

## Combinação de métodos de sensoriamento proximal e parâmetros topográficos para caracterização da variabilidade espacial do solo

Julyane Vieira Fontenelli <sup>1</sup>  
Bruna Cristina Gallo <sup>1</sup>  
Marcos Antônio Neris Coutinho <sup>1</sup>  
José Alexandre Melo Demattê <sup>2</sup>  
Paulo Sérgio Graziano Magalhães <sup>1</sup>

<sup>1</sup> Universidade Estadual de Campinas  
Caixa Postal 6011 – 13083-970 - Campinas - SP, Brasil  
{julyane, graziano, marcos.antonio}@feagri.unicamp.br  
gallo.bruna@gmail.com

<sup>2</sup> Universidade de São Paulo – USP/ESALQ  
Caixa Postal 9 – 13418-900 - Piracicaba - SP, Brasil  
jamdemat@usp.br

**Abstract.** The characterization of the spatial variability of production factors is essential for the management localized of productive areas, as required for precision agriculture (PA). Thus, the hypothesis of the work is that variations in topographic attributes cause significant changes in the apparent electrical conductivity and spectral characteristics of the soil, providing the use of relief as an information plan in the sampling directed to the construction of spectral models of soil attributes. The objective of this study was to evaluate the use of the apparent electrical conductivity of the soil to targeted the calibration samples of the spectral models to quantify the physical and chemical attributes of the soil and its relation with the variation of the topographic parameters in the field. For that, 34 soil samples were collected at 0-0.20 m depth, in an area of 100 ha, belonging to the Santa Fé mill, in Tabatinga, State of São Paulo, Brazil. Soil spectra were measured using a commercially available spectrophotometer FieldSpec 4, in the range of 350 2500 nm (Vis - NIR -SWIR), with three replicates for each sample. The topographic data were obtained from the DEM - Topodata. Then, using radiometric information, principal component analysis (PCA) and regression models were generated by partial least squares (PLS) as multivariate analysis technique to correlate wavelength information with each constituent and to estimate the soil attributes. The physical and chemical soil properties vary along the slope, this differentiation was detected via electromagnetic spectrum. It appears that the DRS can assist in determining soil properties and knowledge of the soil spatial variability, adding new information to management practices in precision agriculture.

**Palavras-chave:** soil spectroscopy, digital elevation model, directed sampling, precision agriculture, espectroscopia de solo, modelo digital de elevação, direcionamento de amostragem, agricultura de precisão.

### 1. Introdução

A adoção de práticas de gestão em agricultura de precisão (AP), permite aprimorar a gestão das áreas agrícolas, por meio de informações da variabilidade espacial e temporal das lavouras, visando a melhoria do desempenho produtivo da cultura, a racionalização do uso de insumos e a diminuição dos impactos ao meio ambiente (CORÁ et al., 2004; MOLIN et al., 2010). Entretanto, o custo e o trabalho relacionados ao aumento da densidade amostral para a caracterização dos atributos do solo, para fins de AP são fatores que limitam a capacidade de representação da variabilidade espacial das propriedades do solo encontradas a campo, podendo levar à tomada de decisão inadequada, pois o erro de predição espacial contido nas informações dos mapas com baixa densidade amostral eleva a variabilidade espacial, uma vez que são realizadas aplicações de doses inadequadas de corretivos e fertilizantes.

Dentre as alternativas para a quantificação dos atributos do solo em alta densidade amostral, as pesquisas têm sido direcionadas para a utilização de técnicas de espectroscopia de reflectância difusa (ERD). A maioria dos estudos de ERD em solos, utilizam as medições nos comprimentos de onda do visível (VIS), infravermelho próximo (NIR) e infravermelho médio

(MIR), para prever a composição química e mineral dos solos em nível de campo e laboratorial, com escala adequada ao manejo agrícola, possibilitando avaliações mais rápidas e menos onerosas no estudo dos solos (CEZAR et al., 2013; ARMENTA e GUARDIA, 2014). Contudo, observa-se uma grande amplitude de variação na precisão dos modelos de predição das propriedades químicas do solo (STENBERG et al., 2010; VISCARRA ROSSEL et al., 2011). De acordo com McBratney et al. (2006) baixos desempenhos dos modelos de predição, podem ser resultados de um número insuficiente de amostras de calibração representativas dos locais específicos de variabilidade espacial dos atributos do solo na área de estudo.

