

## Modelagem de parâmetros pedológicos por meio de sensoriamento remoto: uma estratégia para agricultura de precisão

José Maria Filippini Alba<sup>1</sup>  
Lúcia Elena Coelho da Cruz<sup>3</sup>  
Henrique Noguez Cunha<sup>2</sup>  
Clenio Nailto Pillon<sup>1</sup>  
Leandro Fernandes da Silva<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Embrapa Clima Temperado  
Caixa Postal 403 - 96010-971, Pelotas - RS, Brasil  
{jose.filippini, clenio.pillon@embrapa.br}

<sup>2</sup> Universidade Federal do Rio Grande do Sul  
Campus do Vale, 91501-970, Porto Alegre -RS, Brasil  
henriquencunha@gmail.com

<sup>3</sup> Universidade Federal de Pelotas  
96160-000 – Capão do Leão - RS, Brasil  
luciaecruz@yahoo.com.br, leandrofs@ymail.com

**Abstract.** Several remote sensing techniques appear as significant for precision agriculture. Anyway, since a historic perspective, the main targets are related to mineral exploration and soil discrimination. Data of an experimental rice area in southern Brazil from lowland environment were considered in this work. Field samples were collected in regular grid (15mx15m), then the fractions lesser than 2 mm were analyzed for several physico-chemical parameters, including content of Fe. This variable was related to orbital data (Landsat 8) and regression models were developed. The best model considers six orbital bands, significance of F coefficient was 0,25%, the total variance explained by the model ( $R^2$ ) was 85% and the correlation coefficient between the model variable and the real variable was equal to 0,92.

**Palavras-chave:** remote sensing, image processing, precision agriculture, sensoriamento remoto, processamento de imagens, pedologia.

### 1. Introdução

Sensores remotos e *on-the-go*, processamento de dados, sistemas de gestão e a análise da variabilidade espacial fazem parte da Agricultura de Precisão (PA), que é definida como “a postura gerencial que considera a variabilidade espacial para maximizar o retorno econômico e minimizar os efeitos ambientais” (Inamasu et al., 2011). Assim, espera-se adequar a relação uso de insumos - produtividade, por meio do aprimoramento das operações de campo e do conhecimento da lavoura. Nesse sentido, há necessidade de novos métodos de avaliação da variabilidade espacial, pelo que o sensoriamento remoto apresenta-se como uma opção econômica, que é potencializada pela sua capacidade de monitoramento e registro histórico.

Na passagem da década de 80 para 90 houve vários trabalhos que exploraram as bandas vermelha e infravermelhas do sistema LANDSAT/TM, principalmente 3, 5 e 7, para detectar minerais de Fe e argilominerais em formações geológicas superficiais (Kaufmann, 1988; Lamb e Pendock, 1989; Loughlin, 1991; Crósta e Mc. Moore, 1993; Crósta e Rabello, 1993). Anos posteriores foram expandidas as aplicações nesse contexto (Filippini-Alba et al., 2001; Ducart, 2004; Terra e Saldanha, 2007) e foi introduzida a espectrorradiometria no Brasil com direcionamento para pedologia (Pizarro et al., 2001; Alvarenga et al. 2003; D’arco et al., 2003; Dalmolin et al. 2005; Nanni et. al, 2005 ; Filippini-Alba et al., 2006; Nanni et al., 2006; Filippini-Alba et al., 2007).

Ge et al. (2011) revisaram 36 trabalhos considerando a relação do sensoriamento remoto com atributos do solo como textura, teor de nutrientes, condutividade elétrica e capacidade de troca catiônica, publicados no período 1986 a 2007. Sete trabalhos trataram sobre sensoriamento remoto orbital e seis sobre sensoriamento remoto aéreo, sendo 22 trabalhos sobre espectrorradiometria. O sensor multiespectral foi utilizado em 13 situações e o hiperespectral em 23 casos, com domínio de uso no infravermelho próximo e em grau algo menor no visível. Os autores indicam que os solos possuem diferentes componentes químicos e minerais, com assinatura espectral diferenciada, intensa para alguns componentes, muito fraca para outros. No intervalo 1,4 a 1,9 micrometros há uma sobreposição de picos de diferentes componentes, dificultando a interpretação. Os solos agrícolas são geralmente compactados por equipamentos de aração, colheita ou irrigação, afetando o teor de umidade e a condição de agregação, influenciando assim na resposta espectral do solo. Por outro lado a resolução espectral afeta a qualidade da informação levantada. Assim, sensores multiespectrais são pouco utilizados para caracterizar as propriedades do solo, pois as mudanças se confundem com variações de umidade ou rugosidade. Os sensores hiperespectrais tem sido pouco utilizados em AP, possivelmente pela influência de modelos matemático-mineralógicos para interpretar os espectro, mais simples que os de solos. Foram mencionados cinco trabalhos considerando minerais de Fe. 60% consideraram dados de espectrometria multi ou hiperespectral, 20% dados orbitais e o 20% restante não foi comentado.

