**Universidade de São Paulo
Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”**

**Sensoriamento remoto e geoprocessamento na caracterização e
avaliação pontual e espacial de solos e seus atributos**

Aline Marques Genú

**Tese apresentada para obtenção do título de Doutor
em Agronomia. Área de concentração: Solos e
Nutrição de Plantas**

**Piracicaba
2006**

**Aline Marques Genú
Engenheiro Agrônomo**

**Sensoriamento remoto e geoprocessamento na caracterização e avaliação
pontual e espacial de solos e seus atributos**

**Orientador:
Prof. Dr. JOSÉ ALEXANDRE MELO DEMATTÊ**

**Tese apresentada para obtenção do título de Doutor
em Agronomia. Área de concentração: Solos e
Nutrição de Plantas**

**Piracicaba
2006**

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)
DIVISÃO DE BIBLIOTECA E DOCUMENTAÇÃO - ESALQ/USP

Genú, Aline Marques

Sensoriamento remoto e geoprocessamento na caracterização e avaliação pontual e espacial de solos e seus atributos / Aline Marques Genú. - - Piracicaba, 2006.

120 p. : il.

Tese (Doutorado) - - Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, 2006.
Bibliografia.

1. Geoprocessamento 2. Imageamento de satélite 3. Mapeamento do solo
4. Propriedade do solo 5. Sensoriamento remoto I. Título

CDD 631.47

“Permitida a cópia total ou parcial deste documento, desde que citada a fonte – O autor”

Aos meus pais

Pedro Jaime & Maria de Fátima

Aos meus irmãos e cunhados

Cristine & Cláudio, Fabrício & Fabrícia e Adriane & Rogério

OFEREÇO

Aos meus sobrinhos

Luísa e Pedro

DEDICO

AGRADECIMENTOS

A DEUS, por ter me dado a vida, por estar sempre comigo e ter me presenteado com a melhor família que eu poderia ter.

A minha família que sempre me apoiou e esteve presente, mesmo estando longe todos estes anos.

Ao meu orientador, Prof. Dr. José Alexandre M. Demattê, pelo apoio, amizade e orientação.

Ao programa de pós-graduação em Solos e Nutrição de Plantas e a sua comissão Prof. Dr. Álvaro Pires da Silva; Prof. Dr. Luis Reynaldo Ferracciú Alleoni e Prof. Dr. Pablo Vidal Torrado.

Ao Prof. Dr. Marcos Rafael Nanni, por me permitir utilizar seu banco de dados da área para realizar esta tese.

A CAPES pelo auxílio financeiro no Brasil e no exterior.

Ao Prof. Dr. Dar. A. Roberts do Dep. de Geografia da Universidade da California, Santa Barbara (USCB) por ter me recebido e permitido trabalhar com seu grupo durante o período da bolsa sanduíche.

Ao Prof. Dr. Phaedon Kyriakidis do Dep. de Geografia da Universidade da California, Santa Barbara (USCB) pelo auxílio nas análises estatísticas e geoestatísticas.

Aos colegas do *VIPER* Lab, Izaya Numata, Dylan Prentiss, Kerry Halligan, Seth Peterson, Matthew Clark, Rebecca Powell e Stefan Gaston pela agradável convivência que me proporcionaram na UCSB.

Aos funcionários do Dep. Solos e Nutrição de Plantas especialmente a Flávia Morales, Karina Batista, Nancy Campos Amaral e Marta C. R. dos Santos (Martinha).

Aos estagiários do Laboratório de Sensoriamento Remoto, Marco Antônio Melo Bortoletto, Karen Nize Sobral de Lima, Matheus Bayer Gonçalves, Rodnei Rizzo, Fernando Ricardo Scolamieri Pereira e Terena Peres de Castro pela agradável convivência diária.

Aos meus companheiros de sala, meus “irmãos” Caio Fortes, José Geraldo de Abreu Sousa Junior e Marcelo Rodrigo Alves.

As grandes amigas Karina Batista e Gláucia Tiemi Yorinori por sempre estarem ao meu lado, mesmo quando estive longe.

Aos colegas da pós-graduação Adilson, Ana Carolina, Carlos Eduardo Faroni, Carlos Eduardo Juhász, Camila, Dolorice, Eros, Fernando, Fernando Zambrosi, Felipe, Gabriel, Gean, Gilmar, Graziela, Herdjânia, José Olímpio, Juliano, Laércio, Lillian, Lucia, Márcio Soares, Marcelo Benedetti, Maria Lígia, Michel Cambri, Mirian, Peterson, Simão, Tairone, Tiago e Valdomiro.

A todos que de alguma forma fizeram parte da minha vida e que me ajudaram, direta ou indiretamente, nestes anos na ESALQ.

MUITO OBRIGADA !!!

SUMÁRIO

RESUMO	9
ABSTRACT	10
1 INTRODUÇÃO	11
Referências	14
2 CARACTERIZAÇÃO E COMPARAÇÃO DO COMPORTAMENTO ESPECTRAL DE SOLOS OBTIDOS POR SENSOR ORBITAL (ASTER E TM-LANDSAT) E TERRESTRE (IRIS)	
Resumo	18
Abstract	18
2.1 Introdução	19
2.2 Material e Métodos	21
2.2.1 Área de estudo	21
2.2.2 Amostragem de solo e análise de terra	21
2.2.3 Informações espectrais	23
2.2.3.1 Nível orbital	23
2.2.3.2 Nível de laboratório	25
2.2.4 Avaliação dos solos e seus atributos	25
2.3 Resultados e Discussão	26
2.3.1 Curvas espectrais dos solos	26
2.3.2 Curvas espectrais e atributos do solo	37
2.4 Conclusões	46
Referências	46
3 INFORMAÇÕES ESPECTROELETROMAGNÉTICAS E TOPOGRÁFICAS NA DETERMINAÇÃO DE TEORES DE COMPONENTES DO SOLO	
Resumo	50
Abstract	50
3.1 Introdução	51
3.2 Material e Métodos	52

3.2.1 Área de estudo	52
3.2.2 Amostragem de solo e análise de terra	53
3.2.3 Informações espectrais	54
3.2.4 Modelo Digital do Terreno (MDT)	55
3.2.5 Análise estatística	56
3.3 Resultados e Discussão	57
3.3.1 Quantificação de teores de atributos do solo por satélite	57
3.3.2 Quantificação de teores de atributos do solo por dados de satélite e topográficos	61
3.3.3 Validação das equações de regressão múltipla na quantificação dos atributos dos solos	65
3.4 Conclusões.....	68
Referências	68
4 MODELO DE ANÁLISE DE MISTURA ESPECTRAL COM MÚLTIPLOS MEMBROS FINAIS (MESMA) NO MAPEAMENTO DE ATRIBUTOS DO SOLO POR IMAGEM ASTER	
Resumo	72
Abstract	72
4.1 Introdução	73
4.2 Material e Métodos	75
4.2.1 Área de estudo	75
4.2.2 Amostragem de solo e análise de terra	75
4.2.3 Informações espectrais	76
4.2.4 Análise da imagem usando MESMA	78
4.2.5 Obtenção dos mapas de atributos por geoestatística	79
4.2.6 Comparação dos mapas	79
4.3 Resultados e Discussão	80
4.4 Conclusões	90
Referências	90

5 GEOPROCESSAMENTO NA CARACTERIZAÇÃO DA DISTRIBUIÇÃO ESPACIAL DE VARIÁVEIS DO SOLO DA REGIÃO DE RAFARD-SP

Resumo	94
Abstract	94
5.1 Introdução	95
5.2 Material e Métodos	96
5.2.1 Área de estudo	96
5.2.2 Amostragem de solo e análise de terra	97
5.2.3 Obtenção dos mapas	98
5.2.4 Análise estatística e comparação dos mapas	99
5.3 Resultados e Discussão	99
5.3.1 Correlação entre atributos do solo	99
5.3.2 Correlação entre atributos do solo, geologia e relevo	105
5.3.3 Correlação entre classes de solos e seus atributos	110
5.3.4 Correlação entre classes de solos, geologia e relevo	114
5.4 Conclusões	118
Referências	118

RESUMO

SENSORIAMENTO REMOTO E GEOPROCESSAMENTO NA CARACTERIZAÇÃO E AVALIAÇÃO PONTUAL E ESPACIAL DE SOLOS E SEUS ATRIBUTOS

A necessidade de novas técnicas para a obtenção de informações sobre os solos e seus atributos, de forma mais rápida e menos onerosa, tornaram o sensoriamento remoto e o geoprocessamento uma importante opção. Estas técnicas permitem analisar uma grande quantidade de dados ao mesmo tempo e associar as informações espectrais com outras variáveis ambientais como geologia e relevo. Neste sentido, este trabalho teve por objetivos (i) caracterizar o comportamento espectral de solos pelos sensores orbitais ASTER e TM e o sensor terrestre IRIS; (ii) avaliar o potencial em estimar teores de atributos do solo por meio de dados espectrais orbitais ASTER em conjunto com os topográficos (avaliação pontual); (iii) determinar a distribuição espacial de atributos do solo pela imagem ASTER (avaliação espacial). Para isso, foram utilizadas informações georeferenciadas de 184 pontos de amostragem de solo da região de Rafard, SP. Também foram utilizadas as análises químicas e físicas das amostras, bem como as informações espectrais orbitais e em laboratório. Na sequência, curvas espectrais médias de solo e de atributos foram geradas para sua caracterização. Modelos estatísticos associando dados de reflectância e topográficos foram gerados para quantificar atributos do solo. Com isso realizou-se o mapeamento dos atributos do solo na imagem de satélite ASTER. Verificou-se que (i) é possível discriminar atributos do solo através de sensores orbitais, sendo que as bandas da faixa do infravermelho se mostraram mais eficazes; o ferro total e matéria orgânica foram os atributos melhor discriminados pelos sensores orbitais ASTER e TM, (ii) é possível quantificar os atributos argila, ferro, silício e titânio utilizando dados espectrais conjuntamente com topográficos, (iii) a quantificação de atributos foi melhor estimada com as variáveis espectrais e topográficas conjuntamente no modelo de regressão quando comparada ao modelo espectral individualmente, (iv) é possível mapear os atributos textura, matéria orgânica, ferro total e capacidade de troca catiônica com índices de até 75 % de similaridade.

Palavras-chave: Imagens de satélite; Mapeamento de atributos do solos; Relevo

ABSTRACT

REMOTE SENSING AND GEOPROCESSING ON PUNCTUAL AND SPATIAL CHARACTERIZATION AND EVALUATION OF SOILS AND THEIR ATTRIBUTES

The necessity of new techniques to obtain information about soil and its attributes, in a faster and cheaper form, turns remote sensing and geoprocessing into important options. These techniques allow the analysis of a great amount of data at the same time and associate spectral information with other environmental variables such as geology and relief. The objective of this work was (i) to characterize the spectral behavior of soils by orbital (ASTER and TM) and terrestrial (IRIS) sensors; (ii) to evaluate the potencial to estimate soil attributes content through ASTER orbital spectral data combined with topography (punctual evaluation); (iii) to determine the spatial distribution of soil attributes on ASTER image (spatial evaluation). Information was collected from 184 georeferenced soil samples from Rafard, SP. It was also used chemical and physical analyses of the samples as well as laboratory and orbital spectral data. Then, mean spectral curves of soils and attributes were generated for their characterization, statistical models associating reflectance and topography data were created to quantify soil attributes, and attributes maps were done at ASTER image. Results showed that (i) it is possible to discriminate soil attributes through orbital sensors, and the infrared bands were the best ones for this; total iron and organic matter were the best attributes discriminated by ASTER and TM sensors, (ii) it is possible to quantify clay, total iron, silicon and titanium using spectral and topographic data, (iii) the quantification of attributes was better estimated with spectral and topographic data in the models when compared to the models with spectral data only, (iv) it is possible to create maps of grain size distribution, organic matter, total iron and cation exchange capacity with indexes of 75% of similarity.

Key words: Satellite images; Soil attributes mapping; Relief

1 INTRODUÇÃO

Existe uma conhecida necessidade de se desenvolver técnicas rápidas e menos onerosas na caracterização e mapeamento dos solos não apenas para uso agrícola como também para estudos ambientais. Atualmente, os estudos de solos são realizados através de avaliações pontuais, como no caso das análises para fins de fertilidade ou, até mesmo, para o mapeamento de solo. No entanto, a alocação da informação pontual no domínio espacial, permite uma melhor visão e entendimento do fenômeno que está sendo analisado.

De acordo com Brown et al. (2006), o custo para a caracterização convencional do solo realizado nos Estados Unidos pela U.S. National Soil Survey Center é de cerca de \$ 2500 por pedon e leva de 6 a 12 meses até o resultado final porém, os autores não citam para que área ou escala de trabalho. No Brasil, recente estudo sobre o custo de levantamentos de solos, em dois municípios do Estado do Rio Grande do Sul, verificou que para o mapeamento na escala de 1:50.000, o custo fica em torno de R\$ 1,03 ha⁻¹ (~ \$ 0,38 ha⁻¹) e, para a escala de 1:100.000 seria de R\$ 0,38 ha⁻¹ (~ \$ 0,14 ha⁻¹) (GIASSON; INDA JUNIOR; NASCIMENTO, 2006).