Com o intuito de identificar a variabilidade espacial do solo, Wetterlind et al. (2010), utilizaram imagens de satélite e valores de condutividade elétrica aparente (CEa) do solo para direcionar a amostragem de calibração dos modelos espectrais. Em adição Artur et al. (2014), relataram a importância da utilização do relevo para o entendimento da variabilidade espacial do solo. O relevo atua diretamente na heterogeneidade da disponibilidade de nutrientes devendo ser considerado na definição de áreas homogêneas para manejo diferenciado do solo e da cultura.

O conhecimento dos níveis de condutividade elétrica do solo, determinada sem limitação de densidade amostral, permite correlação com outros fatores do solo onde sua variação espacial e temporal pode ser atribuída às variações nos teores de água, de argila, de sais dissolvidos no solo (AUERSWALD et al., 2001) Diversas pesquisas apontam que a CEa do solo está relacionada às condições topográficas locais, sendo que em áreas de menor altitude a condutividade é maior se comparada com áreas de maior altitude, sendo estas diferenças atribuídas aos efeitos combinados do acúmulo de água e sais nas áreas de menor declividade.

Desse modo, a utilização da CEa do solo e informações do relevo solo podem ser utilizadas para direcionamento das amostras de calibração dos modelos espectrais representativas da variabilidade espacial do solo. Assim, a hipótese do trabalho é que as variações nos atributos topográficos provocam mudanças significativas na condutividade elétrica aparente e nas características espectrais do solo, proporcionando a utilização do relevo como plano de informação na amostragem direcionada para construção de modelos espectrais de atributos do solo. Objetivou-se avaliar o uso da condutividade elétrica aparente do solo para direcionar as amostras de calibração dos modelos espectrais para quantificação de atributos físicos e químicos do solo e sua relação com a variação dos parâmetros topográficos no terreno.

## 2. Metodologia de Trabalho

Para a realização desta pesquisa foi necessário a aquisição de informações espectrais, topográficas e de CEa do solo da área de estudo localizada na Usina Santa Fé, município de Tabatinga, situada na região central do Estado de São Paulo, Brasil, correspondendo a um total de 100 hectares. O clima da região é classificado como Aw (KOPPEN e GEIGER, 1928), tropical chuvoso, com inverno frio e seco, com altitude variando de 450 a 540 m. O uso do solo na região é predominantemente agrícola, com potencial destaque à cultura da cana-de-açúcar.

A CEa do solo da área experimental foi mensurada utilizando o sensor EM38-MK2® (Geonics, Mississauga, Ontário, Canadá) conectado a um receptor GPS (Juno 3B, Trimble). Os dados foram analisados, removendo-se valores discrepantes da amostra (outliers) para posterior geração de mapas de superfícies por interpolação utilizando a krigagem ordinária. Assim, foram demarcados 34 pontos de amostragem com base na variabilidade espacial da Cea do solo (Figura 1).