Neste trabalho se considerou um área de arroz irrigado localizada na Estação Experimental Terras Baixas (EETB) da Embrapa Clima Temperado Capão do Leão, RS, inserida no contexto do projeto pretérito “Agricultura de precisão para a sustentabilidade do agronegócio Brasileiro” (Embrapa, Macroprograma 1), sendo analisada a correlação entre os teores de ferro no solo e a resposta das bandas refletidas do sensor temático Landsat, nos anos 2012 e especificamente 2013. O estudo foi desenvolvido em escala de lavoura (1 ha), permitindo analisar a variabilidade local no ambiente de terras baixas.

## 2. Metodologia de Trabalho

O trabalho foi desenvolvido na EETB, (31° 49' 12,34" S - 52° 27' 57,78" O), em um Planossolo Háplico (Embrapa, 2009). O clima da região, de acordo com a classificação climática de Wilhelm Köppen, é do tipo Cfa (C: clima temperado quente, com temperatura média do mês mais frio entre 3 e 18 °C; f: em nenhum mês a precipitação pluvial é inferior a 60 mm; a: temperatura do mês mais quente é superior a 22 °C). A área experimental foi tradicionalmente cultivada com arroz irrigado no sistema convencional, com sistema de rotação 3 anos de arroz por 2 anos em descanso.

O solo foi amostrado nos pontos de interseção de uma malha regular georreferenciada, com distância entre pontos de 15m, num total de 49 pontos (Figura 1). As coletas foram realizadas em 2012 e 2013, na profundidade 0,0 – 0,10m e 0,10 – 0,20m, por meio de pá-de-corte, sendo as amostras armazenadas em sacos plásticos e posteriormente secas ao ar, destorroadas e peneiradas com malha de 2,0 mm, acondicionadas e encaminhadas para determinações analíticas (98 amostras de solo cada ano). Neste trabalho foram utilizados somente os dados de Fe, analisados por extração com solução oxálica e determinados por espectrometria de absorção atômica (Tedesco et al., 1995). Os dados foram processados para cálculo de estatísticas

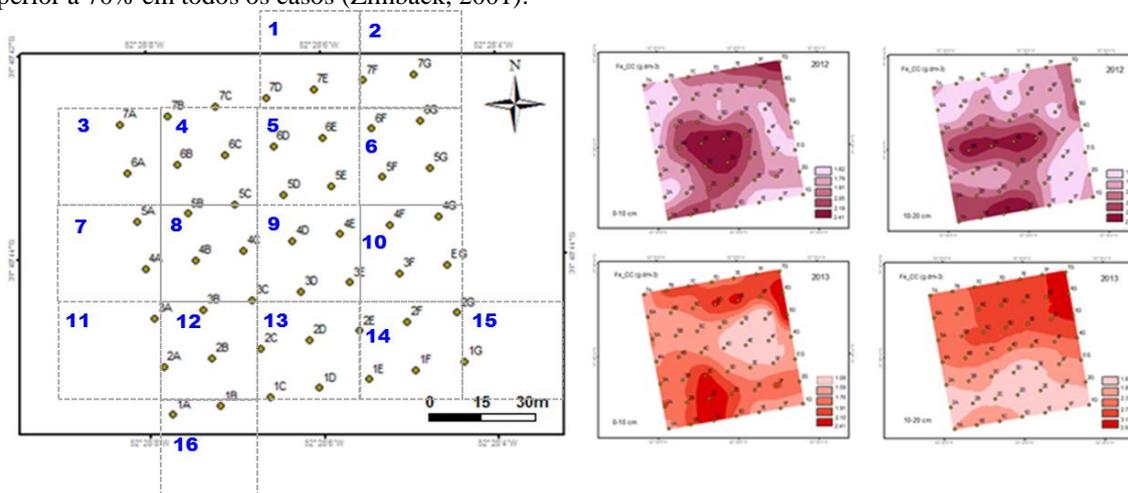
Se considerou a imagem Landsat 8 de 4 de dezembro de 2013 quando a área estava sem cobertura vegetal, sendo relacionados os pixels da imagem com a média de teor de Fe das amostras localizadas no seu interior. Foram extraídos os números digitais (DNs) de 6 bandas Operacional Terra Imager (OLI) para 16 pixels (USGS, 2014), banda azul (0,45 a 0,51µm), verde (0,53 a 0,59µm), vermelha (0,64 a 0,67 µm), infravermelho próximo (0,85 a 0,88µm) e

