

Espectroscopia de infravermelho próximo na predição de propriedades químicas e físicas de solos de Roraima

Edmilson Evangelista da Silva^{1*}, Lucielio Manoel da Silva², Paulo Guilherme Salvador Wadt³, Robélio Leandro Marchão⁴

1. Engenheiro Agrônomo e Doutor em Fitotecnia (Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro). Pesquisador da Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária, Brasil.

2. Engenheiro Agrônomo (Universidade Federal Rural de Pernambuco). Mestre em Genética e Melhoramento de Plantas (Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz-USP). Analista da Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária, Brasil.

3. Engenheiro Agrônomo (Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro). Doutor em Agronomia (Universidade Federal de Viçosa). Pesquisador da Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária, Brasil.

4. Engenheiro Agrônomo e Doutor em Agronomia (Universidade Federal de Goiás). Pesquisador da Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária, Brasil.

*Autor para correspondência: edmilson.evangelista@embrapa.br

RESUMO

As análises de solos tradicionais são morosas e exigem equipamentos caros, além de gerar resíduos altamente agressivos ao homem e ao meio ambiente. Uma alternativa para sanar essas desvantagens é o uso da técnica do infravermelho próximo, considerada uma técnica limpa, atendendo aos preceitos da química verde, rápida, cerca de 60 segundos é possível determinar vários atributos químicos e físicos do solo. O objetivo do presente trabalho foi avaliar o potencial do infravermelho próximo na predição de variáveis físicas e químicas em solos representativos do estado de Roraima. Foram usadas 84 amostras representativas dos solos de Roraima nas quais foi determinada pelos métodos tradicionais os teores de K, Na, carbono orgânico, nitrogênio total, dióxido de silício e óxido e os teores areia e argila. Os espectros foram obtidos no intervalo de 10.000 cm^{-1} a 4.000 cm^{-1} , com resolução espectral de 4 cm^{-1} . Com os espectros foram construídos os modelos de calibração e validação, sendo os espectros submetidos à pré-tratamentos visando reduzir o efeito de ruídos e ausência de linearidade. Para todas as variáveis em estudo, com exceção para o K, os modelos de calibração foram considerados bons por apresentarem valores de R^2 , tanto para calibração quanto para validação acima de 80%.

Palavras-chave: análises de solos, química verde, Amazônia.

Prediction of chemical and physical properties of Roraima soils by Near Infrared Spectroscopy

ABSTRACT

Soils testing are time consuming and costly to operate, and can generate as high toxicity residues for the people or environment. Near Infrared Spectroscopy is one good alternative to replace conventional techniques, because it is fast – 60 seconds by sample, without producing residues and applicable to all soil properties, like physics and chemical properties. The objective of this study was to evaluate the NIR technique in quantifying various Roraima soil properties. Eighty-four soil samples collected in XI RCC soil profiles were analyzed for K and Na available, organic carbon, total nitrogen, Si, Fe and Al oxides and sand and clay contents by conventional and NIR techniques. NIR spectra were obtained in the range of 10000 cm^{-1} to 4000 cm^{-1} , with spectral resolution of 4 cm^{-1} . With the all bands were adjusted by calibration and validation models submitted to pre-treatments with the purpose of reducing the noise effect and the absence of linearity. Except in relation to the available K, calibration models had R^2 values for calibration and validation above 80% for all other soil properties tested. It is concluded that the NIR technique had good predictive capacity of the soil properties tested, and can be used for any variable whose interpretation is obtained based on continuous value intervals.

Keywords: soil testing; green chemistry; Amazon.

Introdução

Propriedades do solo, como teores de carbono orgânico, de nitrogênio e cátions trocáveis, e suas características como classe textural e mineralogia, influenciam diretamente nos atributos relacionados a capacidade de uso da terra, servindo como indicadores de manejo do solo, além de contribuírem como ferramenta para classificação da aptidão agrícola, no dimensionamento das práticas de conservação de solo e água (WHITE, 2005) e para o manejo da fertilidade do solo.

Na classificação de solos, a classe textural e a mineralogia constituem características úteis para categorizar os solos em ordens, classes e subclasses. A classe textural é utilizada no primeiro nível categórico (Ordem) e a relação silte/argila, que expressa o grau de intemperismo do solo, é utilizada, por exemplo, na identificação de horizonte B incipiente (Bi). A mineralogia também determina a atividade de argila, a qual reflete muitas de suas propriedades químicas e físicas (OLIVEIRA, 2013). O grau de intemperismo, que pode ser expresso pelas relações K_i e K_r , também são utilizados no processo de classificação dos solos.