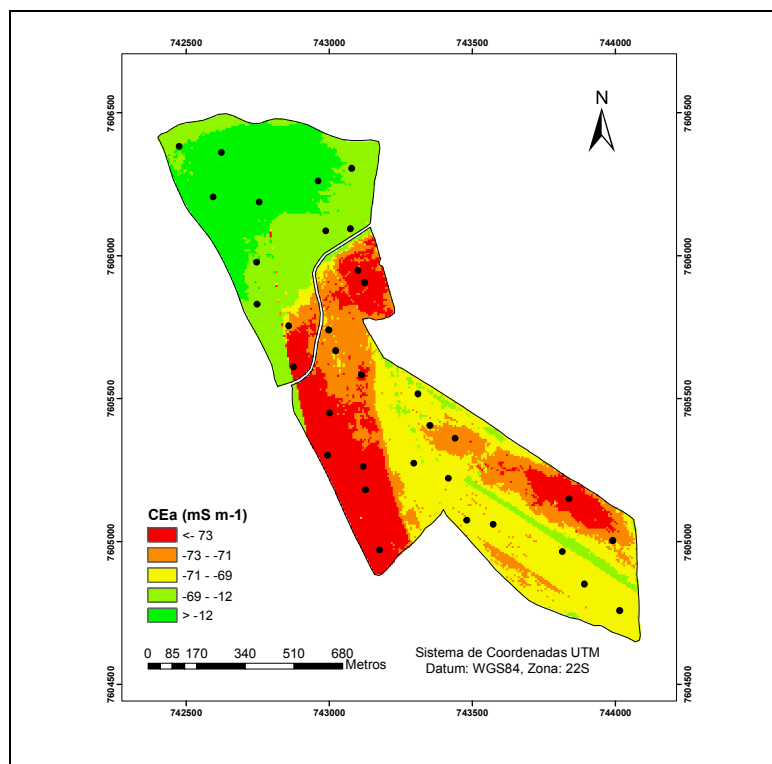


Figura 1. Direcionamento da amostragem de solo baseado na variabilidade espacial da condutividade elétrica aparente do solo.

As amostras de terra foram coletadas na camada de 0 – 0,20 m de profundidade do solo (horizonte A), com o auxílio do trado tipo holandês e georreferenciada com um receptor GPS Trimble Juno 3B. Após a coleta de solo, as amostras foram secas em estufa de circulação forçada de ar a 45°C por um período de 24 horas e peneiradas em malha de 2 mm. Em seguida, as amostras foram encaminhadas para a realização de análises física e químicas em laboratório.

A composição granulométrica do solo foi obtida através do método do densímetro (CAMARGO et al., 1986) e classificadas em arenosa (de 100 a 150 g kg<sup>-1</sup> de argila), médio-arenosa (150 a 250 g kg<sup>-1</sup> de argila), médio-argilosa (250 a 350 g kg<sup>-1</sup> de argila), argilosa (350 a 650 g kg<sup>-1</sup> de argila) e muito argilosa (maior que 650 g kg<sup>-1</sup> de argila), conforme Demattê e Demattê (2009). As análises de matéria orgânica (MO) e capacidade de troca catiônica (CTC) foram realizadas segundo serão realizadas segundo (RAIJ et al., 1997)

Os espectros do solo foram obtidos utilizando um espectrômetro comercial FieldSpec 4, (*Analytical Spectral Devices, Inc., ASD, Boulder, Colorado, USA*), cuja resolução espectral é de 1 nm nos comprimentos de onda de 350 a 1.100 nm e de 2 nm nos comprimentos que vão de 1.100 a 2.500 nm, com 3 repetições para cada amostra. Em seguida, os espectros foram transformados de refletância (R) para absorvância ( $\log(1/R)$ ) e centrados na média. A PCA (*Principal Component Analysis*) e a regressão por mínimos quadrados parciais (PLS) dos dados espectrais foi realizada no *software* Pirouette versão 3.11. As amostras foram separadas aleatoriamente em conjunto de dados para calibração do modelo (24 amostras) e um conjunto de dados para a validação externa (10 amostras).

A qualidade da calibração desenvolvida foi avaliada com o coeficiente de determinação (R<sup>2</sup>) de valores medidos versus previsto, o erro médio quadrático de predição (RMSE), e com RPD (*Relative Percent Deviation*). O RMSE tem as mesmas unidades que a variável dependente e indica o erro em valores absolutos.