Diversos autores têm reportado que a utilização de informações obtidas através do sensoriamento remoto pode prever atributos do solo assim como mapeá-los de maneira menos onerosa e mais rápida (BROWN et al., 2006). Isso se torna possível devido à interação dos componentes do solo com a energia eletromagnética refletida.

O estudo do solo através do sensoriamento remoto pode ser realizado em três níveis de aquisição de dados: (i) terrestre, com sensores em laboratório ou campo; (ii) aérea, através de sensores a bordo de aeronaves e (iii) orbital, com sensores em satélites (JENSEN, 2000).

A avaliação da resposta espectral do solo no nível terrestre teve início nas décadas de 60 e 70, com os trabalhos de Obukhov e Orlov (1964) que verificaram a baixa reflectância da curva espectral devido aos ácidos húmicos. Posteriormente, Bowers e Hanks (1965) avaliaram o efeito da matéria orgânica, umidade e tamanho de partícula na reflectância do solo.

Na década de 70, Hunt e Salisbury (1970) verificaram as bandas de absorção dos minerais de argila, centradas em 1400 e 1900 nm devido a vibrações das moléculas de água e grupos OH⁻ da estrutura destes minerais. Em 2200 nm ocorre a banda de absorção da caulinita, devido às vibrações da ligação Al-OH (HUNT, 1979) e em 2265 nm ocorre a feição de absorção da gibbsita (MADEIRA NETTO, 1991).

Condit (1970) mostrou que as curvas espectrais de solos podem apresentar três tipos. Posteriormente, Stoner e Baumgardner (1981) adicionaram mais dois tipos, definindo cinco tipos de curvas espectrais médias para solos de acordo com o conteúdo de matéria orgânica, óxidos de ferro e mineralogia na tentativa de estabelecer critérios para a classificação das curvas espectrais dos solos e então agrupá-los. No Brasil, Formaggio et al. (1996) determinaram curvas espectrais para classificar solos do Estado de São Paulo.

Estudos posteriores de Ben-Dor (2002) indicaram que esses trabalhos preliminares foram importantes ao nortear as possibilidades de uso do sensoriamento no estudo de solos, porém a avaliação quanto aos tipos de curvas não indica todas as características possíveis entre solos e que as curvas espectrais de solos devem ser analisadas sobre pontos de vista mais detalhados.

Após extensos trabalhos mostrando os efeitos dos componentes do solo na curva espectral, vários autores passaram a utilizar dados de sensoriamento remoto terrestre para estimar atributos do solo como CTC, pH, saturação por bases, elementos trocáveis (Ca, Mg, K) (DUNN et al., 2002; SHEPHERD; WALSH, 2002; UDELHOVEN; EMMERLING; JARMER, 2003), argila, matéria orgânica, ferro (CHANG et al., 2001, ISLAM; SINGH; McBRATNEY, 2003) e para mapear solos (DEMATTE et al., 2004) com bons resultados.

No nível orbital, os trabalhos no estudo ambiental iniciaram na década de 70, após o lançamento do Landsat-1 em 1972. Donker e Mulder (1977) demonstraram a utilidade dos dados orbitais MSS na discriminação de classes de solos. Baumgardner et al. (1985) apresentaram uma revisão da utilidade dos dados Landsat no levantamento, mapeamento e manejo de solo.

Coleman; Agbu e Montgomery (1993) utilizaram dados do sensor TM-Landsat 5 para quantificar atributos do solo, enquanto Sousa Junior (2005) utilizou imagem

ASTER para o mesmo fim. Já Nanni (2000), utilizando imagem Landsat-5, gerou equações de regressão múltipla para estimar atributos e também utilizou os dados orbitais para discriminar e mapear solos. Outros trabalhos têm sido realizados para avaliar degradação, salinidade e erosão (BEN-DOR et al., 2002) dentre outros aspectos do solo. De qualquer maneira, estudos sobre o comportamento espectral de solos ao nível orbital são poucos, havendo a necessidade de sua determinação e conhecimento dos padrões, visando a utilização dos dados por futuros usuários.

Paralelamente aos estudos relacionados aos sensores, os solos também vêm sendo avaliados quanto às características topográficas (MOORE et al., 1993). Sabendo que os dados espectrais têm relação com o solo e os dados topográficos também, permitiriam os dois usados conjuntamente, melhorar as informações sobre solos?

Neste sentido, as informações do sensoriamento remoto podem ser combinadas com dados como topografia, geologia, hidrologia e métodos geoestatísticos dentro de um sistema de informações geográficos, o que tem permitido uma caracterização eficiente do solo e seus atributos e a análise rápida de um grande número de dados (SCULL et al., 2003).

Ziadat; Taylor e Brewer (2003) utilizaram imagem TM e dados de topografia para mapear solos da Jordânia, enquanto, López-Granados et al. (2005) utilizaram análise geoestatística e sensoriamento remoto no mapeamento de solos.

Diante disso, a hipótese levantada neste trabalho é a de que o sensoriamento remoto orbital, devido à interação da energia eletromagnética com os constituintes do solo, é capaz de discriminar, identificar, quantificar e mapear solos e seus atributos.

Desta forma, o presente trabalho tem por objetivos:

- Caracterizar e comparar o comportamento espectral do solo pelos sensores orbitais ASTER e TM e o sensor terrestre IRIS;
- Verificar a possibilidade de discriminação de solos por sensores orbitais ASTER e TM;
- Verificar a influência de atributos do solo na resposta espectral ao nível orbital;
- Avaliar o potencial de estimar teores de atributos do solo por meio de dados espectrais orbitais ASTER conjuntamente com topográficos;

- Desenvolver um método de delimitação de atributos de solos por imagem de satélite;
- Avaliar a variabilidade espacial de classes de solos e sua relação com seus atributos.

O presente trabalho foi realizado em capítulos. Cada capítulo refere-se a um estudo individualizado. Porém, os temas de cada um seguem uma ordem cronológica de raciocínio. Isto foi realizado para um melhor entendimento das relações existentes entre solos e os diferentes níveis de obtenção de dados sensoriais.

No primeiro capítulo é realizada uma avaliação denominada pontual. Neste caso, os solos são avaliados na sua forma mais pura e com o menor número de interferências, ou seja, amostra de terra individual analisada por um equipamento sensor em laboratório. Posteriormente, esta mesma terra é analisada pontualmente, porém passando para o nível de satélite (pixel). Este capítulo é base para a compreensão do sistema, daí ser um tópico de caracterização. Se no primeiro capítulo o objetivo é caracterizar, no segundo ocorre o avanço na tentativa de determinação do teor de atributos pela imagem de satélite. Trata-se ainda da avaliação chamada pontual. O terceiro capítulo parte para a avaliação espacial pelo sensoriamento remoto, testando metodologia importante na avaliação de imagens. Já neste tópico a avaliação passa a ter abordagem espacial. Enfim, o capítulo quatro aborda puramente o geoprocessamento na avaliação dos atributos do solo e sua relação e importância na mapeamento.

Referências

BAUNGARDNER, M.F.; SILVA, L.F.; BIEHL, L.L.; STONER, E.R. Reflectance properties of soils. **Advances in Agronomy**, San Diego, v. 38, p. 1-43, 1985.

BEN-DOR, E. Quantitative remote sensing of soils properties. **Advances in Agronomy**, San Diego, v. 75, p. 173-243, 2002.

BEN-DOR, E.; PATKIN, K.; BANIN, A.; KARNIELI, A. Mapping of several soil properties using DAIS-7915 hyperspectral scanner data – a case study over clayey soils in Israel. **International Journal of Remote Sensing**, London, v. 23, n. 6, p. 1043-1062, Mar. 2002.

BOWERS, S.A.; HANKS, R.J. Reflection of radiant energy from soils. **Soil Science**, Baltimore, v. 100, n. 2, p. 130-138, Feb.1965.

BROWN, D.J.; SHEPHERD, K.D.; WALSH, M.G.; DEWAYNE MAYS, M.; REINSCH, T.G. Global soil characterization with VNIR diffuse reflectance spectroscopy. **Geoderma**, Amsterdam, v. 132, n. 3/4, p. 273-290, June 2006.

CHANG, C.; LAIRD, D.A.; MAUSBACH, M.J.; HURBURGH JUNIOR, C.R. Near infrared reflectance spectroscopy – principal components regression analyses of soil properties. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 65, n. 2, p. 480-490, Mar./Apr. 2001.

COLEMAN, T.L.; AGBU, P.A.; MONTGOMERY, O.L. Spectral differentiation of surface soils and soil properties: is it possible from space platforms? **Soil Science**, Baltimore, v. 155, n. 4, p. 283-293, Mar. 1993.

CONDIT, H.R. The spectral reflectance of American soils. **Photogrammetric Engineering**, Falls Church, v. 36, n. 9, p. 955-968, 1970.

DEMATTÊ, J.A.M.; GENÚ, A.M.; FIORIO, P.R.; ORTIZ, J.L.; MAZZA, J.A.; LEONARDO, H.C.L. Comparação entre mapas de solos obtidos por sensoriamento remoto espectral e pelo método convencional. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 39, n. 12, p.1219-1229, dez. 2004.

DONKER, N.H.W.; MULDER, N.J. Analysis of MSS digital imagery with the aid of principal component transforms. **International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation**, Oxford, v. 3, p. 434-466, 1977.

DUNN, B.W.; BEECHER, H.G.; BATTEN, G.D.; CIAVARELLA, S. The potential of near-infrared reflectance spectroscopy for soil analysis – a case study from the Riverine Plain of south-eastern Australia. **Australian Journal of Experimental Agriculture**, Collingwood, v. 42, n. 5, p. 607-614, 2002.

FORMAGGIO, A.R.; EPIPHANIO, J.C.N.; VALERIANO, M.M.; OLIVEIRA, J.B. Comportamento espectral (450-2450 nm) de solos tropicais de São Paulo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v. 20, p. 467-474, 1996.

GIASSON, E.; INDA JUNIOR, A.V.; NASCIMENTO, P.C. Estimativa do benefício econômico potencial de dois levantamentos de solos no Estado do Rio Grande do Sul. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 36, n. 2, p. 478-486, mar./abr. 2006.

HUNT, G.R. Spectral signatures of particulate minerals in the visible and near infrared. **Geophysics**, Tulsa, v. 42, n. 3, p. 501-513, Apr. 1979

HUNT, G.R.; SALISBURY, J.W. Visible and near infrared spectra of minerals and rocks I: Silicate minerals. **Modern Geology**, London, v. 1, p. 283-300, 1970.

ISLAM, K.; SINGH, B. McBRATNEY, A.B. Simultaneous estimation of several soil properties by ultra-violet, visible, and near-infrared reflectance spectroscopy. **Australian Journal of Soil Research**, Collingwood, v. 41, n. 6, p. 1101-1114, 2003.

JENSEN, J.R. **Remote sensing of the environment: an earth resource perspective**. New Jersey: Prentice Hall, 2000. 544 p.

LÓPEZ-GRANADOS, F.; JURADO-EXPÓSITO, M.; PEÑA-BARRAGÁN, J.M.; GARCÍA-TORRES, L. Using geostatistical and remote sensing approaches for mapping soil properties. **European Journal of Agronomy**, Amsterdam, v. 23, n. 3, p. 279-289, Oct. 2005.

MADEIRA NETTO, J.S. **Etude quantitative des relations constituants mineralogiques – reflectance diffuse des latosols bresiliens: application a l'utilisation pedologique des donnees satellitaires TM (region de Brasília)**. 1991. 238 p. Thèse (Doctorat em Science du Sol) – Université Pierre & Marie Curie, Université Paris VI, Paris, 1991.

MOORE, I.D.; GESSLER, P.E.; NIELSEN, G.A.; PETERSON, G.A. Soil attributes prediction using terrain analysis. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 57, n. 6, p. 443-452, Nov./Dec. 1993.

NANNI, M.R. **Dados radiométricos obtidos em laboratório e no nível orbital na caracterização e mapeamento de solos**. 2000. 366 p. Tese (Doutorado em Solos e Nutrição de Plantas) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2000.

OBUKHOV, A.I.; ORLOV, O.S. Spectral reflectance of major soil groups and possibility of using diffuse reflections in soil investigations. **Soviet Soil Science**, Washington, v. 1, p. 174-184, 1964.

SCULL, P.; FRANKLIN, J.; CHADWICK, O.A.; McARTHUR, D. Predictive soil mapping: a review. **Progress in Physical Geography**, London, v. 27, n. 2, p. 171-197, June 2003.

SHEPHERD, K.D.; WALSH, M.G. Development of reflectance spectral libraries for characterization of soil properties. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 66, n. 3, p. 988-998, May/June 2002.

SOUSA JUNIOR, J.G. **Sensoriamento remoto e sistema de informações geográficas na caracterização de solos e quantificação de seus atributos**. 2005. 141 p. Dissertação (Mestrado em Solos e Nutrição de Plantas) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2005.