Nanni e Demattê (2006) demonstram que grande parte dos atributos avaliados em solos apresentam limitações para sua amostragem em larga escala devido a fatores como o tempo necessário desde a coleta das amostras até a obtenção do resultado final, com alto custo, a utilização de reagentes químicos e a problemática relacionada ao descarte dos resíduos gerados. Assim, o desenvolvimento e adaptação de métodos alternativos, mais baratos, rápidos e que minimizem a produção de resíduos devem ser priorizados (BELLINASSO et al., 2010).

Além disto, muitos sistemas de classificação das terras carecem da utilização de indicadores mais objetivos, com a finalidade de reduzir a subjetividade de suas interpretações (DELARMELINDA et al., 2011), o que pode ser alcançado com a adoção de regras booleanas simples nos sistemas de classificação (DELARMELINDA et al., 2014; WADT et al., 2015, 2016).

Portanto, a utilização de regras objetivas para avaliar a aptidão agrícola das terras (DELARMELINDA et al., 2014; WADT et al., 2015, 2016), associada a espectroscopia por infra-

vermelho próximo (NIR) como substituta aos métodos analíticos convencionais (FERNANDES et al., 2010), poderia produzir diagnósticos ambientais menos onerosos e mais rápidos.

Neste sentido, Fuentes et. al. (2012) em estudos com solos do México concluíram que a técnica NIR pode ser parcialmente utilizada com confiabilidade, em substituição às técnicas convencionais, para determinar teores de carbono e nitrogênio com R^2 de 0,98 e 0,85 respectivamente. Resultados semelhantes foram obtidos para solos do cerrado brasileiro que obtiveram coeficiente de regressão de 0,87 para carbono (SATO, 2013).

Em solos da bacia do Acre, a técnica NIR mostrou-se adequada para a estimativa do teor de carbono (RODRIGUES et al., 2016), apresentando, todavia, uma correlação menor quando da determinação de N, comparativamente aos valores estimados por meio da análise elementar (ALMEIDA et al., 2016).

Também em trabalhos de amostras de solos provenientes de Terra Preta de Índios, da região amazônica, Araújo et al. (2015) encontraram valor de R^2 de 0,72 para teor de carbono. Em outro trabalho, Franceschini et al. (2013) obtiveram valores de coeficientes de determinação de 92, 80 e 87% para argila, silte e areia, respectivamente.

Vislumbra-se, portanto, a possibilidade do uso da técnica NIR para tornar mais acessível e rápido a obtenção de informações sobre as propriedades dos solos, havendo, contudo, necessidade de se ajustar a técnica para solos do ambiente amazônico.

Portanto, objetivou-se com este trabalho avaliar o potencial da espectroscopia de refletância no NIR visando à obtenção de modelos de predição para variáveis físicas e químicas em solos representativos do estado de Roraima.

Materiais e Métodos

As amostras utilizadas no estudo correspondem as amostras dos perfis de solos da XI Reunião Brasileira de Classificação e Correlação de Solos, ocorrida em novembro de 2015, incluindo ordens de solos representativas dos principais ambientes pedológicos do Estado de Roraima, com variações quanto ao uso, ordem, classe textural e mineralogia. No total, foram selecionados treze perfis de distintas ordens pedológicas, em um total de 84 amostras quando se considerou os horizontes amostrados em cada um dos locais. Os perfis foram distribuídos entre as três principais regiões climáticas de Roraima (tipos Af, Am e Aw, segundo a classificação de Köppen). Na região sul do estado predomina o clima Af sob domínio de florestas tropicais úmidas, com chuvas abundantes e bem distribuídas ao longo do ano. Na região nordeste predomina o tipo climático Aw, com período seco de 4 meses, normalmente de dezembro a março (inverno no hemisfério boreal). A vegetação predominante são savanas. O tipo climático Am ocorre em um corredor florestal que sofre influência das savanas, da floresta úmida e dos altos relevos do norte de Roraima, sendo intermediário entre os climas Af e Aw, com precipitação menor que Af e semelhante ao clima Aw, porém com melhor distribuição.

Após coletadas nos perfis, as amostras foram embaladas e enviadas à Embrapa Solos, onde foram secas à temperatura ambiente, destorroadas e peneiradas em malha de 2 mm,

obtendo-se assim terra fina seca ao ar (TFSA). Posteriormente foram realizadas as determinações químicas, físicas e obtenção dos espectros NIR.

Análises químicas e físicas pelos métodos convencionais

Em cada amostra realizou-se as análises de potássio e sódio disponíveis por extração com Mehlich-1, carbono orgânico total (COT) e nitrogênio total (NT) pelos métodos de Walkley & Black e Kjeldahl, respectivamente, dióxido de Silício e óxido férrico e análises textural para a determinação dos teores de areia e argila, pelo método da pipeta. Os procedimentos para as análises foram realizados conforme Embrapa (2011).