O modelo digital de elevação (MDE) foi obtido da base de dados topodata do INPE (Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais) com resolução espacial de 30 m, conforme

Valeriano (2005). Para processamento do MDE, utilizou-se o *software* ArcGis (ESRI, 2010), com aplicação da função *Topo to raster*, módulo *3D Analyst*. A partir do MDE, geraram-se os mapas de declividade e curvatura horizontal. Os atributos topográficos foram classificados conforme EMBRAPA (1999). O coeficiente de correlação de Pearson entre os escores obtidos da PCA e os valores de declividade do terreno foram determinados para avaliar a relação existente entre a variabilidade dos dados espectrais, representada em cada componente principal (PC) e a variação do relevo. Além disso, os teores de argila, MO e CTC foram especializados na área de estudo utilizando o interpolador krigagem ordinária no *software* ArcGis.

### 3. Resultados e Discussão

A distribuição espacial dos atributos topográficos obtidos pela utilização do MDE influenciou a distribuição espacial das propriedades do solo analisadas (Figura 2). A topossequência da área de estudo apresenta altitude variando de 462 a 522 metros (Figura 2a). A declividade foi subdividida de plano a ondulado, com predominância da classe suave ondulado (Figura 2b). A variabilidade dos atributos físicos do solo é relacionada ao gradiente de declividade (LEÃO et al., 2011). Assim, a inclinação do terreno favorece o acúmulo de argila (Figura 2d), matéria orgânica (Figura 1e) e maiores teores de CTC (Figura 2f) nas áreas de menor altitude (ARTUR et al., 2014) e com declividade caracterizada como suave ondulada.

Em relação a curvatura horizontal nota-se maior predominância da classe divergente, seguida pelas subdivisões planar e convergente (Figura 2c). De acordo com Artur et al. (2014) a curvatura horizontal está relacionada ao fluxo de água, proporcionando a criação de zonas com variações nas propriedades do solo, interferindo no movimento de bases. Os maiores valores de CTC foram observados nos locais de maiores teores de MO e argila. Esses atributos contribuem para o aumento de superfície específica do solo, proporcionando maior retenção de nutrientes.

Além disso, observa-se uma homogeneidade na distribuição espacial da CTC em terrenos planos e com maiores altitudes. Entretanto, as áreas mais planas (Figura 2b) e de maior altitude são caracterizadas por solos com diferentes classificações texturais, apresentando textura média arenosa ( $150 - 250 \text{ g kg}^{-1}$ ), média argilosa ( $250 - 350 \text{ g kg}^{-1}$ ) e teores diferentes de matéria orgânica, indicando que a heterogeneidade da curvatura horizontal pode influenciar na distribuição espacial desses atributos no solo. Esses resultados evidenciam a utilização de parâmetros topográficos na delimitação de zonas homogêneas para direcionamento de amostragens de solo.