STONER, E.R.; BAUMGARDNER, M.F. Characteristics variations in reflectance of surface soils. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 45, n. 6, p. 1161-1165, Nov. 1981

UDELHOVEN, T.; EMMERLING, C.; JARMER, T. Quantitative analysis of soil chemical properties with diffuse reflectance spectroscopy and partial least-square regression: a feasibility study. **Plant and Soil**, Dordrecht, v. 251, n. 2, p. 319-329, Apr. 2003.

ZIADAT, F.M.; TAYLOR, J.C.; BREWER, T.R. Merging Landsat TM imagery with topographic data to aid soil mapping in the Badian region of Jordan. **Journal of Arid Environments**, London, v. 54, n. 3, p. 527-541, July 2003.

2 CARACTERIZAÇÃO E COMPARAÇÃO DO COMPORTAMENTO ESPECTRAL DE SOLOS OBTIDOS POR SENSOR ORBITAL (ASTER E TM-LANDSAT) E TERRESTRE (IRIS)

Resumo

A utilização cada vez maior de informações obtidas por sensoriamento remoto para o estudo de solos torna necessária a avaliação do seu comportamento espectral e de seus atributos. Desta forma, o presente trabalho objetiva caracterizar o comportamento espectral de solos e seus atributos a partir de dados obtidos pelo sensor ASTER e compará-lo com os sensores orbital TM-Landsat e terrestre IRIS. Para tanto, foram utilizados dados analíticos de solos da região de Rafard, SP e informações obtidas por sensores de satélite (TM) e terrestre (IRIS). Essas informações foram alocadas sobre a imagem ASTER para a obtenção dos dados de reflectância. Posteriormente, as amostras foram agrupadas de acordo com sua classe de solo e com o teor de seus atributos para a realização dos testes de média entre as bandas dos sensores orbitais. Concluiu-se que (i) o sensor terrestre IRIS é o que melhor discrimina atributos do solo por ter menor interferência atmosférica e melhor resolução espectral, (ii) as curvas espectrais obtidas pelos sensores orbitais são similares às do sensor terrestre quanto a intensidade, (iii) os atributos do solo interferem diferenciadamente na intensidade de reflectância dos dados obtidos de sensores orbitais, sendo que as bandas da faixa do infravermelho (ASTER 4, 5, 6, 7 e TM 5, 7) se mostraram melhores, (iv) o ferro total e a matéria orgânica foram os atributos melhor discriminados pelos sensores orbitais ASTER e TM, (v) há correlação negativa entre os atributos matéria orgânica, ferro total e argila com as bandas dos sensores orbitais ASTER e TM.

Palavras Chaves: Comportamento espectral; Sensores remotos; Atributos do solo

CHARACTERIZATION AND COMPARISON OF SOIL SPECTRAL RESPONSE OBTAINED FROM ORBITAL (ASTER AND TM - LANDSAT) AND TERRESTRIAL (IRIS) SENSORS

Abstract

The increasing use of information obtained from remote sensing for soil science made it necessary to evaluate soil spectral response and its attributes. The objective of this work was to characterize soil spectral response and its attributes from data obtained of ASTER sensor and compare with TM – Landsat orbital sensor and IRIS terrestrial sensor. For this, analytical data of soil from Rafard, SP, was used and information

obtained through satellite (TM) and terrestrial sensors. After that, the sample points were allocated over ASTER images to obtain the orbital reflectance data. Later, the samples were grouped according to their soil and attribute classes for Tukey statistical analysis between orbital sensors bands. The conclusions are (i) terrestrial sensor IRIS is the best one to discriminate soil attributes due to less atmospheric interference and better spectral resolution, (ii) the intensity of the spectral curves obtained by orbital sensor are similar to the terrestrial sensor, (iii) soil attributes interfere in different ways on soil reflectance intensity of data obtained from orbital sensors and the infrared bands (ASTER 4, 5, 6, 7 and TM 5, 7) were the best ones, (iv) total iron and organic matter were the best attributes discriminated by ASTER and TM orbital sensors, (v) there is a negative correlation between organic matter, total iron and clay content and the bands of the orbital sensors ASTER and TM.

Key words: Spectral response; Remote sensors; Soil attributes

2.1 Introdução

Os solos possuem uma alta variabilidade, são componentes dinâmicos do ambiente e sua sustentabilidade é essencial para o funcionamento do ecossistema, afetando a produtividade agrícola. Para o monitoramento, caracterização e avaliação deste recurso natural, o sensoriamento remoto vem sendo cada vez mais utilizado.

As informações sobre o solo utilizando-se sensoriamento remoto podem ser obtidas em três níveis: (i) terrestre, utilizando-se sensores no campo ou em laboratório; (ii) aéreas, a partir de sensores a bordo de aeronaves e (iii) orbital, com sensores a bordo de satélites (JENSEN, 2000).

A análise de uma amostra de terra ou de uma área definida no campo se caracteriza como pontual. A junção de várias informações pontuais inicia o processo de avaliação espacial. Para se chegar ao nível espacial, é preciso entender o objeto sob o nível pontual, como será realizado neste trabalho. Assim, os dados obtidos em laboratório, utilizando-se espectroradiômetros permitem a observação detalhada da curva espectral do solo (isso se caracteriza como avaliação pontual), na faixa do visível ao infravermelho. O comportamento espectral do solo é uma propriedade cumulativa que deriva do comportamento dos seus constituintes minerais, orgânicos e fluidos (MADEIRA NETTO, 2001), sendo então possível identificá-los no solo.

Os primeiros trabalhos, avaliando solos através de sua resposta espectral foram realizados nas décadas de 60 e 70 como os de Bowers e Hanks (1965) que observaram o efeito da umidade, matéria orgânica e tamanho de partícula na curva espectral, bem como o de Hunt e Salisbury (1970) estudando os minerais. Desde então, muito vem sendo acrescentado sobre as propriedades de reflectância dos solos e quais os atributos que mais influenciam sua resposta espectral e de que forma isso ocorre (USTIN et al., 2004).

Os sistemas sensores orbitais, com o lançamento do primeiro satélite, o ERTS-1 (posteriormente renomeado como Landsat – 1) em 1972, começaram a ser utilizados com o objetivo de discriminar e mapear solos assim como quantificar os seus atributos (WEISMILLER; PERSINGER; MONTGOMERY, 1977; COLEMAN; AGBU; MONTGOMERY, 1993; FIORIO, 2002). O fundamento para a interpretação dessas imagens orbitais, no entanto, é o entendimento e observação dos trabalhos realizados em campo e laboratório.

Novos sistemas sensores e satélites de observação vêm sendo desenvolvidos e lançados. Em 1999, foi lançado o satélite TERRA como parte do programa Earth Observation System (EOS), em uma parceria entre a NASA e o governo japonês. A bordo deste satélite estão os sensores ASTER, CERES, MISR, MODIS e MOPITT (NASA, 2006). O sensor ASTER captura dados de alta resolução espacial em 14 bandas, que vão do visível ao infravermelho termal (FUSISADA et al., 2005). O satélite mais utilizado é o Landsat, cujos padrões vinham sendo obtidos e interpretado, com o fim da sua vida útil, a comunidade busca alternativas. No caso, o ASTER apresenta boas características e deve ser melhor estudado.

Entretanto, a grande questão não se encontra nos satélites, mas no entendimento do objeto de estudo solo, quando observado por este prisma. Não se tem informações sobre os solos tropicais brasileiros avaliados pelo ASTER, portanto, devem ser simultaneamente comparados ao TM. Da mesma forma, para a correta interpretação de dados obtidos por sensores orbitais, estes podem ser comparados com informações obtidas por sensor terrestre que expressam, de maneira mais detalhada, a resposta espectral dos solos.

A interação da energia eletromagnética com o solo gera o seu comportamento espectral, que pode ser alterado dependendo da variabilidade de seus constituintes, permitindo a diferenciação de classes de solos e de seus atributos. Desta forma, este trabalho objetiva caracterizar a assinatura espectral de classes de solos, bem como a influência individualizada de seus atributos, a partir dos dados espectrais obtidos por sensor terrestre (IRIS) e orbital (ASTER e TM).

2.2 Material e Métodos

2.2.1 Área de estudo

A área de estudo, com aproximadamente 198 ha e margeada pelo Rio Capivari, localiza-se no município de Rafard, sudoeste do Estado de São Paulo. É delimitada pelas coordenadas geográficas 23°0'31,37" – 22°58'53,97" latitude sul e 53°39'47,81" – 53°37'25,65" longitude oeste. O clima da região é classificado como mesotérmico de inverno seco em que a temperatura média do mês mais frio é inferior a 18°C e a do mês mais quente ultrapassa 22°C (CENTRO NACIONAL DE ENSINO E PESQUISA AGRONÔMICA, 1960).

A geologia da região pertence à formação Itararé, Grupo Tubarão (IPT, 1981) constituindo-se de arenitos de granulação heterogênea, argilitos e folhelhos de colorações variadas desde o cinza claro ao escuro. A área possui ainda basaltos da formação Serra Geral, Grupo São Bento e, próximo ao rio, foi observada grande quantidade de seixos. O relevo em sua maior parte é caracterizado como ondulado e suave ondulado, sendo o primeiro de maior área e com altitude variando entre 475 e 565 m sobre o nível do mar.

2.2.2 Amostragem de solo e análise de terra

As informações sobre os procedimentos metodológicos de amostragem e análise de terra são detalhados em Nanni (2000) e a seguir descritos.

A área foi demarcada e estaqueada em forma de grade regular de 100x100 m gerando 184 pontos, perfazendo 184 ha. Cada estaca foi georeferenciada com GPS e a amostra coletada nas profundidades de 0-20 cm para o horizonte superficial e 80-100 para o horizonte subsuperficial.

As amostras de terra foram posteriormente secas em estufa a 50°C por 48 horas e peneiradas (2 mm); na fração menor que 2 mm foram efetuadas as análises físicas e químicas.

Para a análise física, foram determinados os teores de areia, silte e argila a partir do método do densímetro (CAMARGO et al., 1986). Para as análises químicas, determinou-se pH em água e KCl, Ca^{2+} , Mg^{2+} , Al^{3+} , $\text{H}^+ + \text{Al}^{3+}$ e matéria orgânica (MO) de acordo com Raij e Quaggio (1989). A partir desses dados, obteve-se o valor da soma de bases (S), capacidade de troca catiônica (CTC), saturação por bases (V%) e saturação por alumínio (m%). O ferro total (Fe_2O_3), a sílica (SiO_2) e o titânio (TiO_2) foram determinados pelo ataque sulfúrico, através de metodologia descrita por Camargo et al. (1986).

Posteriormente, com os resultados das análises de terra e as informações obtidas a campo, as amostras foram classificadas de acordo com Embrapa (1999), sendo verificada a presença de quatro classes de solos na área de estudo, sendo elas os Latossolos, os Argissolos, os Cambissolos e os Neossolos.

Dentre os Latossolos verificou-se a presença do Latossolo Vermelho-Amarelo Distrófico típico (LVAd), Latossolo Vermelho-Amarelo Eutrófico típico (LVAe), Latossolo Vermelho Eutrófico típico (LVe) e Latossolo Vermelho Distrófico típico (LVd). Na classe dos Argissolos tem-se o Argissolo Vermelho-Amarelo Eutrófico típico (PVAe), Argissolo Vermelho-Amarelo Eutrófico abrupício (PVAeab), Argissolo Vermelho-Amarelo Distrófico típico (PVAd) e Argissolo Vermelho-Amarelo Distrófico abrupício (PVAdab). Para os Cambissolos tem-se o Cambissolo Háptico Ta Eutrófico típico (CXve), Cambissolo Háptico Tb Eutrófico típico (CXbe) e o Cambissolo Háptico Tb distrófico típico (CXbd). Os Neossolos observados foram o Neossolo Litólico Eutrófico típico (RLe), o Neossolo Flúvico Tb Eutrófico típico (RUbe) e o Neossolo Flúvico Psamítico típico (RUq).

2.2.3 Informações espectrais

2.2.3.1 Nível orbital

Foram utilizadas seis bandas do sensor TM do satélite Landsat-5, sendo elas (em nm): TM 1 (azul, 450-520), TM 2 (verde, 520-600), TM 3 (vermelho, 630-690), TM 4 (infravermelho próximo, 760-900), TM 5 (infravermelho médio, 1150-1750) e TM 7 (infravermelho médio, 2080-2350). Esta imagem tem data de passagem em 27 de agosto de 1997 e ponto órbita 220/076.

O sensor ASTER do satélite TERRA possui 14 bandas, sendo três na faixa do visível e infravermelho próximo, seis no infravermelho médio e cinco no infravermelho termal. Neste trabalho, utilizaram-se as três bandas do visível e infravermelho próximo, assim designadas (em nm): ASTER 1 (verde, 520-600), ASTER 2 (vermelho, 630-690), ASTER 3 (infravermelho próximo, 760-860) e cinco bandas do infravermelho médio ASTER 4 (infravermelho médio, 1600-1700), ASTER 5 (infravermelho médio, 2145-2185), ASTER 6 (infravermelho médio, 2185-2225), ASTER 7 (infravermelho médio, 2235-2285), ASTER 8 (infravermelho médio, 2295-2365). A data da imagem é de 6 de agosto de 2004. A comparação das bandas espectrais dos sensores TM e ASTER encontra-se na tabela 1.