Obtenção dos espectros NIR

Os perfis espectrais foram obtidos em espectrofotômetro de infravermelho próximo, aparelho da marca Perkin Elmer, modelo Spectrum com sistema de varredura FT-NIR com esfera de integração. Os espectros foram obtidos no intervalo de 10000 cm^{-1} a 4000 cm^{-1} , com resolução espectral de 4 cm^{-1} , totalizando 6000 pontos, sendo que cada espectro foi composto de 64 leituras na mesma amostra. O modo de leitura dos espectros foi dado por refletância.

Para tomada dos espectros, as alíquotas de solo seco e peneirado foram colocadas e distribuídas de forma homogênea em placas de Petri, a fim de que a superfície das amostras estivesse relativamente plana para as leituras. Para a calibração do aparelho e obtenção das leituras de refletância, utilizou-se uma placa de Spectralon como padrão de 100% de refletância. Para cada amostra, foram obtidas duas repetições ou dois espectros.

Construção do Modelo

Os espectros foram exportados e analisados no software Unscrambler® X Versão 10.2. Visando estudar a viabilidade dos dados e detectar possíveis amostras fora do padrão, foi aplicada análise de componentes principais (ACP) na matriz dos 168 espectros. As coordenadas dos pontos amostrais geradas a partir da ACP, chamadas de escores, foram formadas pelas combinações lineares das variáveis originais e pelos autovetores, os quais determinaram as dimensões do espaço gerado, ou as variáveis latentes obtidas. Como padrão para detecção de espúrios utilizou-se a elipse de Hotelling com um intervalo de confiança de 99%. Por meio dos resultados observados, todas as amostras foram utilizadas para construir o modelo de calibração e validação cruzada, uma vez que não foram detectados espúrios.

Para construção dos modelos de predição na etapa de calibração utilizou-se a regressão por mínimos quadrados parciais ("partial least squares regression", PLSR), que utiliza uma validação cruzada para determinar o número ótimo de fatores a serem adotados nos modelos (VISCARRA ROSSEL et al., 2009). Considerando a necessidade de uma validação externa, as amostras foram separadas ao acaso em dois grupos, sendo o primeiro de calibração, utilizado para construção do modelo 56 amostras e o segundo de validação com 28 amostras.

Antes da obtenção dos modelos de quantificação, aplicaram-se tratamentos nos dados espectrais com o intuito de reduzir o efeito de ruídos e ausência de linearidade. Foram

Antes da obtenção dos modelos de quantificação, aplicaram-se tratamentos nos dados espectrais com o intuito de reduzir o efeito de ruídos e ausência de linearidade. Foram testadas diferentes transformações - SNV ("standard normal variate") e MSC ("multiple scattering correction") - amplamente empregadas no tratamento de dados espectrais, conforme proposto por Viscarra-Rossel (2008), assim como a centralização dos valores de acordo com a média, antes da aplicação das transformações.

Por se tratarem de variáveis físicas, os espectros para a modelagem das variáveis areia e argila não sofreram pré-tratamentos, pois parte-se do princípio de que o espalhamento provocado pelo tamanho das partículas trata-se de informação espectral que deve ser considerada no momento de obtenção do modelo. Para a escolha dos modelos a serem utilizados, adotaram-se os seguintes critérios: avaliar os

resultados da validação cruzada, realizada com o conjunto de validação (VISCARRA-ROSSEL et al., 2009): o coeficiente de determinação (R^2), a raiz quadrada do erro médio ao quadrado (RMSE), a variância explicada e número de fatores e os carregamentos.

Resultados e Discussão

Características dos solos estudados

Os solos, oriundos de dois ecossistemas amazônicos conhecidos como savana amazônica e mata e que predominam em Roraima, apresentam ampla dispersão dos valores das características químicas e físicas de seus horizontes, cujos valores mínimos e máximos demonstram diversidade dos atributos e contribuem para garantir a variabilidade das amostras utilizadas (Tabela 1).

Tabela 1. Valores máximos e mínimos das variáveis em estudo dentro das diferentes classes e perfis de solo. / **Table 1.** Maximum and minimum values of the variables under study within the different classes and soil profiles.

	Areia	Argila	Carbono orgânico total	Nitrogênio total	Óxido de Silício (SiO ₂)	Óxido de Ferro (Fe ₂ O ₃)	Potássio	Sódio
	g kg ⁻¹				cmol _c kg ⁻¹			
Mínimo	8,00	20,00	0,20	0,10	17,00	3,00	0,01	0,01
Máximo	974,00	764,00	33,20	3,00	285,00	230,00	0,32	6,38

Espectros e qualidade do modelo de calibração

Os espectros originais e aqueles que receberam tratamento, relativo as 84 amostras de solos, indicaram a presença de bandas harmônicas e de combinação dos diferentes constituintes do solo (Figuras 1A e 1B). Apesar da confusão atribuída a combinação das bandas de diferentes constituintes, algumas podem ser identificadas por comparação das informações disponíveis na literatura e das características químicas do atributo de interesse.