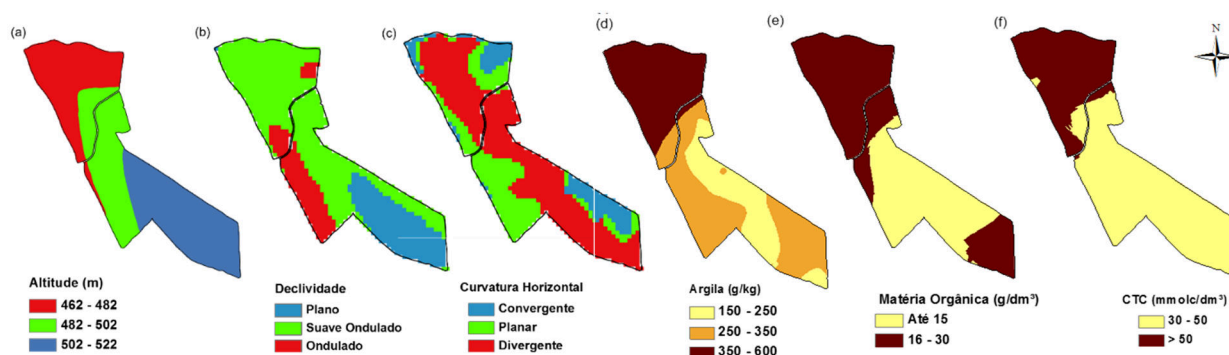


Figura 2. Atributos topográficos (a) altitude, (b) declividade, (c) curvatura horizontal e propriedades do solo (a) argila, (b) matéria orgânica e (c) capacidade de troca catiônica (CTC) do solo.

Além disso, realizou-se um PCA para identificar se a ERD fornece informação suficiente para delimitação das classes de declividade (Figura 3). A PCA foi eficiente na discriminação espectral da declividade do terreno, observa-se que a PC1 e a PC2 explicam 99,34%

variabilidade dos dados. Isso indica, que as variações no relevo provocam mudanças significativas nas características espectrais do solo.

A PC2, apesar de representar somente 1,31% da variabilidade dos dados distinguiu o relevo ondulado das classes plano e suave ondulado (Figura 3a), o que indica que a informação radiométrica contém dados que podem explicar a declividade do solo. Esses resultados podem ser comprovados pela análise de correlação entre os escores dos PC's e a declividade do terreno, onde a PC2 apresentou a maior correlação negativa e significativa à 5% de probabilidade com a declividade do solo (Tabela 1).

Na PCA os escores sintetizam as variações entre as amostras espectrais e os pesos representam as regiões do espectro que causam essas variações entre as amostras (DEMATTE et al., 2017).

Os pesos entre as variáveis e as PC's permitem caracterizar os comprimentos de onda que mais discriminaram a classificação da declividade do solo (Figura 3b). Na PC2 as bandas com pesos inferiores a 0 representam a maior variação. Assim, as bandas mais influenciadas pela declividade do solo são as relacionadas com a presença de argilominerais (1400, 1900 e 2200 nm) (MENESES e MADEIRA NETTO, 2001). Isso indica que a resposta espectral da declividade do solo ocorre de acordo com a distribuição da argila. O que pode ser comprovado pela distribuição espacial da declividade (Figura 2b) e argila (Figura 2d) na área de estudo, onde as áreas com declividade do tipo suave ondulado e de menor altitude (Figura 2a) tem maiores teores de argila, o qual decresce nas áreas de relevo mais plano.

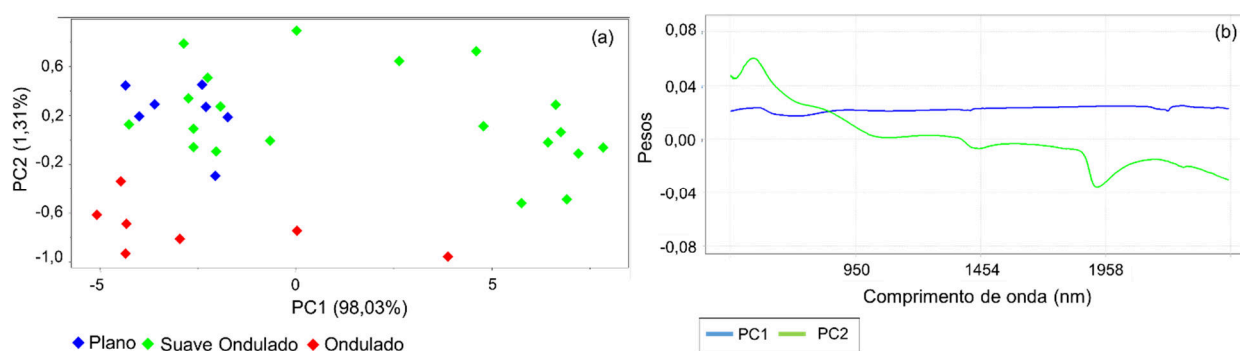


Figura 3. Análise de componentes principais (a) escores e (b) pesos que exibem a classificação da declividade do solo.