Para a conversão dos níveis de cinza da imagem para reflectância e para eliminar o efeito da atmosfera na imagem de satélite utilizaram-se os programas 5S (Simulação do Sinal do Satélite dentro do Spectro Solar) desenvolvido pelo laboratório de ótica atmosférica de Lille – França (TANRÉ; HOLBEN; KAUFMAN, 1992) e detalhadamente descrito por Zullo Junior (1994) para a imagem TM-Landsat; e para o caso das bandas ASTER, utilizou-se o programa ACORN (Atmospheric Correction Now) (AIG, 2001).

Tabela 1 – Comparação das bandas espectrais dos sensores ASTER e TM

TM - LANDSAT		ASTER - TERRA		Faixa do espectro eletromagnético
Banda	Faixa (nm)	Banda	Faixa (nm)	
1	450 – 520	-	-	Azul
2	520 – 600	1	520 – 600	Verde
3	630 – 690	2	630 – 690	Vermelho
4	760 – 900	3	760 – 860	Infravermelho próximo
5	1150 – 1750	4	1600 – 1700	Infravermelho médio
		5	2145 – 2185	Infravermelho médio
		6	2185 – 2225	Infravermelho médio
7	2080 – 2350	7	2235 – 2285	Infravermelho médio
		8	2295 – 2365	Infravermelho médio

Posteriormente, a correção geométrica das imagens se fez necessária para integrá-las com uma base cartográfica. Desta forma, coletaram-se pontos de controle da área de estudo com um GPS trimble PRO-XRS, submétrico e pós-processado de acordo com os procedimentos descritos por Crósta (1992). Esta correção foi realizada no programa Environment for Visualizing Images – ENVI (RSI, 2005). O sistema de projeção e Datum utilizados foram UTM e SAD-1969, respectivamente.

Para a coleta dos dados espectrais orbitais, a informação da posição dos 184 pontos de amostragem foi sobreposta a composições coloridas das imagens utilizadas. Na sequência, para certificar-se de que os pontos estavam sobre área de solo exposto, gerou-se uma imagem de índice de vegetação NDVI e utilizou-se o método da linha do solo.

Os índices de vegetação foram desenvolvidos para avaliar coberturas vegetais quantitativa e qualitativamente utilizando-se dados espectrais (HUETE, 1988). O sucesso desta técnica se deve à reflectância diferencial da clorofila nos comprimentos de onda do visível (400-740 nm) e infravermelho (740-1400 nm). O NDVI (Normalized Difference Vegetation Index) é definido pela razão de bandas entre as faixas do vermelho e infravermelho (JACKSON; HUETE, 1991), para o caso da imagem TM

utilizaram-se as bandas TM 3 e TM 4 e, para a ASTER as bandas ASTER 2 e ASTER 3.

A linha do solo, utilizada para a verificação das área de solo exposto, é uma relação gráfica entre as bandas do vermelho e infravermelho (BARRET; JACQUEMOUND; HANOCQ, 1993). As bandas utilizadas para esta análise foram as mesmas do índice de vegetação, bandas TM 3 e TM 4 para a imagem Landsat e, para a ASTER as bandas ASTER 2 e ASTER 3.

2.2.3.2 Nível de laboratório

De acordo com Nanni (2000), as amostras de terra foram secas, peneiradas e acondicionadas em placas de petri de 9 cm de diâmetro para a realização das leituras espectrais no sensor IRIS (Infra Red Intelligent Spectroradiometer) com resolução espectral de 2 nm (de 400-1000 nm) e de 4 nm (1000-2500 nm).

A geometria do sistema foi baseada no posicionamento perpendicular do sensor em relação à amostra, mantendo entre ambos uma distância de 27 cm. A fonte de iluminação foi posicionada a 61 cm da amostra, formando um ângulo de 20° com o zênite. O padrão de referência absoluto utilizado foi uma placa de spectralon branca. A razão espectral entre o fluxo de radiação refletido pela superfície de referência e a amostra gerou o fator de reflectância bidirecional (NICODEMUS et al., 1977).

2.2.4 Avaliação dos solos e seus atributos

Os dados espectrais das amostras de terra ao nível de laboratório foram agrupados por classe de solo e em seguida geradas as respectivas curvas espectrais médias. Nos respectivos pixels foram extraídos dados de reflectância dos sensores orbitais ASTER e TM. Isso permitiu comparar a forma e intensidade das curvas espectrais destes três sensores.

Posteriormente, foi realizada uma avaliação de atributos do solo. Foram agrupadas amostras de terra em relação a determinado atributo. A avaliação dos atributos com os dados espectrais foi baseada em intervalos para cada um deles. Para

a matéria orgânica (MO) utilizaram-se as classes alto ($MO > 25 \text{ g dm}^{-3}$), médio (MO entre 15 e 25 g dm^{-3}) e baixo ($MO < 15 \text{ g dm}^{-3}$) (TOMÉ JR., 1997); para saturação por bases (V %) utilizou-se distrófico ($V < 50 \%$) e eutrófico ($V > 50 \%$) (TOMÉ JR., 1997); ferro total (Fe_2O_3) foi dividido em hipoférrico ($\text{Fe}_2\text{O}_3 < 80 \text{ g kg}^{-1}$), mesoférrico (Fe_2O_3 entre 80 e 180 g kg^{-1}) e férrico ($\text{Fe}_2\text{O}_3 > 180 \text{ g kg}^{-1}$) (EMBRAPA, 1999) e para textura, utilizaram-se as seguintes classes quanto ao teor de argila (TA): arenosa ($TA < 150 \text{ g kg}^{-1}$), média arenosa (TA entre 150 e 250 g kg^{-1}), média argilosa (TA entre 250 e 350 g kg^{-1}), argilosa (TA entre 350 e 600 g kg^{-1}) e muito argilosa ($TA > 600 \text{ g kg}^{-1}$) (DEMATTE et al., 2005).

Para verificar estatisticamente as diferenças observadas entre as curvas espectrais das classes de solo, realizou-se um teste de média para as bandas do sensor ASTER, TM e também para o sensor IRIS. No caso do sensor IRIS, os dados espectrais foram avaliados simulando-se as bandas ASTER e TM, calculando-se o valor médio da reflectância referente a faixa de comprimento de onda de cada banda dos dois sensores. Para a realização desta análise, utilizou-se o programa Statistical Analysis System (SAS, 1999). Da mesma forma foi realizado o teste de média entre as classes de atributos para as bandas dos sensores ASTER, TM e os mesmos simulados pelo sensor IRIS.

Foram realizadas análises de correlação entre os atributos do solo e as bandas dos sensores ASTER e TM-Landsat, através do procedimento *proc corr* do programa Statistical Analysis System (SAS, 1999).

2.3 Resultados e Discussão

2.3.1 Curvas espectrais dos solos

As curvas espectrais obtidas pelo sensor terrestre IRIS mostram de que forma os atributos do solo atuam sobre sua resposta espectral. Este efeito pode ocorrer causando bandas de absorção ou afetando a intensidade de reflectância das curvas. Os óxidos de ferro apresentam bandas de absorção em 530 nm para a hematita, 480 nm para a goetita e ainda uma banda em 900 nm (Figura 1a) (MADEIRA NETTO, 2001). Já

a magnetita e a ilmetita, não apresentam feições de absorção, porém sua presença diminui a intensidade de reflectância por serem minerais opacos e de alta absorção (HUNT, 1979).

A matéria orgânica, por sua vez, afeta a resposta espectral dos solos diminuindo a intensidade de reflectância na faixa de 400 a 2500 nm. Além disso, sua presença pode recobrir os óxidos de ferro existentes no solo afetando as bandas de absorção destes minerais (DEMATTE; EPIPHANIO; FORMAGGIO, 2003).

Em relação aos minerais de argila de solos, uma parte dos trabalhos tem sido direcionado ao estudo da caulinita e minerais 2:1, entre eles a montmorilonita. A curva de reflectância para tais minerais apresenta bandas centradas em 1400 e 2200 nm, devido às vibrações das moléculas de água e grupos OH das estruturas destes minerais. A montmorilonita, como apresenta moléculas de água entre as camadas unitárias, bandas de absorções fortes ocorrem também em 1400 e 1900 nm (HUNT; SALISBURY, 1970), pois a banda em 1900 nm é devida às vibrações de moléculas de água.

Sendo assim, solos contendo dominância de caulinita apresentam bandas de absorção fracas em 1400 e 1900 nm (Figura 1a). No caso da maior presença de minerais 2:1, como a montmorilonita, a intensidade das bandas de absorção em 1400 e em 1900 nm vai ser bem maior do que num solo caulínítico.

Para a gibbsita, a banda de absorção ocorre em 2265 nm, também ocasionada pela ligação Al-OH (MADEIRA NETTO; BAPTISTA, 2000). Já a textura, afeta a intensidade da resposta espectral. Solos mais argilosos absorvem mais energia e refletem menos ao contrário dos solos mais arenosos que, devido a presença de quartzo, refletem a energia eletromagnética (NANNI, 2000).

Passando do nível terrestre para o orbital, diminui-se a resolução espectral (diminuição do número de bandas) com consequente alteração da forma da curva espectral. Tal fato ocasiona uma curva com perda de detalhes, no caso, as bandas de absorção não aparecem (Figura 1a), porém, pode-se analisar a resposta espectral orbital através da intensidade de reflectância das curvas.

As curvas espectrais dos Latossolos, obtidas pelos três sensores estudados, podem ser inicialmente analisadas com relação a cor do solo, os vermelhos (LVe e LVd) dos vermelhos-amarelos (LVAe e LVAd).

As curvas IRIS do Latossolos Vermelhos apresentam uma intensidade de reflectância mais baixa que os Vermelhos-amarelos devido à presença de minerais opacos como a ilmenita e magnetita (NANNI, 2000). Estes minerais, derivados de rochas máficas, como os basaltos existentes na área, são caracterizados por apresentarem alta absorção da energia eletromagnética em toda a faixa do espectro (FONTES; CARVALHO JÚNIOR, 2005). Verifica-se também para os LV que a banda de absorção em 900 nm relativa aos óxidos de ferro (MADEIRA NETTO, 2001) é mais intensa do que para os LVA.

As curvas espectrais ASTER para os Latossolos, apesar de não ser possível observar as bandas de absorção como na curva IRIS, mostram que os solos vermelho-amarelos possuem uma intensidade de reflectância maior que os solos vermelhos em todo o espectro (Figura 1a) como verificado para as curvas IRIS. A resposta verificada para o sensor ASTER e IRIS também pode ser observada nas curvas obtidas pelos sensores TM (Figura 1a).

Verifica-se que a curva do LVAd reflete mais que o LVAe, principalmente na faixa do infravermelho médio, para os três sensores analisados (Figura 1a). O que pode estar influenciando esta resposta mais alta do LVAd é o fato deste solo possuir uma textura mais arenosa e um teor de ferro total menor que o LVAe (Tabela 2). De maneira geral, solos mais arenosos tendem a ter maior intensidade de reflectância, devido sua constituição mineralógica (geralmente rica em quartzo) e também baixos teores de ferro (RESENDE et al., 2005).