duas no infravermelho de ondas curtas (1,57 a 1,65µm e 2,11 a 2,29 µm), identificadas como B2, B3, B4, B5, B6 e B7 respectivamente. Os cálculos estatísticos, a captura de dados e os procedimentos geostatísticos foram aplicados por meio de programas específicos (SPSS<sup>®</sup>, 2003; GS+<sup>®</sup>, 2004; ArcGis<sup>®</sup>, 2008).

### 3. Resultados e Discussão

A grade de amostragem sobreposta com a posição dos pixels extraídos da imagem se apresenta na Figura 1, junto aos mapas de teores de Fe para as profundidades de 0 a 10 cm e de 10 a 20 cm nos anos de levantamento. Os teores de Fe mudaram sua distribuição em ambas às profundidades para os dois anos estudados.

Figura 1. Grade de amostragem de solos (círculos com números e letras), sobreposição dos pixels extraídos da imagem (pontilhado com números azuis) e mapas dos teores de Fe obtidos por Krigagem considerando semivariograma esférico, exceto para profundidade 10-20 cm de 2013, onde fora gaussiano. O alcance foi 44m (0-10cm, 2012), 32m (10-20cm, 2012), 37m (0-10cm, 2013) e 60m (10-20cm, 2013), com ajuste do modelo superior a 70% em todos os casos (Zimback, 2001).



As estatísticas dos dados transformados conforme os pixels demonstram maior variabilidade para os teores de Fe (Tabela 1), conferindo os resultantes da Krigagem. Os coeficientes de variação para as bandas orbitais foram baixos, aumentando na medida em que aumenta o comprimento de onda. O comportamento do Fe pode-se explicar pelo revolvimento do solo, ano a ano, devido ao manejo em sistema convencional.

Tabela 1. Parâmetros estatísticos dos dados utilizados no presente trabalho, para os 16 pixels extraídos da imagem. DP = Desvio padrão; CV = Coeficiente de variação.

| Variável | Ano  | Profundidade | Mínimo | Média | Máximo | DP     | CV    |
|----------|------|--------------|--------|-------|--------|--------|-------|
| Teor Fe  | 2012 | 0-10 cm      | 1,70%  | 1,94% | 2,20%  | 0,173% | 8,9%  |
| Teor Fe  | 2012 | 10-20cm      | 1,80%  | 2,13% | 2,58%  | 0,235% | 11,0% |
| Teor Fe  | 2013 | 0-10 cm      | 1,50%  | 1,81% | 2,25%  | 0,189% | 10,5% |
| Teor Fe  | 2013 | 10-20cm      | 1,50%  | 2,40% | 3,20%  | 0,497% | 20,8% |
| B2*      | 2013 | Superficial  | 11454  | 11618 | 11808  | 107    | 0,9%  |
| B3*      | 2013 | Superficial  | 11164  | 11438 | 11793  | 176    | 1,5%  |
| B4*      | 2013 | Superficial  | 12281  | 12588 | 13052  | 215    | 1,7%  |
| B5*      | 2013 | Superficial  | 17483  | 18180 | 19507  | 611    | 3,4%  |
| B6*      | 2013 | Superficial  | 22288  | 23198 | 23907  | 477    | 2,1%  |
| B7*      | 2013 | Superficial  | 18623  | 20901 | 22032  | 1017   | 4,9%  |

\* Estatísticas em DNs, exceto CV.