Tabela 1. Coeficientes de correlação de Pearson entre atributos do solo e escores obtidos pela análise de componentes principais (PC).

Atributo	PC1	PC2	PC3	PC4	PC5
Declividade	-0,05 <sup>ns</sup>	-0,66*	-0,20 <sup>ns</sup>	0,06 <sup>ns</sup>	0,30 <sup>ns</sup>

\* Significativo a 5% de probabilidade.

Sendo assim, o direcionamento da amostragem de solo pela variabilidade espacial da CEa (Figura 1) foi eficiente na caracterização da variação do relevo, possibilitando a discriminação da declividade do solo pela espectroscopia de reflectância difusa. Essa constatação é confirmada pela análise da Figura 4.

O teor de argila varia ao longo da vertente (Figura 4A, 4B e 4D), essa diferenciação foi detectada pelo espectro eletromagnético de duas amostras de solo coletadas em diferentes locais na topossequência (Figura 2C). Tais variações podem auxiliar em programas de demarcação de pontos para amostragem e análise de solo via espectrorradiometria de reflectância difusa agregando novas informações à agricultura de precisão.



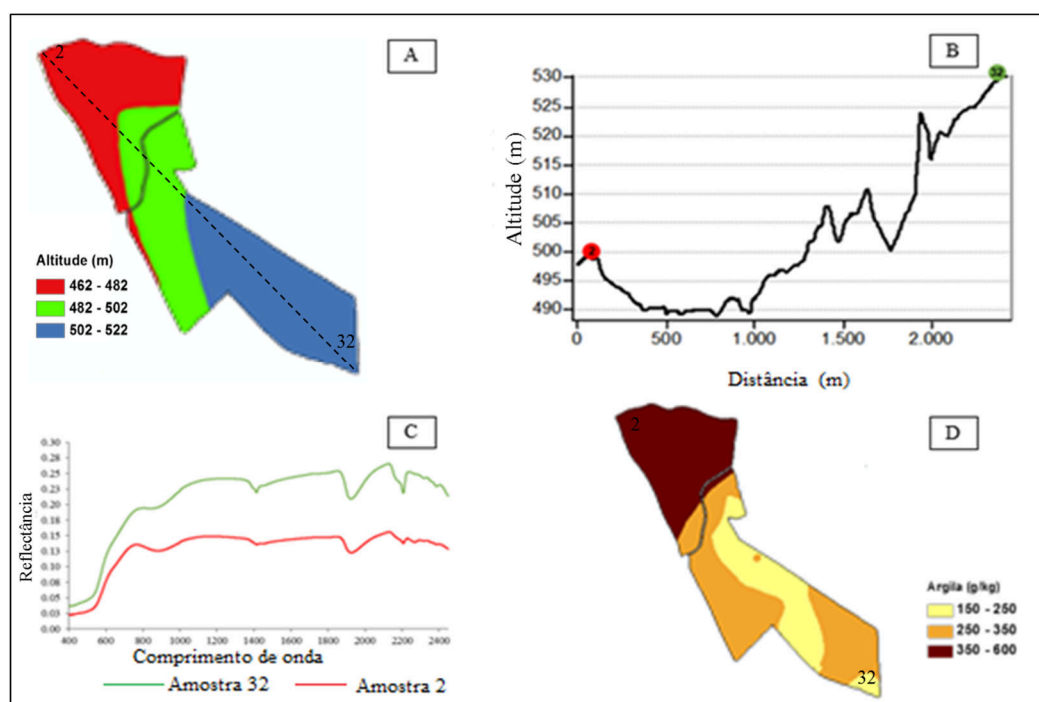


Figura 4. Distribuição da variabilidade espacial de altitude na área de estudo (A); (B) Gráfico de topossequência; (C) curvas espectrais de duas amostras de solo; (D) Distribuição espacial do conteúdo de argila em dois pontos da topossequência.