Figura 1 – Curvas espectrais médias dos Latossolos (a) e Argissolos (b), obtidas pelos sensores IRIS (terrestre), ASTER e TM (orbitais)

Tabela 2 – Média dos atributos, para a camada de 0-20 cm, das classes de solos estudadas

Solo ¹	pH		Ca ⁺⁺	Mg ⁺⁺	Al ⁺⁺⁺	K ⁺	CTC ²	V ³	m ⁴	MO ⁵	SiO ₂ ⁶	Fe ₂ O ₃ ⁷	TiO ₂ ⁸	Argila	Areia	Silte
	KCl	H ₂ O	mmol _c dm ⁻³					%			g kg ⁻¹					
PVAd	4,9	5,4	15,1	10,3	5,3	1,6	57,0	47,4	16,1	9,4	45,5	17,0	3,5	157,1	667,2	175,7
PVAe	4,4	5,3	37,0	17,2	6,5	2,5	87,3	64,2	10,3	13,7	73,0	33,0	6,8	239,5	314,6	445,9
PVAdab	4,7	5,2	17,7	7,5	6,4	1,4	58,4	44,9	27,5	12,9	42,8	15,1	2,9	141,5	721,2	137,3
PVAeab	5,0	5,7	23,5	13,6	2,0	1,6	57,1	69,6	6,6	9,1	38,3	19,4	4,9	126,2	718,8	155,0
CXve	5,4	6,3	105,0	38,0	0,5	3,1	168,1	83,5	0,2	21,0	112,5	103,5	17,1	388,4	362,0	249,6
CXbe	5,3	5,9	43,1	19,2	2,0	2,5	85,2	77,1	2,7	13,5	73,7	34,6	5,3	261,0	504,8	234,2
CXbd	4,7	5,4	17,2	11,1	4,5	1,2	64,1	46,1	10,6	9,0	63,3	19,5	3,3	201,3	587,5	211,2
RLe	4,5	5,8	102,0	29,7	2,3	3,4	169,0	80,5	2,2	17,0	115,3	99,3	17,1	388,6	403,1	208,3
RUbe	4,8	5,5	29,0	11,0	4,9	2,0	68,1	58,5	13,7	13,0	60,6	18,7	5,1	181,0	577,8	241,2
RUq	5,1	5,8	24,0	10,0	0,7	2,1	58,1	62,4	2,1	13,0	38,7	12,3	4,9	113,9	698,6	187,5
LVAAd	4,4	5,3	18,7	10,0	4,3	1,7	64,8	47,0	13,7	14,3	57,6	34,4	7,7	219,8	612,3	167,9
LVAe	5,1	5,9	43,4	16,2	0,8	1,7	82,9	71,1	1,2	11,6	80,4	60,0	12,2	300,8	506,4	192,8
LVe	4,9	5,7	48,0	16,6	0,6	1,2	100,3	65,3	0,9	16,6	107,7	136,4	26,3	499,9	356,9	143,2
LVd	4,3	5,1	28,7	9,0	4,7	0,9	83,9	45,9	11,9	18,7	84,0	74,3	15,0	330,6	480,7	188,7

¹ Solos: ARGISSOLO VERMELHO-AMARELO Distrófico típico (PVAd), ARGISSOLO VERMELHO-AMARELO Eutrófico típico (PVAe), ARGISSOLO VERMELHO-AMARELO Distrófico abrupto (PVAdab), ARGISSOLO VERMELHO-AMARELO Eutrófico abrupto (PVAeab), CAMBISSOLO HÁPLICO Ta Eutrófico típico (CXve), CAMBISSOLO HÁPLICO Tb Eutrófico típico (CXbe), CAMBISSOLO HÁPLICO Tb Distrófico típico (CXbd), NEOSSOLO LITÓLICO Eutrófico típico (RLe), NEOSSOLO FLÚVICO Tb Eutrófico típico (RUbe), NEOSSOLO FLÚVICO Psamítico típico (RUq), LATOSSOLO VERMELHO-AMARELO Distrófico típico (LVAd), LATOSSOLO VERMELHO-AMARELO Eutrófico típico (LVAe), LATOSSOLO VERMELHO Eutrófico típico (LVe), LATOSSOLO VERMELHO Distrófico típico (LVd)

² Capacidade de Troca Catiônica

³ Saturação por Bases

⁴ Saturação por Alumínio

⁵ Matéria Orgânica

⁶ Silica obtida pelo método do ataque sulfúrico

⁷ Ferro total obtido pelo método do ataque sulfúrico

⁸ Titânio obtido pelo método do ataque sulfúrico

Com relação ao LVd e LVe nota-se nas curvas espectrais de todos os sensores avaliados que, até aproximadamente, 1600 nm (bandas TM5 e ASTER4) ambos os solos apresentam intensidade de reflectância muito próximas, porém após este comprimento de onda, o LVd passa a refletir mais que o LVe (Figura 1a). Este fato pode ser explicado pela textura mais argilosa do LVe (Tabela 2). Já na faixa do infravermelho, as bandas de absorção relativas aos minerais de argila do solo e da água, ocorrem de tal forma que solos mais argilosos tendem a absorver mais energia e apresentar uma intensidade de reflectância mais baixa (MADEIRA NETTO, 2001) concordando com Demattê (2002). Estas bandas, no entanto, são facilmente observadas na curva do IRIS (Figura 1a).

Com relação ao comportamento espectral dos Argissolos (Figura 1b), verifica-se que o PVAe apresenta a menor intensidade de reflectância. Isso ocorre devido ao maior teor de argila e maior teor de ferro total (Tabela 2), proporcionando uma maior absorção da energia eletromagnética e conseqüente diminuição da reflectância (FORMAGGIO et al., 1996). Pode-se verificar, ainda, na curva do sensor IRIS (Figura 1b), a banda de absorção em 900 nm indicativo dos óxidos de ferro e as feições da caulinita e da água.

Os sensores orbitais ASTER e TM mostram a mesma resposta espectral com relação à intensidade de reflectância das amostras. Na faixa do infravermelho principalmente, ocorre uma alta reflectância, que está relacionada à mineralogia caulinitica e ao maior teor de matéria orgânica deste solo (Tabela 2).

Na seqüência, os Argissolos abrupticos (PVAdab e PVAeab) e o PVAd mostram curvas espectrais muito próximas (Figura 1b), tanto para o sensor ASTER como para o sensor TM, no qual as curvas se sobrepõem em todo o espectro eletromagnético, pois os solos apresentam teores de argila, matéria orgânica e ferro muito próximos (Tabela 2) causando esta similaridade.

Os Cambissolos Háplicos Tb (CXbd e CXbe) apresentam valores muito próximos de matéria orgânica, ferro total e argila (Tabela 2) e como resultado destas similaridades, suas curvas espectrais mostram-se também muito semelhantes (Figura 2a) em forma e intensidade. No sensor IRIS é possível observar as bandas intensas da água e a da caulinita (Figura 2a), enquanto nas curvas orbitais, o comportamento é o mesmo em termos da intensidade de reflectância do solo. Por outro lado, as curvas do

CXve (Figura 2a) são facilmente discriminadas, pois apresentam baixa reflectância como resultado do seu alto teor de argila e ferro total que, como comentado anteriormente, proporciona uma alta absorção da energia incidente (DALMOLIN et al., 2005).

As curvas espectrais médias dos Neossolos Flúvicos (RU) apresentam uma alta intensidade de reflectância (Figura 2b), enquanto que para o Neossolo Litólico (RLe) as curvas são de baixa intensidade (Figura 2b), sendo facilmente discriminadas. Este comportamento é, novamente, resultado dos maiores teores de ferro total, matéria orgânica e argila do RLe em relação aos RU (Tabela 2).

O teste de média para as bandas dos sensores orbitais TM e ASTER, entre as classes de solos, mostrou que o PVAd foi o solo mais discriminado entre todos, apresentando diferença estatística para o CXve nas bandas ASTER 1, 4, 5, mas sem diferença nas bandas TM; para o LVe nas bandas ASTER 1, 4 e TM 2, 7; para o LVd nas bandas ASTER 1, 3, 4 e TM 2, 5 e, para o RLe nas bandas ASTER 4, 5, 6, 7, mas sem diferença nas bandas TM (Tabelas 3 e 4). Resultados similares foram obtidos para os dados do sensor terrestre IRIS, simulando as bandas dos sensores orbitais ASTER e TM-Landsat (Tabelas 3 e 4).

Os LVs, RLe e o CXve são solos mais argilosos, com maiores teores de matéria orgânica e ferro total, quando comparados com o PVAd (Tabela 2), causando uma intensidade de reflectância mais baixa para aqueles solos e sendo a razão para esta diferenciação.

Figura 2 – Curvas espectrais médias dos Cambissolos (a) e Neossolos (b), obtidas pelos sensores IRIS (terrestre), ASTER e TM (orbitais)

As bandas ASTER 1 e TM 2 apresentam a mesma faixa do espectro eletromagnético, de 520 a 600 nm (verde) (Tabela 1). Neste intervalo ocorre uma feição espectral da hematita devido a uma transição eletrônica de campo cristalino deste óxido de ferro (SHERMAN; WAITE, 1985). O efeito desta banda está relacionada a diminuição da intensidade de reflectância. Como estes solos são mais vermelhos que o PVAd, tal fato explica a discriminação dos solos nestas bandas.

As bandas ASTER 4, 5, 6, 7 e TM 5, 7 que ocorrem na faixa do infravermelho médio, estão relacionadas à presença dos minerais da fração argila e à granulometria do solo. A banda TM 7 integra as feições espectrais da caulinita e gibbsita; assim como as bandas ASTER 5, 6 e 7 (Tabela 1) apesar disso, tais minerais não podem ser discriminados pelos satélites. Estes minerais são os principais componentes da fração argila destes solos e, portanto, apresentam boa correlação com o teor de argila e a maior absorção nestas bandas (MADERIA NETTO; BAPTISTA, 2000). Já as bandas ASTER 4 e TM 5, apesar de não apresentarem nenhuma feição específica relacionada aos minerais da fração argila, mostram nas curvas uma tendência mais inclinada na direção das bandas ASTER 5 e TM 7 (Figuras 1 e 2), devido ao solo ser mais argiloso (MADERIA NETTO; BAPTISTA, 2000).

A banda ASTER 3, por sua vez, está relacionada a uma banda de absorção da água, que promove uma diminuição na intensidade de reflectância, diferenciando os solos.

Tabela 3 – Teste de média para classes de solo a partir das bandas do sensor ASTER e do sensor IRIS simulado para ASTER

Solo ¹	N ²	ASTER 1 ³		ASTER 2		ASTER 3		ASTER 4		ASTER 5		ASTER 6		ASTER 7		ASTER 8	
ASTER ⁵																	
PVAd	11	0,1397	a ⁴	0,1617	a	0,2597	a	0,3221	a	0,2350	a	0,2440	a	0,2482	A	0,2377	abc
PVAe	4	0,1116	abc	0,1324	a	0,2222	ab	0,2706	ab	0,2021	abc	0,2076	ab	0,2093	Ab	0,2258	abc
PVAdab	9	0,1291	abc	0,1524	a	0,2466	ab	0,3049	ab	0,2271	ab	0,2394	ab	0,2431	A	0,2222	abc
PVAeab	23	0,1288	abc	0,1480	a	0,2506	ab	0,2990	ab	0,2193	abc	0,2282	ab	0,2283	Ab	0,2361	abc
CXve	2	0,0876	bc	0,1078	a	0,1978	ab	0,2404	b	0,1723	bc	0,1790	ab	0,1785	Ab	0,1713	bc
CXbe	8	0,1339	ab	0,1523	a	0,2513	ab	0,3063	ab	0,2236	ab	0,2388	ab	0,2385	A	0,2391	ab
CXbd	15	0,1304	abc	0,1519	a	0,2474	ab	0,3081	ab	0,2211	ab	0,2327	ab	0,2337	Ab	0,2372	abc
RLe	3	0,1051	abc	0,1156	a	0,2126	ab	0,2404	b	0,1587	c	0,1697	b	0,1640	B	0,1597	c
RUbe	8	0,1276	abc	0,1449	a	0,2481	ab	0,3003	ab	0,2129	abc	0,2281	ab	0,2297	Ab	0,2346	abc
RUq	3	0,1252	abc	0,1475	a	0,2466	ab	0,3001	ab	0,2103	abc	0,2266	ab	0,2255	Ab	0,2305	abc
LVAd	11	0,1203	abc	0,1432	a	0,2377	ab	0,2993	ab	0,2184	abc	0,2326	ab	0,2357	Ab	0,2603	a
LVAe	5	0,1168	abc	0,1429	a	0,2305	ab	0,2811	ab	0,2085	abc	0,2175	ab	0,2192	Ab	0,2079	abc
LVe	8	0,0866	bc	0,1090	a	0,1946	ab	0,2404	b	0,1755	abc	0,1841	ab	0,1790	Ab	0,1765	bc
LVd	3	0,0828	c	0,1107	a	0,1858	b	0,2340	b	0,1802	abc	0,1871	ab	0,1902	Ab	0,1838	abc
IRIS – ASTER ⁶																	
PVAd	11	0,2003	a	0,2877	a	0,3805	a	0,5068	a	0,4752	ab	0,4469	ab	0,4742	A	0,4602	ab
PVAe	4	0,1757	abc	0,2545	abcd	0,3196	abcd	0,4057	abcd	0,3910	abcd	0,3695	abcd	0,3873	Abc	0,3782	abcd
PVAdab	10	0,1883	ab	0,2660	abc	0,3432	abc	0,4616	abc	0,4347	abc	0,4085	abc	0,4344	Ab	0,4220	abc
PVAeab	21	0,1858	ab	0,2626	abc	0,3381	abcd	0,4638	abc	0,4573	ab	0,4346	ab	0,4570	A	0,4484	ab
CXve	7	0,1257	abcd	0,1938	bcd	0,2410	cde	0,3025	de	0,2859	def	0,2705	def	0,2781	Cde	0,2708	def
CXbe	11	0,2006	a	0,2818	ab	0,3545	ab	0,4670	ab	0,4425	abc	0,4166	abc	0,4374	Ab	0,4260	abc
CXbd	15	0,1869	ab	0,2791	ab	0,3665	ab	0,4996	a	0,4382	abc	0,4045	abc	0,4401	Ab	0,4202	abc
RLe	11	0,1096	cd	0,1830	cd	0,2297	de	0,3135	cde	0,2817	def	0,2628	def	0,2722	Cde	0,2622	def
RUbe	8	0,1804	abc	0,2692	abc	0,3592	ab	0,5053	a	0,4746	ab	0,4467	ab	0,4730	A	0,4591	ab
RUq	3	0,1823	abc	0,2544	abcd	0,3394	abcd	0,5045	a	0,4923	a	0,4683	a	0,4882	A	0,4790	a
LVAd	10	0,1293	abcd	0,2118	abcd	0,2740	abcde	0,3722	abcde	0,3572	bcde	0,3355	bcde	0,3583	Abc d	0,3471	bcde
LVAe	9	0,1196	bcd	0,2068	abcd	0,2617	bcde	0,3360	bcde	0,3217	cdef	0,3029	cdef	0,3224	Bcd e	0,3132	cdef
LVe	17	0,0899	d	0,1655	d	0,2014	e	0,2284	e	0,2204	f	0,2090	f	0,2186	E	0,2135	f
LVd	3	0,0812	d	0,1641	d	0,1999	e	0,2309	e	0,2368	ef	0,2253	f	0,2377	De	0,2339	ef