As correlações entre as variáveis de Fe aconteceram somente em 2012 de maneira significativa. Já as bandas orbitais apresentaram dependência intensa entre elas e, no caso do Fe, com os teores em profundidade (10 – 20 cm) para 2013. Alguns diagramas de dispersão entre a mencionada variável do Fe e as bandas orbitais confirmam os resultados, com ajuste linear e disposição diagonal conforme o signo (Figura 2). Destaca-se que a banda verde (B3), a banda vermelha (B4) e o infravermelho próximo (B5) apresentaram correlação negativa com as variáveis do Fe ou não significativa, o que resulta em uma relação inversa entre as respectivas variáveis. Já no infravermelho de onda curta (B6 e B7) houve correlação positiva com o Fe, o que sugere a presença de argilo-minerais (Drury, 1990) no planossolo estudado, onde íons do Fe poderiam estar inseridos nesses minerais.

Tabela 2. Coeficientes de correlação de Pearson para as variáveis consideradas neste estudo. FeR2012=Fe, 0-10cm, 2012; FeP2012 = Fe,10-20cm, 2012; FeR2013 = Fe, 0-10cm, 2013; FeP2013 = Fe, 10-20cm, 2013. **Negrito** indica significância para nível de confiança de 9,6%.

|         | FeP2012      | FeR2013 | FeP2013 | B2     | B3            | B4            | B5            | B6            | B7            |
|---------|--------------|---------|---------|--------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|
| FeR2012 | <b>0,484</b> | 0,069   | 0,362   | -0,374 | -0,266        | -0,289        | -0,287        | 0,308         | 0,026         |
| FeP2012 |              | 0,112   | -0,162  | -0,021 | 0,200         | 0,120         | 0,213         | -0,143        | -0,266        |
| FeR2013 |              |         | 0,251   | -0,502 | -0,338        | <b>-0,549</b> | -0,170        | -0,133        | -0,099        |
| FeP2013 |              |         |         | -0,417 | <b>-0,696</b> | <b>-0,651</b> | <b>-0,850</b> | <b>0,786</b>  | <b>0,693</b>  |
| B2      |              |         |         |        | <b>0,761</b>  | <b>0,746</b>  | 0,412         | -0,176        | -0,062        |
| B3      |              |         |         |        |               | <b>0,915</b>  | <b>0,860</b>  | <b>-0,589</b> | <b>-0,647</b> |
| B4      |              |         |         |        |               |               | <b>0,780</b>  | -0,430        | <b>-0,520</b> |
| B5      |              |         |         |        |               |               |               | <b>-0,784</b> | <b>-0,833</b> |
| B6      |              |         |         |        |               |               |               |               | <b>0,872</b>  |

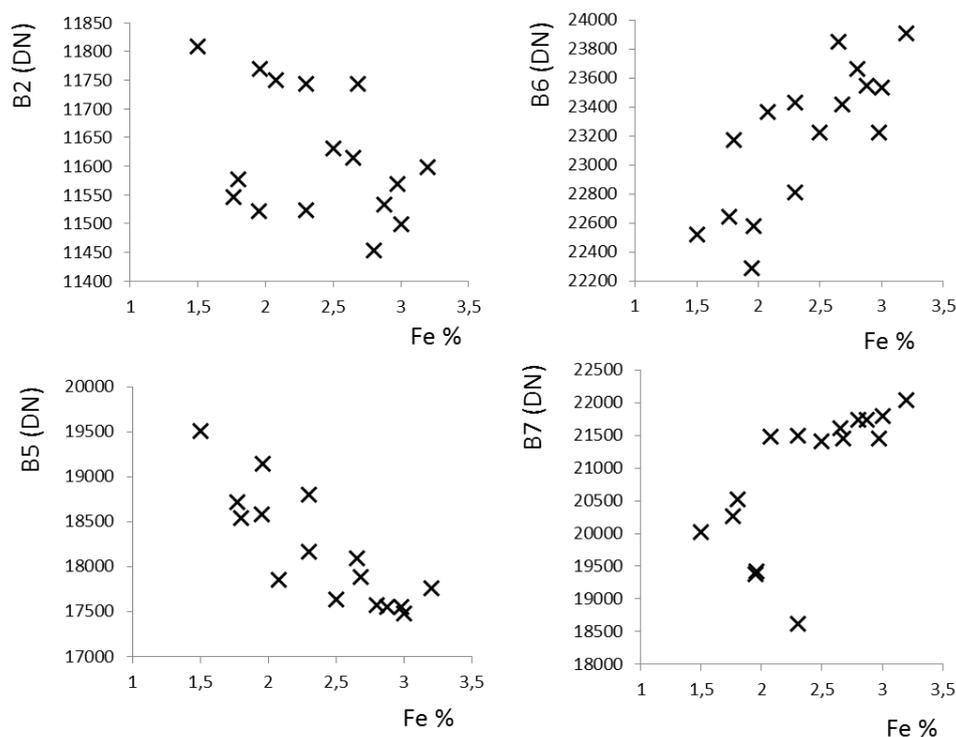


Figura 2. Diagramas de dispersão para o Fe amostrado a 10-20 cm em 2013 com as bandas B2, B5, B6 e B7, com coeficientes de correlação -0,417, -0,850, 0,786 e 0,693 respectivamente.