A espectrorradiometria de reflectância difusa evidenciou-se mais eficiente na aplicação em agricultura de precisão, principalmente na quantificação dos teores de argila e com desempenho decrescente para a matéria orgânica e capacidade de troca catiônica, respectivamente, de acordo com a classificação de (DUNN et al. 2002; CHANG et al. 2001), Tabela 3.

Em se tratando dos teores de argila o melhor ajuste do modelo está relacionado a textura do solo, com predominância da classe média argilosa e argilosa, de acordo com a classificação de Demattê e Demattê (2009). Esse fato proporcionou maior interação entre a energia eletromagnética e as partículas de argilas. Segundo Sousa Junior et al. (2011), o teor de argila possui feições de absorção, características nas regiões do visível e infravermelho próximo do espectro eletromagnético, portanto, quanto maior o conteúdo de argila melhores são as chances de sucesso dos modelos de quantificação.

Em relação ao conteúdo de MO e a CTC, o desempenho intermediário e ruim dos modelos de predição, respectivamente deixa claro a heterogeneidade do solo na área de estudo. Sendo assim, para a obtenção de melhorias na predição dos modelos é necessário a avaliação de outras densidades amostrais para calibração dos modelos espectrais. Além disso, faz-se necessário a utilização de planos de informações relacionados aos atributos topográficos para direcionamento das amostras de calibração dos modelos espectrais, uma vez que a variação do relevo proporcionou mudanças significativas nas características espectrais do solo.

Tabela 1 - Avaliação estatística dos modelos espectrais de predição dos atributos do solo aplicados às amostras de calibração (teste interno) e validação do modelo (teste externo).

Variável	Pré-tratamento	Calibração		Validação			
		RMSE	R <sup>2</sup>	RMSE	R <sup>2</sup>	RPD	PLS Fatores
Argila	Absorbância	19.56	0.96	27.14	0.93	3.47	5
CTC	SG-1 <sup>a</sup> derivada <sup>1</sup>	4.04	0.81	7.32	0.44	1.34	4
MO	Absorbância	2.85	0.62	3.08	0.59	1.58	2

<sup>1</sup> Savitzky-Golay

#### 4. Conclusões

O direcionamento das amostras de calibração dos modelos espectrais baseado na variabilidade da CEa do solo é mais eficiente na predição da textura do solo.

Os atributos físicos e químicos do solo variam na vertente. A variação das classes de declividade do solo foi detectada pela utilização de técnicas multivariadas associadas a ERD.

A agregação de informações do relevo a variabilidade da CEa do solo pode auxiliar em programas de demarcação de pontos para amostragem e análise de solo via ERD agregando novas informações à agricultura de precisão.

