵⁾ Professor do Departamento de Ciências Biológicas e Veterinárias; Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC) Campus Curitibanos; ⁽⁶⁾ Curso de Agronomia, Universidade Federal de Santa Maria.

RESUMO: Estudos de predição do carbono orgânico do solo (COS) por meio da técnica de Espectroscopia de Refletância Difusa (ERD) são importantes para compreender o processo de desenvolvimento de modelos de predição para geração de mapas de distribuição do COS na paisagem. O objetivo desse estudo foi realizar a predição do COS por meio da técnica de ERD. O estudo foi realizado na bacia hidrográfica do Rio Marombas, região central do Estado de Santa Catarina, Brasil. Foram coletadas 299 amostras de solo, nas camadas de 0,0 – 0,05 m; 0,05 – 0,15 m; 0,15 – 0,30 m; 0,30 - 0,60 m; 0,60 – 1,00 m; 1,00 – 2,00 m. O COS foi determinado por digestão úmida. A análise de ERD das amostras foram realizadas por um espectroradiômetro FildSpec Pro (ASD) com uma faixa espectral de 350-2500 nm. Foi aplicada a técnica de razão de bandas (RB) para realçar as faixas espectrais. A predição foi realizada por um modelo de máquina de vetores de suporte (MVS) a partir dos dados espectrais e dos teores de COS determinados em laboratório. O conjunto de calibração apresentou bom desempenho na predição do COS, com valores de $R^2 = 0,85$; $RMSE = 3,81 \text{ g kg}^{-1}$; $SEP = 3,80 \text{ g kg}^{-1}$ e $BIAS = -0,32 \text{ g kg}^{-1}$. Já para o conjunto de validação o de $R^2 = 0,85$; $RMSE = 4,36 \text{ g kg}^{-1}$; $SEP = 4,30 \text{ g kg}^{-1}$ e $BIAS = -0,85 \text{ g kg}^{-1}$. Esses valores indicam que a técnica de ERD tem potencial para realizar a predição do COS.

Termos de indexação: propriedades do solo, radiometria, pedometria.

INTRODUÇÃO

A demanda por informações mais acuradas e detalhadas sobre o solo tem aumentado na última década em consequência da necessidade desses dados para a tomada de decisões frente aos cenários ambientais atuais. Diante disso o carbono orgânico do solo (COS) é uma das propriedades funcionais do solo consideradas de fundamental importância, podendo ser utilizado para avaliar impactos ao solo, fornecer dados para a modelagem

do ciclo do carbono e simulação de cenários futuros (Sanchez et al., 2009).

No entanto, a variabilidade espacial dessa propriedade do solo é complexa devida a interação com vários fatores ambientais, sendo isso um dos principais problemas que limitam a modelagem mais precisa do conteúdo de COS (Bernoux et al., 2002). Além disso, o elevado número de amostragens, associado ao custo e demanda de trabalho para quantificação do COS é um dos limitantes para mapeamento em áreas extensas (Sousa Junior et al., 2011).

Um dos desafios é propor uma técnica que tenha maior potencial para o monitoramento do COS, permitindo uma leitura rápida, barata e não destrutiva das amostras (Dalmolin et al., 2005; Viscarra Rossel et al., 2006). Nesse contexto ERD tem despontado como uma ferramenta eficiente para a predição dos atributos do solo (Viscarra Rossel et al., 2006; Minasny & Mcbratney, 2008).

As bandas de refletância espectral nas regiões do visível ao infravermelho-próximo (Vis-NIR) têm ascendido como um método de análise para alguns atributos do solo, devido ao seu custo-benefício, facilidade de manuseio, não demanda de reagentes químicos e maior eficiência quando um grande número de amostras se fizer necessário (Viscarra Rossel et al., 2006; Ben-Dor et al., 2009; Ramirez-Lopes et al., 2014; Knox et al., 2015). Esses trabalhos mostram que o uso da ERD na predição do conteúdo de COS tem potencial, apresentando uma alta correlação dos valores preditos com a análise de solo tradicional. No Brasil, os estudos com ERD são recentes (Demattê & Garcia, 1999; Dalmolin et al., 2005; Sousa Junior et al., 2011).