Para os constituintes com ligações polares (CH, OH, SH, NH, H₂O, entre outras), o reconhecimento de bandas foi obtido por

analogia com outras substâncias que possuem as mesmas estruturas químicas: os picos de absorção a 7000 cm⁻¹ e 5250 cm⁻¹ foram atribuídos às vibrações das moléculas de água e dos grupos OH. Os picos na faixa de 4.500 cm⁻¹ a 4.350 cm⁻¹ foram atribuídos à composição mineralógica dos solos, onde o pico em 4500 cm⁻¹ indicou a presença de caulinita (FERRARESI, 2010). Para os teores de carbono orgânico e nitrogênio total em solos foi considerado os picos associados por vibrações ou estiramentos das ligações químicas específicas dos grupos CO, CH, OH, e NH, nas bandas de absorção, conforme já realizado por Marchão et al. (2011).

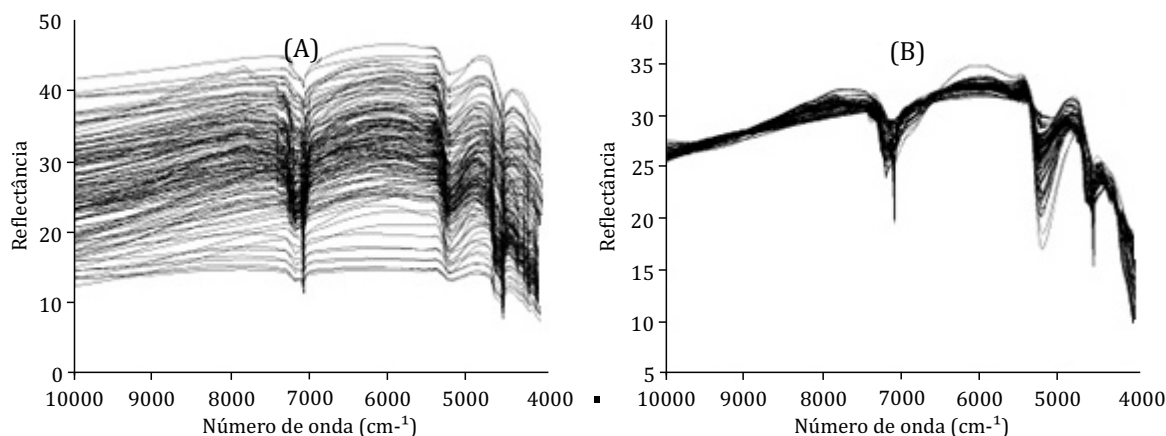


Figura 1. Espectros das amostras de diferentes perfis de solo coletados no estado de Roraima, sendo A o espectro original das amostras e B o espectro após tratamento pelo método SNV. **Figure 1.** Spectra of the samples of different soil profiles collected in the state of Roraima, A being the original spectrum of the samples and B the spectrum after treatment by the SNV method.

A análise de componentes principais (ACP) indicou que as duas primeiras componentes (PC-1 e PC-2) explicou 89% da variabilidade total dos solos. Avaliando-se a dispersão dos espectros pela Elipse de Hotelling (gráfico de controle da distribuição T² de Hotelling), nota-se que dois espectros se

destacaram dos demais, os quais poderiam ser considerados "outliers". Todavia, a análise mais detalhada desses espectros mostra que ambos foram oriundos de repetições de uma mesma amostra de solo, e que correspondiam a amostra de solo de classe e perfil compatíveis com o desvio observado, não

podendo desta forma serem considerados “outliers”, motivo pelo qual foram mantidas no modelo de calibração (Figura 2).

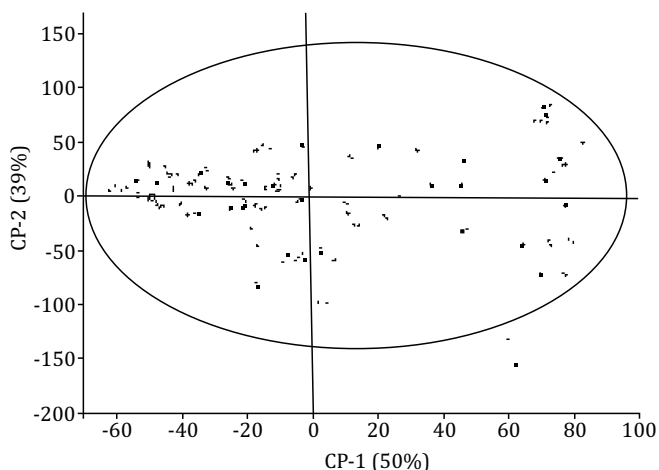


Figura 2. Gráfico “biplot” resultante da análise de componentes principais (PCA) com as coordenadas das 168 amostras e elipse de “Hotelling” com intervalo de confiança de 99%. **Figure 2:** Biplot graph resulting from principal component analysis (PCA) with the coordinates of the 168 samples and Hotelling ellipse with a confidence interval of 99%.