¹ Solos: ARGISSOLO VERMELHO-AMARELO Distrófico típico (PVAd), ARGISSOLO VERMELHO-AMARELO Eutrófico típico (PVAe), ARGISSOLO VERMELHO-AMARELO Distrófico abrupto (PVAdab), ARGISSOLO VERMELHO-AMARELO Eutrófico abrupto (PVAeab), CAMBISSOLO HÁPLICO Ta Eutrófico típico (CXve), CAMBISSOLO HÁPLICO Tb Eutrófico típico (CXbe), CAMBISSOLO HÁPLICO Tb Distrófico típico (CXbd), NEOSSOLO LITÓLICO Eutrófico típico (RLe), NEOSSOLO FLÚVICO Tb Eutrófico típico (RUbe), NEOSSOLO FLÚVICO Psamítico típico (RUq), LATOSSOLO VERMELHO-AMARELO Distrófico típico (LVAd), LATOSSOLO VERMELHO-AMARELO Eutrófico típico (LVAe), LATOSSOLO VERMELHO Eutrófico típico (LVe), LATOSSOLO VERMELHO Distrófico típico (LVd)

² Número de amostras utilizadas

³ B1...B8: Bandas do sensor ASTER

⁴ Médias com a mesma letra na coluna, entre todos os solos, não diferem significativamente pelo teste de Tukey a 5%.

⁵ Resultados obtidos para as bandas do sensor ASTER

⁶ Resultados obtidos para as bandas do sensor ASTER simuladas pelo sensor IRIS

Tabela 4 – Teste de média para classes de solo a partir das bandas do sensor TM-Landsat e do sensor IRIS simulado para TM-Landsat

Solo ¹	N ²	TM 1 ³		TM 2		TM 3		TM 4		TM 5		TM 7	
TM-Landsat ⁵													
PVAd	10	0,0537	ab	0,1423	a	0,2110	ab	0,2406	abcd	0,4090	a	0,2294	a
PVAe	4	0,0421	abcd	0,1156	abc	0,1902	ab	0,2196	abcde	0,3805	abc	0,2127	ab
PVAdab	8	0,0583	a	0,1398	ab	0,2253	a	0,2557	ab	0,4179	a	0,2310	a
PVAeab	21	0,0521	ab	0,1350	ab	0,2064	ab	0,2429	abc	0,4085	a	0,2335	a
CXve	7	0,0306	abcd	0,0976	abc	0,1523	b	0,1899	bcde	0,3042	abc	0,1579	ab
CXbe	10	0,0461	abc	0,1271	abc	0,1960	ab	0,2317	abcde	0,3939	ab	0,2146	ab
CXbd	12	0,0494	abc	0,1292	abc	0,1927	ab	0,2386	abcd	0,4081	a	0,2167	ab
RLe	11	0,0242	bcd	0,0925	abc	0,1454	b	0,1787	cde	0,3080	abc	0,1578	ab
RUbe	6	0,0496	ab	0,1163	abc	0,1834	ab	0,2098	abcde	0,3578	abc	0,2008	ab
RUq	1	0,0470	abc	0,1058	abc	0,2096	ab	0,2656	a	0,3647	abc	0,2000	ab
LVAd	10	0,0369	abcd	0,1087	abc	0,1712	ab	0,2117	abcde	0,3515	abc	0,1937	ab
LVAe	9	0,0292	abcd	0,0951	abc	0,1677	ab	0,1867	bcde	0,3205	abc	0,1813	ab
LVe	17	0,0189	cd	0,0842	bc	0,1485	b	0,1683	ed	0,2619	bc	0,1412	b
LVd	3	0,0130	d	0,0732	c	0,1437	b	0,1607	e	0,2588	c	0,1542	ab
IRIS – TM ⁶													
PVAd	11	0,1316	a	0,2003	a	0,2877	a	0,3846	a	0,4891	a	0,4748	ab
PVAe	4	0,1121	abc	0,1757	abc	0,2545	abcd	0,3217	abcd	0,3936	abcd	0,3886	abcd
PVAdab	10	0,1252	ab	0,1883	ab	0,2660	abc	0,3466	abc	0,4446	abc	0,4348	abc
PVAeab	21	0,1268	ab	0,1858	ab	0,2626	abc	0,3427	abcd	0,4462	abc	0,4573	ab
CXve	7	0,0801	abcd	0,1257	abcd	0,1938	bcd	0,2424	cde	0,2957	de	0,2812	def
CXbe	11	0,1307	a	0,2006	a	0,2818	ab	0,3576	ab	0,4514	ab	0,4394	abc
CXbd	15	0,1175	abc	0,1869	ab	0,2791	ab	0,3695	ab	0,4798	a	0,4400	abc
RLe	11	0,0684	cd	0,1096	cd	0,1830	cd	0,2306	de	0,3053	cde	0,2765	def
RUbe	8	0,1156	abc	0,1804	abc	0,2692	abc	0,3636	ab	0,4842	a	0,4741	ab
RUq	3	0,1275	ab	0,1823	abc	0,2544	abcd	0,3460	abc	0,4812	a	0,4901	a
LVAd	10	0,0804	abcd	0,1293	abcd	0,2118	abcd	0,2760	abcde	0,3576	abcde	0,3580	bcde
LVAe	9	0,0724	bcd	0,1196	bcd	0,2068	abcd	0,2626	bcde	0,3271	bcde	0,3223	cdef
LVe	17	0,0530	d	0,0899	d	0,1655	d	0,2005	e	0,2271	e	0,2195	f
LVd	3	0,0465	d	0,0812	d	0,1641	d	0,1989	e	0,2265	e	0,2378	ef

¹ Solos: ARGISSOLO VERMELHO-AMARELO Distrófico típico (PVAd), ARGISSOLO VERMELHO-AMARELO Eutrófico típico (PVAe), ARGISSOLO VERMELHO-AMARELO Distrófico abrupto (PVAdab), ARGISSOLO VERMELHO-AMARELO Eutrófico abrupto (PVAeab), CAMBISSOLO HÁPLICO Ta Eutrófico típico (CXve), CAMBISSOLO HÁPLICO Tb Eutrófico típico (CXbe), CAMBISSOLO HÁPLICO Tb Distrófico típico (CXbd), NEOSSOLO LÍTOLICO Eutrófico típico (RLe), NEOSSOLO FLÚVICO Tb Eutrófico típico (RUbe), NEOSSOLO FLÚVICO Psamítico típico (RUq), LATOSSOLO VERMELHO-AMARELO Distrófico típico (LVAd), LATOSSOLO VERMELHO-AMARELO Eutrófico típico (LVAe), LATOSSOLO VERMELHO Eutrófico típico (LVe), LATOSSOLO VERMELHO Distrófico típico (LVd)

² Número de amostras utilizadas ³ B1...B7: Bandas do sensor TM – Landsat ⁴ Médias com a mesma letra na coluna, entre todos os solo, não diferem significativamente pelo teste de Tukey a 5%.

⁵ Resultados obtidos para as bandas do sensor TM-Landsat ⁶ Resultados obtidos para as bandas do sensor TM-Landsat simuladas pelo sensor IRIS

2.3.2 Curvas espectrais e atributos do solo

As curvas espectrais médias por atributos foram geradas independentemente da classe de solo a qual pertence a amostra de terra. O teor de matéria orgânica, que foi dividido nas classes alto, médio e baixo, mostra que quanto maior o teor de matéria orgânica, maior é a absorção de energia e, consequentemente, menor reflectância, comportamento este observado para os três sensores (Figura 3a). Este resultado concorda com os obtidos por Dalmolin (2002) e Demattê; Epiphanyo e Formaggio (2003) que verificaram que a remoção da matéria orgânica do solo promove o aumento da intensidade de reflectância em todo o espectro. Esse resultado também demonstra que existe uma correlação negativa entre matéria orgânica e reflectância, o que pode ser verificada para todas as bandas dos sensores orbitais ASTER e TM (Tabelas 5 e 6). A correlação negativa indica que quanto maior o teor deste atributo, menor a intensidade de reflectância, em todo o espectro.

As curvas espectrais para saturação por bases, caracterizadas pelo caráter eutrófico e distrófico, mostrou que quanto maior o V%, menor a reflectância, ou seja, a resposta espectral das amostras eutróficas foi menos intensa que das amostras distróficas (Figura 3b) para todos os sensores estudados. A análise de correlação das bandas TM com o V% mostrou coeficientes em torno de 0,4 e negativos para todas as bandas (Tabela 6). Isso significa que a saturação por bases afeta a curva em todo o espectro eletromagnético e, quanto maior o V%, menor a reflectância. Esse resultado confirma o observado nas curvas espectrais, entretanto, o mesmo não foi verificado para as bandas ASTER, com coeficientes muito baixos, e em sua maioria positivos (Tabela 5). Sousa Junior (2005), estudando solos do Estado de São Paulo também observou, para curvas espectrais ASTER, que amostras eutróficas refletiam menos que as distróficas. Por outro lado, Demattê; Garcia e Prochnow (1998), em trabalho controlado em laboratório, demonstraram que a aplicação de carbonato de cálcio altera a resposta espectral de solos, tendo aumento significativo no teor de cálcio e na intensidade de reflectância. Desta forma os autores observaram o oposto do verificado neste trabalho. Outra possibilidade é o efeito do manejo químico realizado na área. A resposta espectral orbital do solo para o sensor ASTER, quando comparado com o TM,

foi obtida em data diferente, sendo a imagem Landsat mais próxima do período que se realizou as análises de laboratório do que a imagem ASTER.

Em trabalho semelhante, Demattê et al. (2003) ratificaram que o aumento do cálcio na saturação por bases, promove aumento na intensidade de reflectância. Ambos os trabalhos foram realizados com sensor em laboratório e discordam dos dados do presente trabalho. Tanto neste trabalho, para ASTER e TM como o de Sousa Junior (2005) ocorreu o contrário ao se avaliar o mesmo atributo em imagem de satélite.

Duas são as diferenças principais entre sensor em laboratório e orbital. A área de avaliação (no laboratório a área é de aproximadamente 2 cm^2 , enquanto que no satélite o pixel é de 30 m^2), além de haver a interferência atmosférica. A variabilidade de atributos físicos como argila e ferro foi menor, pois tem um maior peso na influência espectral. A parte química, em contrapartida, é extremamente específica, podendo ter alta variação em pequenas distâncias. Isso faz com que quando avaliada amostra por amostra, o resultado é mais preciso. Ao nível orbital, entretanto, há uma área muito grande de amostra, cujo resultado final é uma média.

Figura 3 – Curvas espectrais médias das classes de Matéria Orgânica (a) e Saturação por Bases (b), obtidas pelos sensores IRIS (terrestre), ASTER e TM (orbitais)

Tabela 5 – Coeficientes de correlação entre os dados espectrais ASTER e atributos do solo

Bandas	MO ¹	Fe ₂ O ₃ ²	V% ³	Argila
ASTER 1	-0,43972	-0,6224	0,02771	-0,56946
ASTER 2	-0,41541	-0,52538	-0,01237	-0,49246
ASTER 3	-0,41877	-0,56908	0,08461	-0,54484
ASTER 4	-0,40482	-0,59632	0,04529	-0,58088
ASTER 5	-0,44951	-0,57513	0,02049	-0,59606
ASTER 6	-0,40874	-0,56638	0,02856	-0,57066
ASTER 7	-0,41983	-0,56728	-0,03563	-0,58802
ASTER 8	-0,4356	-0,58646	-0,02372	-0,60113

¹ Matéria orgânica

² Ferro total

³ Saturação por Bases

Tabela 6 – Coeficientes de correlação entre os dados espectrais TM – Landsat e atributos do solo

Bandas	MO ¹	Fe ₂ O ₃ ²	V% ³	Argila
TM 1	-0,46604	-0,72763	-0,44426	-0,73276
TM 2	-0,50709	-0,71350	-0,46506	-0,67781
TM 3	-0,49550	-0,66436	-0,49055	-0,62182
TM 4	-0,50775	-0,71660	-0,41844	-0,70048
TM 5	-0,47211	-0,67152	-0,34330	-0,66050
TM 7	-0,52625	-0,72815	-0,43579	-0,69723

¹ Matéria orgânica

² Ferro total

³ Saturação por Bases

O teor de ferro total, obtido através do método do ataque sulfúrico, foi subdividido nas classes hipoférrico, mesoférrico e férrico. Observando-se as curvas espectrais obtidas pelos três sensores (Figura 4a) verifica-se que a classe hipoférrico apresenta uma maior intensidade de reflectância que as outras duas classes embora as outras possuam respostas muito próximas. A presença de ferro no solo influencia o comportamento da curva, diminuindo o albedo conforme aumenta seu teor no solo (DALMOLIN et al., 2005). Esta relação entre ferro e reflectância também é verificada pelos altos coeficientes de correlação negativa entre todas as bandas dos sensores orbitais e o ferro total (Tabelas 5 e 6).