Diante do exposto, estudos regionalizados são importantes para compreender o processo de desenvolvimento de modelos de predição por meio da técnica de ERD, visando atender a demanda por informações para o planejamento conservacionista do solo e do meio ambiente como um todo. Para buscar essa informação, o objetivo desse estudo foi construir funções de predição para o COS por meio da técnica de ERD na bacia hidrográfica do Rio

Marombas, região central do Estado de Santa Catarina.

MATERIAL E MÉTODOS

Área de estudo e análises laboratoriais

O estudo foi realizado bacia hidrográfica do Rio Marombas, região central do Estado de Santa Catarina, Brasil. A área apresenta aproximadamente 1.000 km². Na área predominam solos bem desenvolvidos em locais de relevo suave ondulado, tais como Latossolos Vermelhos e em menor proporção Argissolos Vermelhos e Nitossolos Vermelhos. Foram coletadas 299 amostras de solo, estratificadas nas camadas de 0,0 – 0,05 m; 0,05 – 0,15 m; 0,15 – 0,30 m; 0,30 - 0,60 m; 0,60 – 1,00 m; 1,00 – 2,00 m. O COS foi determinado por digestão úmida (Yeomans & Bremner, 1988).

Aquisição, processamento e análise dos dados de ERD

A análise de ERD das amostras de solo foram realizadas por um espectroradiômetro FildSpec Pro (ASD) com uma faixa espectral de 350-2500 nm conforme descrito em Araújo et al. (2014).

A estatística descritiva foi realizada para descrever o conjunto de dados utilizados para gerar as funções de predição do COS. Os dados de reflectância coletados em laboratório apresentaram ruídos e por este motivo foram suavizados por um polinômio de primeira ordem através de uma janela móvel de cinco bandas (Vasques et al., 2010). A técnica da razão de bandas (RB) foi utilizada para realçar as diferenças espectrais de um par de bandas, caracterizando determinadas feições da curva de assinatura espectral do solo. Essa técnica é uma razão simples entre dois comprimentos de ondas. Para a definição das razões de bandas foi selecionado a banda de maior até a banda de menor reflectância.

A predição do COS foi realizada pelo modelo de máquina de vetores de suporte (MVS) (*support vector machine* – SVM) a partir das leituras no laboratório e dados espectrais. O total de 299 amostras de solo foi dividido aleatoriamente em um conjunto de calibração (n = 209) e um conjunto de validação (n = 90). O pré-tratamento dos dados, calibração e predição foi realizado no software Unscrambler X 10.3. A qualidade dos modelos de predição foi avaliada pelos seguintes parâmetros de validação: coeficiente de determinação (R²), raiz quadrada do erro médio quadrático (RMSE), erro padrão de desempenho (SEP) e pelo BIAS que é a diferença sistemática entre os valores previstos e medido.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Na **tabela 1** é apresentada a estatística descritiva dos conjuntos de dados utilizados para fazer a predição do COS a partir da ERD. Observa-se uma grande variação no teor de COS (valores mínimos e máximos), sendo isso reflexo da variabilidade vertical natural que ocorre no solo. Os valores de média, desvio-padrão e coeficiente de variação indicam que os conjuntos de calibração e validação são homogêneos, sendo isso necessário para realizar a predição.

Tabela 1 – Estatística descritiva dos teores de COS para os conjuntos de calibração e validação.

g kg ⁻¹	Calibração	Validação
Número ¹	209	90
Mínimo	0,20	3,40
Máximo	41,7	48,3
Média	17,5	22,1
Desvio-padrão	9,4	10,7
CV ²	0,53	0,48

¹ número de amostras; ² CV: coeficiente de variação.

A técnica de RB foi aplicada para remover a tendência dominante, especialmente quando uma curva linear e constante é apresentada curva espectral da amostra de solo. Em geral, esse procedimento é recomendado para ser utilizado antes da análise multivariada. Treze bandas com picos proeminentes foram escolhidos para análise da RB. Os seguintes índices foram calculados 448/412 nm, 448/476 nm, 752/476 nm, 752/1414 nm, 1431/1414 nm, 1431/1671 nm, 1860/1671 nm, 1860/1920 nm, 2136/1920 nm, 2136/2206 nm, 2414/2206 nm, e 2414/2489 nm.