Os valores das correlações medidos pelos métodos de referência e os preditos para as variáveis em estudo, com exceção para o K, foram considerados bons por apresentarem valores de R^2 , tanto para calibração quanto para validação, acima de 80% (Figuras 3A a 3F). O coeficiente de determinação (R^2) elevado indica que os modelos PLSR-NIR estimaram as concentrações das variáveis com boa precisão.

Analisando as variáveis COT e NT, observa-se que no caso do COT os valores obtidos pelo modelo na validação cruzada (R^2_{val} de 90%) foram menores (Figura 3A) que os obtidos por outros autores (JACONI, 2011; SOUZA et al., 2012), embora sejam relativamente altos e condizentes com estudos realizados por Madari et al. (2005) e Marchão et al. (2011). Já McCarty et al. (2002) e Reeves et al. (2006) também encontraram valores semelhantes, porém estes autores destacam que a técnica utilizando o infravermelho médio (MIR) foi mais eficiente que o NIR. Embora os dois estudos reconheçam que as ambas as técnicas (MIR e NIR) foram eficientes na determinação do COT e do NT solo. Tal fato explica-se pelas características de absorção da energia nos sobretons e combinações nas bandas de grupos como CH, NH e OH em espectros de NIR, se comparado a espectros mais detalhados em MIR.

O mesmo comportamento foi observado para o NT (Figura 3B). O modelo de calibração apresentou valores satisfatórios, com R^2_{val} de 87%, próximos aos obtidos por Takuya et al. (2001); He et al. (2007); Fidencio et al. (2008), e Jarquin-Sanchez et al. (2011). Tanto no caso do COT quanto NT, os melhores ajustes observados foram resultantes da homogeneidade dos solos usados para criação do modelo, diferentemente dos solos que estão sendo estudados neste trabalho, que são oriundos de diferentes classes de solos no estado de Roraima. O mesmo desempenho da técnica NIR foi também obtida por Rodrigues et al. (2016) e Almeida et al. (2016), em solos da bacia do Acre, respectivamente para carbono e nitrogênio.

Quanto a determinação dos teores de areia e argila do solo (Figuras 3C e 3D) os valores obtidos no modelo de calibração foram próximos aos obtidos por Ferraresi et al. (2012), de R^2_{val} de 82% e R^2_{val} de 84%, respectivamente e também dos resultados obtidos por Franceschini et al. (2013). Estes resultados foram superiores aos encontrados por Chang et al.

(2001) em NIR (argila = 0,67 e areia = 0,82) e inferiores aos coeficientes alcançados por Madari et al. (2006) utilizando infravermelho próximo (argila = 96% e areia = 99%).

As bandas em torno de 7.000 cm^{-1} em geral foram resultantes dos estiramentos de hidroxilas (Figura 1), o que pode indicar a presença de fenóis, álcoois e hidróxidos de alumínio; estes últimos compõem argilominerais, como caulinita e montmorillonita.

A elevada correlação entre os dados medidos pelo método padrão e aqueles preditos pela espectroscopia, por meio de modelos de calibração construídos com todas as amostras coletadas, de diferentes classes texturais e taxonômicas nos solos de Roraima, indica que é plausível a construção de modelos robustos para uso em análise granulométrica do solo. A validação externa comprova essa robustez, já que a predição dos valores de argila e areia foram similares àqueles observados pelo método padrão.

No caso dos cátions trocáveis (Na e K) (Figura 3E e 3F), não foi possível obter estimativas adequadas dos teores de K pela técnica NIR, dado que o coeficiente de determinação para os dados de validação foi baixo (R^2_{val} de 35%). Tal fato também foi observado por Cozzolino e Moron (2003) e Islam et al. (2004). O resultado provavelmente esteve associado a características de detecção do NIR, que leva em conta a polaridade de moléculas com CH, OH, NH, SH, entre outras, e os cátions K e Na não possuem polaridade, ficando invisíveis no NIR. No caso do Na o alto valor de R^2_{val} (91%) pode ter sido associado a presença de altas concentrações de Na em solos das savanas de Roraima, o que resultou em um efeito de concentrações altas do elemento, onde poucos pontos com valores muito pronunciados foram determinantes, indicando a necessidade maior pressão de amostragem para a estimativa deste elemento pela técnica testada.