Assim, foram desenvolvidos modelos de regressão para o Fe em função da resposta espectral de cada banda, considerando somente o teor de Fe levantado a 10-20 cm em 2013 (Tabela 3). Em termos de significação o modelo 2 (coeficiente F), que usou quatro bandas, foi o mais adequado; mas os modelos 1, 3 e 5 foram mais eficientes no relacionado com variância explicada ( $R^2$ ), destacando-se o primeiro que utilizou as seis bandas. Os diagramas de dispersão  $Fe_{\text{modelo}}$  vs.  $Fe_{\text{real}}$  verificam essa situação (Figura 3), mostrando comportamento linear com a menor variância residual, isto é dispersão vertical, para o modelo 1.

Tabela 3. Coeficientes dos modelos de regressão desenvolvidos para o Fe (10-20 cm, 2013) conforme equação 1.

| Coeficientes     | Modelo   |           |          |           |          |
|------------------|----------|-----------|----------|-----------|----------|
|                  | 1        | 2         | 3        | 4         | 5        |
| $C_{B2}$         | -0,0048  |           |          |           |          |
| $C_{B3}$         | 0,004786 |           |          |           | 0,001045 |
| $C_{B4}$         | -0,00027 |           | -0,00026 | -0,00083  | -0,00083 |
| $C_{B5}$         | -0,00105 | -0,00072  | -0,00052 | 0,000076  | -0,00061 |
| $C_{B6}$         | 0,00012  |           | 0,000641 |           | 0,00068  |
| $C_{B7}$         | 0,000238 | -0,000021 | -0,00021 | -0,000071 | -0,00022 |
| K                | 18,19175 | 15,90826  | 4,74452  | 12,3595   | 0,62952  |
| F*               | 8,6      | 16,7      | 10,9     | 4,2       | 8,7      |
| *Significação, % | 0,25     | 0,03      | 0,08     | 2,9       | 0,21     |
| $R^2$            | 0,85     | 0,72      | 0,80     | 0,51      | 0,81     |

$$(Fe) = \sum C_i \cdot B_i + K \tag{1}$$

Sendo (Fe) o teor de ferro no solo,  $C_i$  o coeficiente de uma banda (coluna 1) e  $B_i$  o DN do respectivo pixel. K é o termo independente.

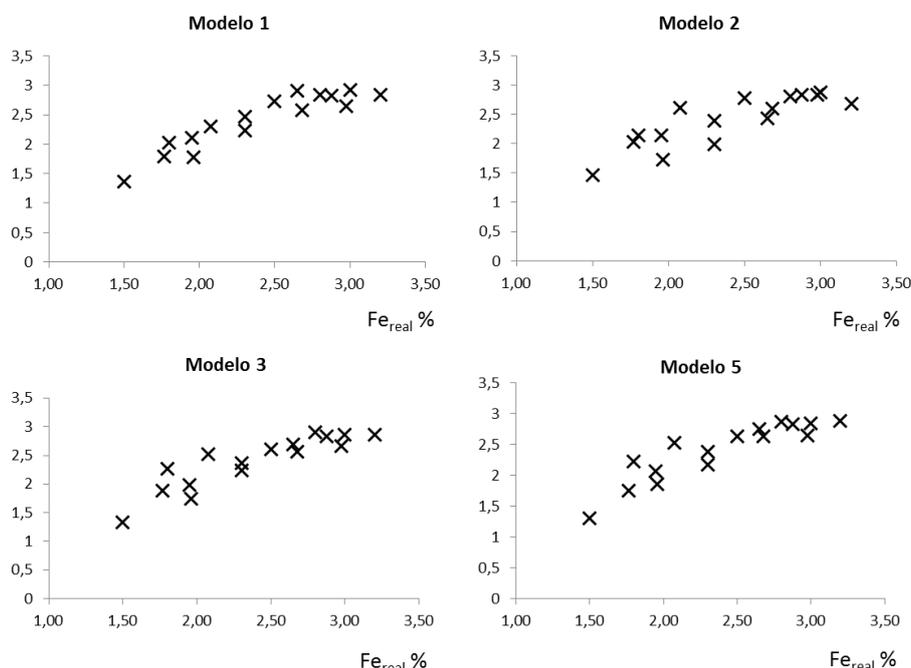


Figura 3. Diagramas de dispersão entre o Fe modelado (eixo vertical) e o Fe real.