A RB exibiu um desempenho significativo na predição do COS. Na **figura 1** observa-se que o COS apresentou um bom resultado, indicando uma forte relação linear entre as variáveis. Isso demonstra que é possível estimar teor de COS, utilizando a técnica de ERD a partir dos dados de reflectância espectral do solo. Estudo de Dalmolin et al. (2005) mostrou que o conteúdo de matéria orgânica do solo (MOS) influencia na forma e no albedo da curva espectral ao longo de todo o espectro óptico, principalmente na região do visível. Ainda, o aumento do conteúdo de MOS torna a coloração do solo mais escura o que diminui consideravelmente a reflectância espectral.

A predição do COS no presente estudo atingiu um R² de 0,85 para os dois conjuntos de dados, indicando baixa dispersão de dados e uma correlação expressiva entre as bandas espectrais e o teor de COS. No entanto, os indicadores de incerteza (RMSE, SEP e BIAS – **Figura 1**) foram



maiores para o conjunto de validação. Isso pode estar relacionado ao baixo número de amostras nesse conjunto de dados (Ramirez-Lopez et al., 2014).

O valor de R^2 encontrado neste estudo foi inferior ao obtido por Wetterlind et al. (2010), que alcançaram um valor de R^2 de 0,89. Contudo, o resultado foi superior ao estudo de Sousa Junior et al. (2011) onde o valor de R^2 foi de 0,38 e para o estudo de Cezar et al. (2013) com valor de R^2 de 0,54. Em estudo realizado por Stevens et al. (2010) usando diferentes tipos de solo, os autores encontram um RMSE de 0,43%, R^2 de 0,84, e BIAS de 0,30% para o COS aplicando o modelo de MVS.

O uso da ERD e a técnica de análise da reflectância espectral por razão de banda aplicada sobre as curvas espectrais do solo contribuíram para realçar as variações e feições produzidas pelos componentes opticamente ativos do solo, permitindo a melhor predição do COS.

CONCLUSÃO

O uso da ERS na predição do COS apresentou bom desempenho, com R^2 de 0,85 e baixos valores de erros na predição.

Essa metodologia de estimativa do COS pela ERD deve ser melhor estudada e no futuro pode contribuir nas análises dos laboratórios de rotina, permitindo a análise de um grande número de amostras, como menos tempo e custo e sem a geração de resíduos químicos.

O número de amostras referentes aos conjuntos de dados de calibração e validação pode interferir nos resultados, necessitando neste caso de mais estudos.

AGRADECIMENTOS

O primeiro autor agradece ao CNPq pela concessão da bolsa de doutorado e ao suporte financeiro e concessão da bolsa PQ ao segundo autor.

REFERÊNCIAS

ARAÚJO, S.R. et al. Improving the prediction performance of a large tropical vis-NIR spectroscopic soil library from Brazil by clustering into smaller subsets or use of data mining calibration techniques. *European Journal of Soil Science*, 65: 718-729, 2014.

BEN-DOR, E. et al. Using imaging spectroscopy to study soil properties. *Remote Sensing of Environment*, 113:538-555, 2009.

BERNOUX, M. et al. Brazil's soil carbon stocks. *Soil Science of America Journal*, 66:888-896, 2002.

CEZAR, E. et al. Estimativa de atributos do solo por meio de espectrorradiometria difusa. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, 37:858-868, 2013.

DALMOLIN, R.S.D. et al. Relação entre os constituintes do solo e seu comportamento espectral. *Ciência Rural*, 35:481-489, 2005.

DEMATTÊ, J. A. M. & GARCIA, G. J. Alteration of soil properties through a weathering sequence as evaluated by spectral reflectance. *Soil Science of America Journal*, 63(2):327-342, 1999.

KNOX, N.M. et al. Modelling soil carbon fractions with visible near-infrared (VNIR) and mid-infrared (MIR) spectroscopy *Geoderma*, 239-240:229-239, 2015.

MINASNY, B. & MCBRATNEY, A.B. Regression rules as a tool for predicting soil properties from infrared reflectance spectroscopy. *Chemometrics and Intelligent Laboratory Systems*, 94(1):72-79, 2008.