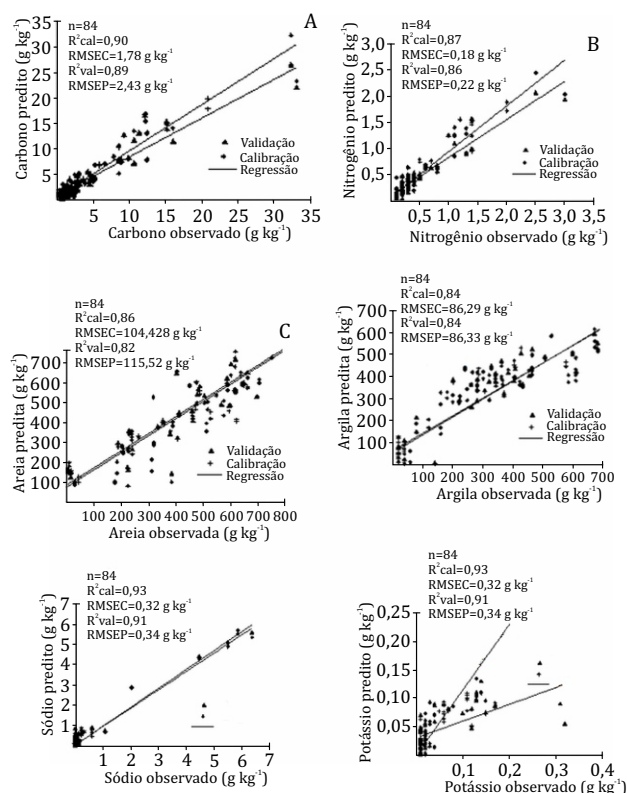


Figura 3. Modelos de calibração para carbono orgânico (A), nitrogênio total (B), areia (C), argila (D), sódio (E), potássio (F), dióxido de silício (G) e óxido férrico (H) em solos de Roraima. / **Figure 3.** Calibration models for organic carbon (A), total nitrogen (B), sand (C), clay (D), sodium (E), potassium (F), silicon dioxide (G) and ferric oxide (H) in soils of Roraima.

A boa capacidade preditiva de várias características do solo pelo uso da técnica NIR poderia ser associada a sistemas de interpretação destas mesmas variáveis, permitindo a utilização ampla desta tecnologia para fins práticos, como a interpretação da capacidade de uso da terra ou da fertilidade dos solos, contribuindo para maior redução nos custos da avaliação das terras para fins agrícolas ou de manejo com propósitos conservacionistas.

Conclusões

A técnica NIR resultou em estimativas satisfatórias com exatidões próximas à metodologias de referência para a maioria das propriedades e características dos solos avaliadas (classe textural, mineralogia, teores de carbono e nitrogênio, sódio trocável), exceto para a estimativa do teor de K trocável em solos.

A boa estimativa para o teor de Na trocável no solo pode ter sido um resultado anômalo associado aos elevados teores deste cátion em algumas amostras dos solos.