Figura 4 – Curvas espectrais médias das classes de Ferro Total (a) e Textura (b) obtidas pelos sensores IRIS (terrestre), ASTER e TM (orbitais)

Os óxidos de ferro apresentam feições típicas, principalmente na região de 900 nm, que são mais intensas quanto maiores forem seus teores (DEMATTE; EPIPHANIO; FORMAGGIO, 2003). Isso pode ser observado nas curvas espectrais das classes mesoférrico e férrico (Figura 4a), que possuem neste comprimento de onda uma banda de absorção mais intensa que o hipoférrico na curva IRIS.

Com relação à textura, quanto menor o teor de argila, maior a intensidade de reflectância das curvas espectrais orbitais e terrestres (Figura 4b), pois solos mais arenosos tendem a ter na sua constituição mineralógica basicamente quartzo, que apresenta alta resposta em todo o espectro. Soma-se a isso o fato de que geralmente estes solos apresentam baixos teores de matéria orgânica, óxidos de ferro e água (DALMOLIN et al., 2005). A análise de correlação confirma o resultado, mostrando que existe uma alta relação entre o teor de argila e as bandas espectrais orbitais, com coeficientes em torno de 0,70 para TM e 0,56 para ASTER, ambos negativos para todas as bandas (Tabelas 5 e 6).

De forma geral, verificou-se correlação melhor entre os atributos matéria orgânica, ferro total e argila com as bandas TM. As bandas ASTER também geraram bons resultados, porém com coeficientes de correlação mais baixos (Tabelas 5 e 6).

O teste de média para as bandas dos sensores orbitais mostra que é possível discriminar teores altos dos baixos de matéria orgânica em praticamente todas as bandas (Tabelas 7, 8 e 9) enquanto que, para os dados IRIS, simulando as bandas dos sensores orbitais, esta separação foi possível em todas as bandas para as três classes. Isso ocorre, pois a matéria orgânica afeta a resposta espectral em praticamente todo o espectro, de 400 a 2500 nm (FORMAGGIO et al., 1996). Sousa Junior (2005) obteve discriminação das mesmas três classes de matéria orgânica nas bandas 5, 6, 7 e 8 do sensor ASTER, porém a simulação das bandas deste sensor, através de dados obtidos pelo sensor FieldSpec, não conseguiu separar as três classes e sim os teores alto e baixo.

Para a saturação por bases, o sensor ASTER discriminou as classes nas bandas 5, 6 e 7, enquanto que para TM e as simuladas todas as bandas foram capazes de separá-las (Tabelas 7, 8 e 9). Entretanto, como já observado anteriormente, os dados do sensor ASTER para as classes de V% parecem ser pouco consistentes, visto que,

apesar do comportamento espectral das curvas serem similares às dos outros sensores estudados, a análise de correlação não mostrou um resultado adequado (Tabela 5).

Tabela 9 – Principais bandas dos sensores TM, ASTER e IRIS para a discriminação dos atributos do solo de acordo com o teste de média

Atributos	Principais Bandas			
	ASTER	IRIS - ASTER	TM	IRIS - TM
Matéria Orgânica	1, 2, 4, 5, 6, 7	todas	todas	todas
Saturação por Bases	5, 6, 7	todas	todas	todas
Ferro Total	1, 4, 5, 6, 7, 8	todas	todas	todas
Textura	1, 3, 4, 5, 6, 7	todas	todas	todas

Para o ferro total, as bandas do sensor TM e as bandas simuladas separaram a classe hipoférrico das outras duas, mas no sensor ASTER, as bandas 2 e 3 não conseguiram discriminá-las (Tabelas 7, 8 e 9).

Já a textura, como verificado inicialmente nas curvas espectrais (Figura 4b), todas as bandas TM e as simuladas conseguiram separar as classes arenosa, média arenosa e média argilosa das classes argilosa e muito argilosa (tabelas 7, 8 e 9). As bandas ASTER 1, 3, 4, 5, 6 e 7 originais (Tabelas 7 e 9) foram capazes de discriminar a classe arenosa das classes argilosa e muito argilosa.

Para as bandas ASTER 4, 5, 6, 7 e 8 simuladas e TM 5 e 7 também simuladas, a discriminação das classes texturais foi ainda melhor, sendo possível separá-las em três grupos, textura arenosa e média arenosa, textura média argilosa e textura argilosa e muito argilosa (Tabelas 7 e 8). O melhor resultado para as bandas simuladas está relacionado ao fato de que os dados espectrais foram obtidos em laboratório, sem a interferência de fatores atmosféricos e com as amostras de solo secas e peneiradas, condições distintas de quando se trabalha com informações obtidas de imagens de satélite.

Tabela 7 – Teste de média para as classes de atributos do solo nas bandas do sensor ASTER e do sensor IRIS simulado para as bandas

ASTER

	Classes dos Atributos	N ¹	ASTER 1 ²		ASTER 2		ASTER 3		ASTER 4		ASTER 5		ASTER 6		ASTER 7		ASTER 8	
Matéria Orgânica																		
ASTER ⁴	Baixo	81	0,1301	a ³	0,1510	a	0,2494	a	0,3048	a	0,2228	a	0,2341	a	0,2360	a	0,2345	a
	Médio	31	0,1062	ab	0,1274	ab	0,2188	a	0,2674	ab	0,1928	ab	0,2027	ab	0,2020	ab	0,2120	a
	Alto	3	0,1037	b	0,1222	b	0,2169	a	0,2613	b	0,1831	b	0,1915	b	0,1890	b	0,1940	a
IRIS ASTER ⁵	Baixo	84	0,1803	a	0,2649	a	0,3425	a	0,4603	a	0,4313	a	0,4048	a	0,4305	a	0,4175	a
	Médio	49	0,1229	b	0,2018	b	0,2527	b	0,3215	b	0,3074	b	0,2905	b	0,3043	b	0,2966	b
	Alto	41	0,0870	c	0,1589	c	0,2029	c	0,2731	c	0,2478	c	0,2329	c	0,2422	c	0,2333	c
Saturação por Bases																		
ASTER	Distrófico	24	0,1305	a	0,1520	a	0,2475	a	0,3045	a	0,2252	a	0,2369	a	0,2405	a	0,2366	a
	Eutrófico	91	0,1211	a	0,1418	a	0,2385	a	0,2907	a	0,2107	b	0,2213	b	0,2217	b	0,2249	a
IRIS ASTER	Distrófico	23	0,1788	a	0,2644	a	0,3476	a	0,4658	a	0,4400	a	0,4138	a	0,4407	a	0,4281	a
	Eutrófico	151	0,1366	b	0,2157	b	0,2747	b	0,3636	b	0,3400	b	0,3198	b	0,3369	b	0,3267	b
Ferro Total (Fe ₂ O ₃)																		
ASTER	Hipoférrico	100	0,1284	a	0,1488	a	0,2471	a	0,3018	a	0,2196	a	0,2311	a	0,2327	a	0,2344	a
	Mesoférrico	14	0,0869	b	0,1120	a	0,1954	a	0,2414	ab	0,1769	ab	0,1836	ab	0,1807	b	0,1839	ab
	Férrico	1	0,0877	ab	0,1042	a	0,1957	a	0,2065	b	0,1315	b	0,1466	b	0,1396	b	0,1363	b
IRIS ASTER	Hipoférrico	102	0,1813	a	0,2635	a	0,3411	a	0,4615	a	0,4355	a	0,4095	a	0,4341	a	0,4217	a
	Mesoférrico	36	0,0910	b	0,1680	b	0,2070	b	0,2665	b	0,2387	b	0,2260	b	0,2362	b	0,2301	b
	Férrico	36	0,0822	b	0,1590	b	0,2009	b	0,2487	b	0,2344	b	0,2192	b	0,2283	b	0,2186	b
Textura																		
STER	Arenosa	40	0,1359	a	0,1559	a	0,2569	a	0,3137	a	0,2312	a	0,2430	a	0,2456	a	0,2450	a
	Media arenosa	42	0,1261	ab	0,1472	ab	0,2444	ab	0,2998	ab	0,2158	ab	0,2279	ab	0,2293	ab	0,2346	a
	Média argilosa	14	0,1169	abc	0,1369	ab	0,2320	ab	0,2818	abc	0,2047	abc	0,2158	abc	0,2150	ab	0,2124	ab
	Argilosa	18	0,0939	bc	0,1168	ab	0,2027	b	0,2468	bc	0,1794	bc	0,1854	bc	0,1847	bc	0,1868	ab
	Muito argilosa	1	0,0856	c	0,1091	b	0,1957	b	0,2356	c	0,1616	c	0,1747	c	0,1521	c	0,1586	b
IRIS ASTER	Arenosa	37	0,1883	a	0,2654	a	0,3466	a	0,4801	a	0,4652	a	0,4408	a	0,4661	a	0,4556	a
	Media arenosa	41	0,1810	a	0,2669	a	0,3493	a	0,4780	a	0,4447	a	0,4161	a	0,4438	a	0,4292	a
	Média argilosa	17	0,1638	a	0,2461	a	0,3119	a	0,3998	b	0,3682	b	0,3443	b	0,3642	b	0,3526	b
	Argilosa	70	0,0978	b	0,1747	b	0,2175	b	0,2750	c	0,2548	c	0,2399	c	0,2499	c	0,2419	c
	Muito argilosa	9	0,0795	b	0,1635	b	0,2003	b	0,2456	c	0,2125	c	0,1971	c	0,2083	c	0,1988	c

¹ Número de amostras utilizadas

² B1....B8: Bandas do sensor ASTER

³ Médias com a mesma letra na coluna não diferem significativamente pelo teste de Tukey a 5%

⁴ Resultados obtidos para as bandas do sensor ASTER

⁵ Resultados obtidos para as bandas do sensor ASTER simuladas pelo sensor IRIS

Tabela 8 – Teste de média para as classes de atributos do solo nas bandas do sensor TM - Landsat e do sensor IRIS simulado para as Bandas

TM - Landsat

	Classes dos Atributos	N ¹	TM 1 ²		TM 2		TM 3		TM 4		TM 5		TM 7
Matéria Orgânica													
TM ⁴	Baixo	77	0,0476	a ³	0,1274	a	0,1959	a	0,2311	a	0,3934	a	0,2172
	Médio	45	0,0271	b	0,0937	b	0,1579	b	0,1834	b	0,2948	b	0,1615
	Alto	41	0,0201	b	0,0810	b	0,1422	b	0,1707	b	0,2808	b	0,1428
IRIS TM ⁵	Baixo	84	0,1177	a	0,1803	a	0,2649	a	0,3458	a	0,4437	a	0,4311
	Médio	49	0,0764	b	0,1229	b	0,2018	b	0,2536	b	0,3134	b	0,3058
	Alto	41	0,0526	c	0,0870	c	0,1589	c	0,2037	c	0,2673	c	0,2447
Saturação por Bases													
TM	Distrófico	23	0,0515	a	0,1290	a	0,2033	a	0,2347	a	0,3888	a	0,2215
	Eutrófico	140	0,0323	b	0,1028	b	0,1668	b	0,1975	b	0,3295	b	0,1768
IRIS TM	Distrófico	23	0,1169	a	0,1788	a	0,2644	a	0,3512	a	0,4493	a	0,4409
	Eutrófico	151	0,0868	b	0,1366	b	0,2157	b	0,2765	b	0,3527	b	0,3384
Ferro Total (Fe ₂ O ₃)													
TM	Hipoférrico	91	0,0478	a	0,1271	a	0,1960	a	0,2320	a	0,3900	a	0,2162
	Mesoférrico	36	0,0194	b	0,0844	b	0,1472	b	0,1678	b	0,2755	b	0,1443
	Férrico	36	0,0184	b	0,0761	b	0,1357	b	0,1638	b	0,2684	b	0,1381
IRIS TM	Hipoférrico	102	0,1187	a	0,1813	a	0,2635	a	0,3446	a	0,4443	a	0,4349
	Mesoférrico	36	0,0539	b	0,0910	b	0,1680	b	0,2066	b	0,2623	b	0,2374
	Férrico	36	0,0485	b	0,0822	b	0,1590	b	0,2009	b	0,2452	b	0,2313
Textura													
TM	Arenosa	33	0,0551	a	0,1377	a	21,3246	a	0,2481	a	0,4105	a	0,2338
	Media arenosa	35	0,0475	ab	0,1241	ab	19,0444	ab	0,2271	a	0,3898	a	0,2136
	Média argilosa	16	0,0395	b	0,1157	b	18,0833	b	0,2227	a	0,3696	a	0,2041
	Argilosa	70	0,0209	c	0,0855	c	14,6835	c	0,1708	b	0,2810	b	0,1459
	Muito argilosa	9	0,0148	c	0,0697	c	12,8104	c	0,1544	b	0,2552	b	0,1307
IRIS TM	Arenosa	37	0,1296	a	0,1883	a	0,2654	a	0,3515	a	0,4611	a	0,4660
	Media arenosa	41	0,1155	ab	0,1810	a	0,2669	a	0,3527	a	0,4593	a	0,4444
	Média argilosa	17	0,1021	b	0,1638	a	0,2461	a	0,3135	a	0,3874	b	0,3662
	Argilosa	70	0,0588	c	0,0978	b	0,1747	b	0,2176	b	0,2701	c	0,2521
	Muito argilosa	9	0,0457	c	0,0795	b	0,1635	b	0,1989	b	0,2439	c	0,2107

¹ Número de amostras utilizadas

² B1....B7: Bandas do sensor TM - Landsat

³ Médias com a mesma letra na coluna não diferem significativamente pelo teste de Tukey a 5%.