O mapeamento de formações superficiais contendo minerais de Fe e argilominerais foi realizado em escala regional, utilizando imagens Landsat processadas via componentes principais para exploração mineral, por diversos autores (Loughlin, 1991; Crósta e Mc. Moore, 1993; Crósta e Rabello, 1993). Pizarro et al. (2001) obtiveram uma correlação

negativa do teor de Fe em 18 amostras de solo e a refletância em 2232 nm por levantamento aéreo, comportamento diferente ao da banda equivalente (B7) neste trabalho. Isso pode ser explicado por diferenças na composição mineralógica dos solos. Trabalhos de discriminação de solos usando dados orbitais mostraram eficiência moderada (40%), conforme Fiorio et al. (2005). Resultados mais consistentes foram obtidos por D'Arco et al. (2003) e Nanni et al. (2005) usando dados espectrométricos. Uma diferença marcante do presente artigo com os antes considerados refere ao caráter local da escala de trabalho utilizada.

#### 4. Conclusões

Os resultados obtidos potencializam o uso de imagens orbitais em agricultura de precisão conforme a estratégia adotada. Isso inclui estabelecer um modelo de regressão para a variável de interesse como função das bandas orbitais, em pequena área de calibração homogênea, com o posterior mapeamento da variabilidade espacial na área equivalente, considerando os dados orbitais.

Trabalhou-se no sistema convencional, que facilita a amostragem do solo sem cobertura, assim, outros sistemas de manejo deverão ser testados. O fato de considerar escala local em pequena área induz uma resposta homogênea das amostras utilizadas. Caso na lavoura existam diferentes classes ou tipos de solos, a modelagem deverá considerar essas variações. A técnica deverá ser efetiva também com variáveis relacionadas à textura do solo ou ao conteúdo de matéria orgânica, que não foram ensaiadas na ocasião.

#### Agradecimentos

Ao Laboratório de Análise Química de Solos pelas determinações de teor de Fe.

Ao pessoal de campo da EETB e colaboradores do LABPLAN pela execução das operações in situ.

#### 4. Referências Bibliográficas

- Alvarenga, B. S.; D'arco, E.; Adami, M.; Formaggio, A. R. O ensino de conceitos e práticas de espectrorradiometria laboratorial: estudo de caso com solos do estado de São Paulo. In: simpósio brasileiro de sensoriamento remoto, 11., 2003, Belo Horizonte. **Anais...** Belo Horizonte: INPE, 2003. p. 739-747.
- Crósta, A.P.; McMoore, J. Enhancement of Landsat Thematic Mapper imagery for residual soil mapping in SW Minas Gerais state, Brazil: a prospecting case history in greenstone belt terrain. In: Thematic Conference on Geological Remote Sensing, 7., 1989, Calgary. **Proceedings...** Pasadena: ERIM, 1989, p. 1173 – 1187.
- Crósta, A. P.; Rabello, A. Assessing Landsat/TM for hydrothermal alteration mapping in Central-Western Brazil. In: Thematic Conference on Geological Remote Sensing, 9., 1993, Pasadena, California, USA. **Proceedings...** Pasadena: ERIM, 1993, p. 1053 – 1061.
- Dalmolin, R. S. D.; Gonçalves, C. N.; Klamt, E.; Dick, D. P. Relação entre os constituintes do solo e seu comportamento espectral. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 35, n. 2, p. 481-489, 2005.
- D'Arco, E.; Alvarenga, B. S.; Moura, P.; Teixeira, C. G. **Estudos de refletância de amostras de 5 tipos de solos brasileiros, em condições de laboratório.** In: Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, 11., 1993, Belo Horizonte. **Anais...** São José dos Campos: INPE, 2003. p. 2327 - 2334.
- Drury, S.A. A guide for remote sensing. New York: Oxford, 1990. 199 p.
- Ducart, D.F. **Caracterização da alteração hidrotermal associada às ocorrências auríferas de Los Menucos, Argentina, por meio de técnicas de sensoriamento remoto e espectroscopia de refletância**, 2004. 96 p. Dissertação (Mestrado em Geociências). Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2004.
- Embrapa. **Sistema Brasileiro de Classificação dos Solos**. Rio de Janeiro: Embrapa-SPI, 2009. 412 p.
- Filippini-Alba, J. M.; Crósta, A. P.; Oliveira, S. M. B. Interpretation of surface geochemical data and integration with geological maps and Landsat-TM images for mineral exploration from a portion of the Precambrian of Uruguay, **Revista Brasileira de Geociências**, v. 31, n. 2, p. 123-130, 2001.
- Filippini-Alba, J. M.; Flores, C. A.; Garrastazu, M. C.; Sandrini, W. C. **O uso da espectrorradiométrico mapeamento de solos: estudo de caso na estação experimental Terras Baixas**. Pelotas: Embrapa, 2007, 28 p. (Embrapa Clima Temperado, Documentos 209).
- Filippini-Alba, J. M.; Alcover Neto, A.; Dos Santos, H. P.; Sandrini, W. C. **Caracterização espectrorradiométrica de minerais e rochas sedimentares**. Pelotas: Embrapa, 2006, 20 p. (Embrapa Clima Temperado, Documentos 172).