Referências Bibliográficas

- ALMEIDA, G. AD V.; SILVA, L. M.; MARCHÃO, R. L.; WADT, P. G. S.; SOUZA, A. M.; OLIVEIRA, L. C. Métodos Kjeldahl, elementar e o potencial da espectroscopia do infravermelho próximo para determinação de nitrogênio em solos da bacia do Acre. **Biota Amazônia**, v. 6, n. 4, p. 38-43, 2016.
- ARAÚJO, S. R.; SODERSTROM, M.; ERIKSSON, J.; ISENDAHL, C. STEMBOG, P.; DEMATTÊ, J. A. M. Determining soil properties in Amazonian Dark Earths by reflectance spectroscopy. **Geoderma**, v. 237-238, p. 308-317, 2015.
- BARBOSA, R. I. Distribuição das chuvas em Roraima. In: BARBOSA, R. I.; FERREIRA, E. J. G.; CASTELÓN, E. G. (eds.) **Homem, ambiente e ecologia no Estado de Roraima**. Instituto Nacional de Pesquisas da Amazônia, Manaus, Amazonas. p. 325-335, 1997.
- BELLINASSO, H.; DEMATTÊ, J. A. M.; ROMEIRO, S. A. Soil spectral library and its use in soil classification. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 34, n. 3, p. 861-870, 2010.
- CHANG, C. W.; LAIRD, D. A.; MAUSBACH, M. J.; HURBURGH, C. R. J. Near-infrared reflectance spectroscopy-principal components regression analyses of soil properties. **Soil Science Society America Journal**, v. 65, p. 480-490, 2001.
- COZZOLINO, D.; MORON, A. The potential of near-infrared reflectance spectroscopy to analyse soil chemical and physical characteristics. **Journal of Agricultural Sciences**, v. 140, n. 1, p. 65-71, 2003.
- DELARME LINDA, E. A.; WADT, P. G. S.; ANJOS, L. H. C.; MASUTTI, C. S. M.; SILVA, E. F.; SILVA, M. B. E.; COELHO, R. M.; SILVA, L. M.; SHIMIZU, S. H.; COUTO, W. H. Aplicação de sistemas de avaliação da aptidão agrícola das terras em solos do Estado do Acre, Amazônia. **Biota Amazônia**, v. 4, n. 2, p. 87-95, 2014.
- DELARME LINDA, E. A.; WADT, P. G. S.; ANJOS, L. H. C.; MASUTTI, C. S. M.; SILVA, E. F.; SILVA, M. B. E.; COELHO, R. M.; SHIMIZU, S. H.; COUTO, W. H. Avaliação da Aptidão Agrícola dos Solos do Acre por Diferentes Especialistas. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 35, p. 1841-1853, 2011.
- EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA - EMBRAPA. Centro Nacional de Pesquisa de Solos. **Manual de métodos de análise de solo**. 2ª ed. Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 2011.
- FERNANDES, F. A.; FERNANDES, A. H. B. M.; BUENO SOBRINHO, A. A.; MONTEIRO, H. C.; SILVA, A. C. G. Uso de espectrometria de refletância no infravermelho próximo (NIRS) na análise de carbono de Neossolos do Pantanal. Comunicado Técnico, ISSN 1981-7231, dezembro 2010. Disponível em <http://www.cpap.embrapa.br/publicacoes/online/COT86.pdf> (Acesso em 10/02/2015).
- FERRARESI, T. M. **Espectroscopias de infravermelho próximo e médio na quantificação de atributos do solo, com ênfase na matéria orgânica e na biomassa microbiana**. 2010. 120 f. Dissertação (Mestrado) Instituto de Química de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2010.
- FERRARESI, T. M.; SILVA, W. T. L.; MARTIN-NETO, L.; SILVEIRA, P. M.; MADARI, B. E. Espectroscopia de infravermelho na determinação da textura do solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 36, n. 6, p. 1769-1777, 2012.
- FIDENCIO H. P.; POPPI, R. J.; ANDRADE, J. C.; ABREU M. F. Use of radial basis function networks and near-infrared spectroscopy for the determination of total nitrogen content in soils from Sao Paulo State. **Analytical Sciences**, v. 24, n. 7, p. 945-948, 2008.
- FRANCESCHINI, M. H. D.; DEMATTÊ, J. A. M.; SATO, M. V.; VICENTE, L. E. V.; GREGO, C. R. Abordagens semiquantitativa e quantitativa na avaliação da textura do solo por espectroscopia de refletância bidirecional no VIS-NIR-SWIR. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 48, n. 12, p. 1569-1582, 2013.
- FUENTES, HIDALGO, C.; GONZALEZ-MARTIN, I.; HERNADEZ-HIERRO, J. M.; GOVAERTS, B.; SAYRE, K. D.; ETHEVERS, J. NIR spectroscopy: An alternative for soil analysis. **Communications in soil science and plant analysis**, v. 43, p. 346-356, 2012.
- HE, Y.; HUANG, A. M. PEREIRA, G.; GÓMEZ H. A.; SONG, H. Prediction of soil macronutrients content using near-infrared spectroscopy. **Computers and Electronics in Agriculture**, v. 58, n. 2, p. 144-153, 2007.
- ISLAM, K.; SINGH, B.; MCBRATNEY, A. B. Simultaneous estimation of various soil properties by ultra-violet, visible and near-infrared reflectance spectroscopy. **Australian Journal of Soil Research**, v. 41, p. 1101-1114, 2003.