RAMIREZ-LOPEZ, L. et al. Sampling optimal calibration sets in soil infrared spectroscopy, *Geoderma*, 226-227:140-150, 2014.

SANCHEZ, P.A. et al. Digital soil map of the world. *Science*, 325:680-681, 2009.

SOUSA JUNIOR, J.G.; DEMATTÊ, J.A.M.; ARAÚJO, S.R. Modelos espectrais terrestres e orbitais na determinação de teores de atributos dos solos: potencial e custos. *Bragantia*, 70:610-621, 2011.

STEVENS, A. et al. Measuring soil organic carbon in croplands at regional scale using airborne imaging spectroscopy *Geoderma*, 158:32-45, 2010.

VASQUES, G.M.; GRUNWALD, S.; HARRIS, W.G. Spectroscopic models of soil organic carbon in Florida, USA. *J. Environ. Qual.* 39: 923-934, 2010.

VISCARRA ROSSEL, R. A. et al. Visible, near infrared, mid infrared or combined diffuse reflectance spectroscopy for simultaneous assessment of various soil properties. *Geoderma*, 131:59-75, 2006.

WETTERLIND, J.; STENBERG, B.; SÖDERSTRÖM, M. Increased sample point density in farm soil mapping by local calibration of visible and near infrared prediction models. *Geoderma*, 156(3-4):152-160, 2010.

YEOMANS, J.C. & BREMNER, J.M. A rapid and precise method for routine determination of organic carbon in soil. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 19:1467-1476, 1988.

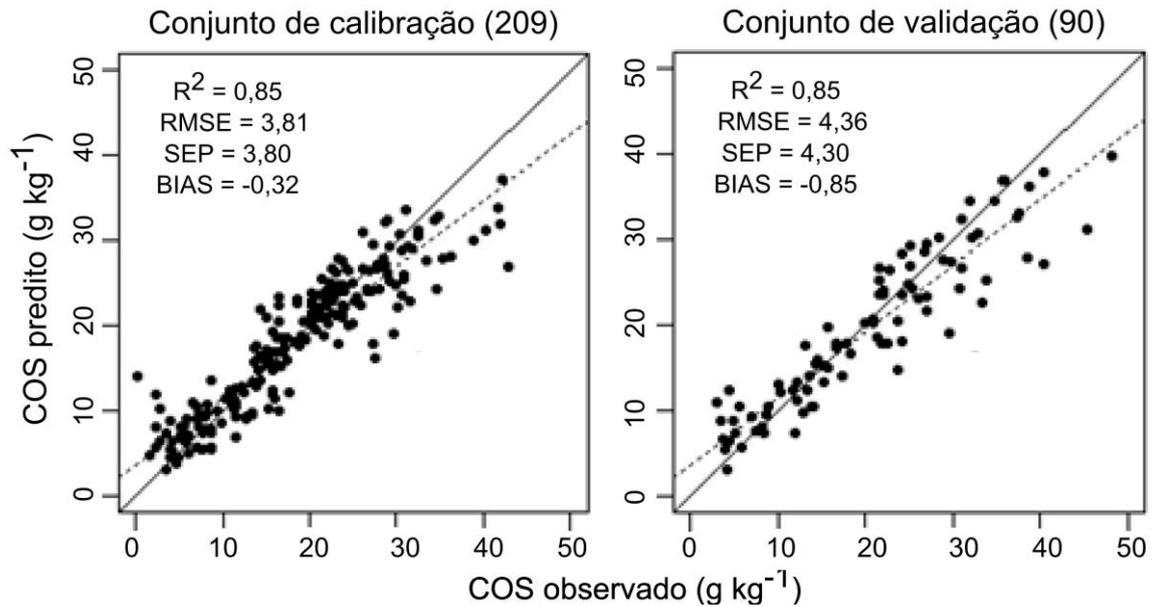


Figura 1 – Gráficos de dispersão dos valores obtidos para predição do COS para os conjuntos de calibração e validação. R² = coeficiente de determinação; RMSE = raiz quadrada do erro médio quadrático; SEP= erro padrão de desempenho; BIAS = diferença sistemática entre os valores preditos e observados.