#### Referências Bibliográficas

- Armenta, S., Guardia, M. Vibrational spectroscopy in soil and sediment analysis. **Trends in Environmental Analytical Chemistry**, v. 2, p. 43-52, 2014.
- Artur, A. G., Oliveira, D. P., Costa, M. C. G., Romero, R. E., Silva, M. V. C., Ferreira, T. O. Variabilidade espacial dos atributos químicos do solo, associada ao microrrelevo. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, p.141–149, 2014.
- Auerswald, K.; Simon, S.; Stanjek, H. Influence of soil properties on electrical conductivity under humid water regimes. **Soil Science**, v. 166, p. 382-390, 2001.
- Camargo, A. O., Moniz, A. C., Jorge, J. A., Valadares, J. M. Métodos de análise química, mineralógica e física de solos do IAC. Campinas: Instituto Agrônomo, 1986, 94p. (IAC. Boletim Técnico, 106).
- Cezar, E., Nanni, M. R., Demattê, J. A. M., Chicati, M. L., Oliveira, R. B. Estimativa de atributos do solo por meio de espectrorradiometria difusa. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 37, p. 858 – 868, 2013.
- Corá, J. E., Araujo, A.V., Pereira, G. T., Beraldo, J. M. G. Variabilidade espacial de atributos do solo para adoção do sistema de agricultura de precisão na cultura de cana-de-açúcar. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.28, p. 1013-1021, 2004.
- Demattê, J. L. I.; Demattê, J. A. M. Ambientes de produção como estratégia de manejo na cultura de cana de açúcar. **Informações Agronômicas**, n.127, p.10 18, 2009.
- Demattê, J. A. M.; Lopez-Ramirez, L.; Marques, K. P. P.; Rodella, A. A.. Chemometric soil analysis on the determination of specific bands for the detection of magnesium and potassium by spectroscopy. **Geoderma**, v. 288, p. 8–22, 2017.
- Embrapa. Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. **Sistema brasileiro de classificação de solos**. Brasília: EMBRAPA Produção de Informação; Rio de Janeiro: EMBRAPA Solos, 1999. 412p.
- Genú, A. M.; Demattê, J. A. M. Determination of soil attribute contents by means of reflected eletromagnetic energy. **International Journal of Remote Sensing**, v.27, p.4807-4818, 2006.

- Koppen, W., Geiger, R. (1928). **Klimate der Erde**. Gotha: Verlag Justus Perthes. Wall-map 150cmx200cm.
- Leão, M. G. A.; Marques Junior, J.; Souza, Z. M.; Siqueira, D.; Pereira, G. T. Terrain forms and spatial variability of soil properties in an area cultivated with citrus. **Engenharia Agrícola**, v. 31, n. 4, p. 644-651, 2011.
- MENESES, P.R; MADEIRA NETTO, J.S. **Sensoriamento Remoto: reflectância dos alvos naturais**. 2. reimpressão. Brasília: UnB, 2001. 262p.
- Molin, J. P., Frasson, F. R., Amaral, L. R., Povh, F. P., Salvi, J. Capacidade de um sensor ótico em quantificar a resposta da cana-de-açúcar a doses de nitrogênio. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.14, p. 1345-1349, 2010.
- Raij, van B.; Cantarella, H.; Quaggio, J. A.; Furlani, A. M. C. **Recomendações de adubação e calagem para o estado de São Paulo**. 2. ed. Campinas: (Boletim Técnico, 100), 1997, 285 p.
- Sousa Junior, J. G., Demattê, J. A., Araújo, S. R. Modelos espectrais terrestres e orbitais na determinação de teores e atributos dos solos: potencial e custos. **Bragantia**, 70, 610-621, 2011.
- Stenberg, B.; Viscarra Rossel, R. A.; Mouazen, A. M.; Wetterlind, J. Visible and Near Infrared Spectroscopy in Soil Science. **Advances in Agronomy**, v. 107, p. 163–215, 2010.
- Valeriano, M. M. Modelo digital de variáveis morfométricas com dados SRTM para o território nacional: o projeto TOPODATA. In: Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto (SBSR), 12., 2005, Goiânia. **Anais...** São José dos Campos: INPE, 2005. Artigos, p. 1-8. CD-ROM, On-line. ISBN 85-17-00018-8. Disponível em: <<http://marte.sid.inpe.br/col/ltid.inpe.br/sbsr/2004/10.29.11.41/doc/3595.pdf>>. Acesso em: 06 nov. 2016.
- Viscarra Rossel, R. A.; Jeon, Y. S.; Odeh, I. O. A.; McBratney, A. B. Using a legacy soil sample to develop a mid-IR spectral library. **Australian Journal of Soil Research**, v. 46, p. 1–16, 2008.
- 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**, v. 156, n. 3, p. 152–160, 2010.