- JACONI, A. **O uso da espectroscopia no infravermelho próximo na quantificação de carbono em solos sob cultivo de cana-de-açúcar**. 2011. 52 f. Dissertação (Mestrado) Centro de Energia Nuclear na Agricultura, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2011.
- JARQUIN-SANCHEZ, A.; SALGADO-GÁRCIA, S.; PALMA-LÓPEZ, D.; CAMACHO-CHIU, W. GUERRERO-PENA, A. Análisis de nitrógeno total en suelos tropicales por espectroscopia de infrarrojo cercano (NIRS) y quimiometría. **Agrociencia**, v. 45, n. 6, p. 653-662, 2011.
- MADARI, B. E.; REEVES, J. B. III; COELHO, M. R.; MACHADO, P. L. O. A.; DE-POLLI, H.; BENITES, V. M.; SOUZA, L. F.; MCCARTY, G. W. Mid and near infrared spectroscopic determination of carbon in diverse set of soil from the Brazilian National Soil Collection. **Spectroscopy Letters**, v. 38, p. 721-740, 2005.
- MADARI, B. E.; REEVES, J. B.; MACHADO, P. O. A.; GUIMARÃES, C. M.; TORRES, E.; MCCARTY, G. W. Mid and near-infrared spectroscopic assessment of soil compositional parameters and structural indices in two Ferrasols. **Geoderma**, v. 136, p. 1-15, 2006.
- MARCHÃO, R. L.; BECQUER, T.; BRUNET, D. Predição dos teores de carbono e nitrogênio do solo utilizando espectroscopia de infravermelho próximo. Planaltina, DF: Embrapa Cerrados, 2011, 21 p.
- MCCARTY, G. W.; REEVES, J. B.; REEVES, V. B. III; FOLLETT, R. F.; KIMBLE, J. M. Mid-infrared and near-infrared diffuse reflectance spectroscopy for soil carbon measurement. **Soil Science Society of America Journal**, v. 66, p. 640-646, 2002.
- NANNI, M. R.; DEMATTÊ, J. A. M. Spectral reflectance methodology in comparison to traditional soil analysis. **Soil Science Society of America Journal**, v. 70, p. 393-407, 2006.
- OLIVEIRA, V. A. Relações solo-paisagem entre os municípios de Cruzeiro do Sul e Rio Branco, no Estado do Acre. In: ANJOS, L. H. C.; SILVA, L. M. da; WADT, P. G. S.; LUMBRERAS, J. F.; PEREIRA, M. G. (Ed.) **Guia de Campo da IX Reunião Brasileira de Classificação e Correlação de Solos**. Brasília: Embrapa, 2013. p. 131-146.
- REEVES, J. B., III; FOLLETT, R. F.; MCCARTY, G. W.; KIMBLE, J. M. Can near or mid-infrared diffuse reflectance spectroscopy be used to determine soil carbon pools? **Commun. Soil Science Plant Analysis**, v. 37, p. 2307-2325, 2006.
- RODRIGUES, M. J. M.; SILVA, L. M.; MARCHÃO, R. L.; SOUZA, A. M.; WADT, P. G. S.; OLIVEIRA, L. C. Espectroscopia no infravermelho próximo para a quantificação de carbono em solos da bacia do Acre. **Biota Amazônia**, v. 6, n. 1, p. 119-124, 2016.
- SATO, J. H. **Método para determinação do carbono em solos dos cerrados**. 2013. 120 f. Dissertação (Mestrado) Universidade de Brasília, Brasília, Distrito Federal, 2013.
- SOUZA, D. M.; MADARI, B. E.; GUIMARAES, F. F. Aplicação de técnicas multivariadas e inteligência artificial na análise de espectros de infravermelho para determinação de matéria orgânica em amostras de solos. **Química Nova**, v. 35, n. 9, p. 1738-1745, 2012.
- TAKUYA O.; T. KONOSHIN; N. KOSUKE; I. YOSHINOBU. Rapid determination of miso quality using near infrared spectroscopy. **Bulletin of the Hyogo Prefectural Agric. Institute**. Agriculture Section, v. 49, n. 2, p. 9-13, 2001.
- VARMUZA, K.; FILZMOSER, P. **Introduction to multivariate statistical analysis in chemometrics**. Boca Raton: CRC Press, 2009.
- VISCARRA-ROSSEL, R. A. Parles: Software for chemometric analysis of spectroscopic data. **Chemometrics and Intelligent Laboratory Systems**, v. 90, p. 72-83, 2008.
- VISCARRA-ROSSEL, R. A.; CATTLE, S. R.; ORTEGA, A.; FOUAD, Y. In situ measurements of soil colour, mineral composition and clay content by Vis-NIR spectroscopy. **Geoderma**, v. 150, p. 253-266, 2009.
- WADT, P. G. S.; COUTO, W. H.; DELARME LINDA, E. A.; ANJOS, L. H. C.; PEREIRA, M. G. Avaliação da aptidão agrícola das terras em solos sedimentares associados a argilas de alta atividade da Amazônia Sul-Occidental. **Biota Amazônia**, v. 6, p. 55-59, 2016.
- WADT, P. G. S.; DELARME LINDA, E. A.; COUTO, W. H.; ANJOS, L. H. C.; PEREIRA, M. G. Validação de sistema de aptidão agrícola das terras em projeto de assentamento de Sena Madureira, Acre. **Biota Amazônia**, v. 5, p. 68-77, 2015.
- WHITE, R. E. **Principles and practice of soil science: the soil as a natural resource**. 4th ed. Oxford: Blackwell, 2005.