- Ge, Y.; Thomasson, A.; Sui, R. Remote sensing of soil properties in precision agriculture: A review. **Front. Earth Sciences**, v. 5, n. 3, 2011, p. 229 -238.
- Inamasu, R. Y.; Naime, J. M.; Resende, A. V.; Bassoi, L.H.; Bernardi, A. C. B. (Ed.). **Agricultura de precisão: um novo olhar**. São Carlos: Embrapa, 2011. 334 p.
- Kaufmann, H. Mineral exploration along the Aqaba-Levant structure by use of TM-data. **International Journal of Remote Sensing**, v. 9, n. 10-11, p. 1659 – 1657, 1988.
- Lamb, A. D.; Pendock, N.E. High resolution geochemistry and satellite data integration : application to mineral exploration in tropical environment. In: Thematic Conference on Remote Sensing for Exploration Geology, 7., 1989, Calgary, Alberta, Canada. **Proceedings...** Calgary: ERIM, 1989.
- Loughlin, W. Principal component analysis for alteration mapping. **Photogrammetric Engineering and Remote Sensing**, v. 57, p. 1163 – 1170, 1993.
- Nanni, M. R.; Demattê, J. A. M. Comportamento da linha do solo obtida por espectrorradiometria laboratorial para diferentes classes de solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 30, p.1031-1038, 2006.
- Nanni, M. R.; Demattê, J. A. M.; Fiorio, P.R. **Resposta espectral na análise discriminante dos solos**. In: Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, 12., 2005, Goiânia. **Anais...** São José dos Campos: INPE, 2005. p. 407-414
- Pizarro, M.A.; Galvão, L.S.; Epiphânio, J.C.N. Caracterização espectral de solos através de componentes principais e da correlação entre reflectância e análises químicas. In: Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, 10., 2001, Foz de Iguaçu. **Anais...** São José dos Campos: INPE, 2001. p. 1451-1460.
- Tedesco, M. J.; Gianello, C.; Bissani, C. A.; Bohnen, H.; Volkweiss, S. J. **Análises de solo, plantas e outros materiais**. Porto Alegre: Faculdade de Agronomia. Departamento de Solos Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 1995. p. 89-105.
- Terra, F. S.; Saldanha, D. L. Utilização da reflectância e de atributos químicos e mineralógicos na caracterização dos diferentes substratos do Bioma Pampa, RS, Brasil. In: Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto (SBSR), 13., 2007, Florianópolis. **Anais...** São José dos Campos: INPE, 2007. Artigos, p. 6399-6406.
- USGS. GloVis database. Disponível em: [https://lpdaac.usgs.gov/data\\_access](https://lpdaac.usgs.gov/data_access). Acesso em: 20 abr. 2014.
- Zimback, C.R.L. **Análise espacial de atributos químicos de solos para fins de mapeamento da fertilidade**. Tese de Livre-Docência (Livre-Docência em Levantamento do solo e fotopedologia), Faculdade de Ciências Agrônômica, Universidade Estadual de São Paulo, São Paulo. 2001. 114 f.