⁴ Resultados obtidos para as bandas do sensor TM-Landsat

⁵ Resultados obtidos para as bandas do sensor TM-Landsat simuladas pelo sensor IRIS

2.4 Conclusões

1. As curvas espectrais dos solos, obtidas pelos sensores orbitais são similares às do sensor terrestre com relação à intensidade;
2. O sensor terrestre IRIS é o que melhor discrimina atributos do solo por ter menos interferência atmosférica e melhor resolução espectral, permitindo avaliação tanto da intensidade de reflectância como as feições de absorção;
3. É possível discriminar atributos do solo, através de sensores orbitais, sendo que as bandas da faixa do infravermelho (ASTER 4, 5, 6, 7 e TM 5, 7) se mostraram melhores;
4. O ferro total e matéria orgânica foram os atributos melhor discriminados pelos sensores orbitais ASTER e TM;
5. Há correlação negativa entre os atributos matéria orgânica, ferro total e argila e as bandas dos sensores orbitais ASTER e TM.

Referências

ANALYTICAL IMAGING AND GEOPHYSICS. **Atmospheric correction now (ACORN) 3.12**. Boulder, 2001. 1CD-ROM.

BARRET, F.; JACQUEMOUND, S.; HANOCQ, J.F. The soil line concept in remote sensing. **Remote Sensing Reviews**, London, v. 7, n. 1, p. 1-18, 1993.

BOWERS, S.A.; HANKS, R.J. Reflection of radiant energy from soils. **Soil Science**, Baltimore, v. 100, n. 2, p. 130-138, Feb.1965.

CAMARGO, A.O.de; MONIZ, A.C.; JORGE, J.A.; VALADARES, J.M. **Métodos de análise química, mineralógica e física de solos do IAC**. Campinas:IAC, 1986. 94 p. (IAC. Boletim Técnico, 106).

CENTRO NACIONAL DE ENSINO E PESQUISA AGRONÔMICA. **Levantamento de reconhecimento de solos do Estado de São Paulo**. Rio de Janeiro: Ministério da Agricultura, 1960. 637 p. (SNPA. Boletim 12).

COLEMAN, T.L.; AGBU, P.A.; MONTGOMERY, O.L. Spectral differentiation of surface soils and soil properties: is it possible from space platforms? **Soil Science**, Baltimore, v. 155, n. 4, p. 283-293, Mar. 1993.

CRÓSTA, A.P. **Processamento digital de imagens de sensoriamento remoto**. Campinas: UNICAMP, IG, 1992. 170 p.

DALMOLIN, R.S.D. **Matéria orgânica e características físicas, químicas, mineralógicas e espectrais de Latossolos de diferentes ambientes**. 2002. 151 p. Tese (Doutorado em Ciência do Solo) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2002.

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, mar./abr. 2005.

DEMATTÊ, J.A.M. Characterization and discrimination of soils by their reflected electromagnetic energy. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 37, n. 10, p. 1445-1458, out. 2002.

DEMATTÊ, J.A.M.; EPIPHANIO, J.C.N.; FORMAGGIO, A.R. Influência da matéria orgânica e de formas de ferro na reflectância de solos tropicais. **Bragantia**, Campinas, v. 62, n. 3, p. 451-464, set/dez. 2003.

DEMATTÊ, J.A.M.; GARCIA, G.J.; PROCHNOW, L.I. Variações induzidas de atributos químicos e sua influência na reflectância espectral de três solos do Estado do Paraná. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 22, p. 479-490, 1998.

DEMATTÊ, J.A.M.; MORETTI, D.; VASCONCELOS, A.C.F.; GENÚ, A.M. Uso de imagens de satélite na discriminação de solos desenvolvidos de basalto e arenito na região de Paraguaçu Paulista. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 40, n. 7, p. 697-706, jul. 2005.

DEMATTÊ, J.A.M.; PEREIRA, H.S.; NANNI, M.N.; COOPER, M.; FIORIO, P.R. Soil chemical alterations promoted by fertilizer application assessed by spectral reflectance. **Soil Science**, Philadelphia, v. 168, n. 10, p. 730-747, Oct. 2003.

EMBRAPA. **Sistema brasileiro de classificação de solos**. Brasília: Serviço de Produção de Informação, 1999. 412 p.

FIORIO, P.R. **Dados radiométricos obtidos nos níveis terrestre e orbital na avaliação de solos**. 2002. 198 p. Tese (Doutorado em Solos e Nutrição de Plantas) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2002

FONTES, M.P.F.; CARVALHO JUNIOR, I.A. Color attributes and mineralogical characteristics, evaluated by radiometry, of highly weathered tropical soils. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 69, n. 4, p. 1162-1172, July/Aug. 2005.

FORMAGGIO, A.R.; EPIPHANIO, J.C.N.; VALERIANO, M.M.; OLIVEIRA, J.B. Comportamento espectral (450-2450 nm) de solos tropicais de São Paulo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v. 20, p. 467-474, 1996.

FUJISADA, H.; BAILEY, G.B.; KELLY, G.G.; HARA, S.; ABRAMS, M.J. ASTER DEM performance. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, New Jersey, v. 43, n. 12, p. 2707-2714, Dec. 2005.

HUETE, A.R. A soil-adjusted vegetation index (SAVI). **Remote Sensing of Environment**, New York, v. 25, n. 3, p. 295-309, Aug. 1988.

HUNT, G.R. Spectral signatures of particulate minerals in the visible and near infrared. **Geophysics**, Tulsa, v. 42, n. 3, p. 501-513, Apr. 1979

HUNT, G.R.; SALISBURY, J.W. Visible and near infrared spectra of minerals and rocks I: Silicate minerals. **Modern Geology**, London, v. 1, p. 283-300, 1970.

INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS. Divisão de Minas e Geologia Aplicada. **Mapa geológico de Estado de São Paulo**. São Paulo, 1981. Escala 1:1000.000.

JACKSON, R.D.; HUETE, A. R. Interpreting vegetation indices. **Preventive Veterinary Medicine**, Amsterdam, v. 11, n. 3/4, p. 185-200, Dec. 1991.

JENSEN, J.R. **Remote sensing of the environment: an earth resource perspective**. New Jersey: Prentice Hall, 2000. 544 p.

MADEIRA NETTO, J. S. Comportamento espectral dos solos. In: MENESSES, P.R.; MADEIRA NETTO, J.S. (Org.). **Sensoriamento remoto: reflectância de alvo naturais**. Brasília: Editora UnB; EMBRAPA Cerrados, 2001. cap. 4, p. 127-156.

MADEIRA NETTO, J.S; BAPTISTA, G.M.M. **Reflectância espectral de solos**. Planaltina: EMBRAPA Cerrados, 2000. 55 p.

NANNI, M.R. **Dados radiométricos obtidos em laboratório e no nível orbital na caracterização e mapeamento de solos**. 2000. 366 p. Tese (Doutorado em Solos e Nutrição de Plantas) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba. 2000.

NATIONAL AERONAUTICS AND SPACE ADMINISTRATION. Disponível em: <http://asterweb.jpl.nasa.gov>. Acesso em: 31 jun. 2006.

NICODEMUS, F.E.; RICHMOND, J.C.; HSIA, J.J.; GINSBERG, I.W.; LIMPERIS, T. **Geometrical considerations and nomenclature for reflectance**. Washington: US Department of Commerce, 1977. 52 p. (NBS Monograph, 160).

RAIJ, B. van; QUAGGIO, J.A. **Métodos de análise de solo para fins de fertilidade**. Campinas: IAC, 1989. 40 p. (IAC. Boletim Técnico 8).

RESEARCH SYSTEMS INC. **ENVI 4.1.**, 2005. Boulder, 2005. 2 CD-ROM.

RESENDE, M.; CURI, N.; KER, J.C.; REZENDE, S.B. **Mineralogia de solos brasileiros: interpretação e aplicações**. Lavras: Editora UFLA, 2005. 192 p.

SHERMAN, D.M.; WAITE, T.D. Eletronic spectra of Fe oxides and oxide hydroxides in the near IR to near UV. **American Mineralogist**, Washington, v. 70, n. 12, p. 1262-1269, Dec. 1985.

SOUSA JUNIOR, J.G. **Sensoriamento remoto e sistema de informações geográficas na caracterização de solos e quantificação de seus atributos**. 2005. 141 p. Dissertação (Mestrado em Solos e Nutrição de Plantas) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2005.

STATISTICAL ANALYSIS SYSTEM. **SAS 8.02**. Cary, 1999. 5 CD-ROM.

TANRÉ, D.; HOLBEN, B.N.; KAUFMAN, Y.J. Atmospheric correction algorithm for NOAA-AVHRR products: theory and application **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, New Jersey, v. 30, n. 2, p. 231-248, Mar. 1992.

TOMÉ JUNIOR., J.B. **Manual para interpretação de análises de solo**. Guaíba: Agropecuária, 1997. 247 p.

USTIN, S.; ROBERTS, D.A.; GAMON, J.A.; ASNER, G.P.; GREEN, R.O. Using imaging spectroscopy to study ecosystem processes and properties. **BioScience**, Washington, v. 54, n. 6, p. 523-534, June 2004.

WEISMILLER, R.A.; PERSINGER, L. O.; MONTGOMERY, O. L. Soil inventory from digital analysis of satellite scanner and topographic data. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v.41, p.1166-1173, 1977.

ZULLO JUNIOR, J. **Correção atmosférica de imagens de satélite e aplicações**. 1994. 191 p. Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica) – Universidade de Campinas, Campinas, 1994.

3 INFORMAÇÕES ESPECTROELETROMAGNÉTICAS E TOPOGRÁFICAS NA DETERMINAÇÃO DE TEORES DE COMPONENTES DO SOLO

Resumo

A obtenção de informações quantitativas dos solos por técnicas não destrutivas, como o sensoriamento remoto, abre possibilidades de avaliações mais rápidas e menos onerosas no estudo de solos. Os Modelos Digitais do Terreno (MDT) oferecem outro meio de prever propriedades do terreno. O objetivo deste trabalho é verificar a possibilidade de quantificar atributos do solo utilizando informações extraídas de sensor orbital ASTER, conjugados com parâmetros topográficos. A área de estudo localiza-se em Rafard, SP. 184 amostras de terra alocadas em forma de grid compõem a área de estudo. A reflectância foi obtida da imagem ASTER e os dados topográficos a partir do MDT. Em seguida, utilizando os dados orbitais e de relevo foram gerados os modelos de regressão para os atributos do solo. As variáveis dependentes foram selecionadas a partir do método *stepwise*. Posteriormente, os modelos com R^2 maior que 0,50 foram testados em amostras desconhecidas de terra. Os valores estimados pelas equações (VE) e os valores determinados em laboratório (VD) foram avaliados quanto à correlação. Os componentes SiO_2 , Fe_2O_3 , TiO_2 e argila foram os atributos com melhor coeficiente de determinação chegando a 0,68. Conclui-se que os modelos gerados pelos dados espectrais obtidos da imagem de satélite somados às informações topográficas permitem quantificar os referidos componentes do solo.

Palavras-chave: Modelo Digital do Terreno; ASTER; Atributos do Solo.

SPECTRALELETTROMAGNETIC AND TOPOGRAPHIC INFORMATIONS ON THE DETERMINATION OF SOIL COMPOUNDS

Abstract

Quantitative information of soils can be obtained by non destructive techniques, like remote sensing, and it opens a great possibility of faster and cheaper evaluation on soil studies. The Digital Elevation Model (DEM) offers another method to predict terrain properties. The objective of this work is to verify the possibility to quantify soil attributes using informations extracted of ASTER orbital sensor and topographic parameters. The study area is located in Rafard, SP in wich 184 samples were obtained. The reflectance data was obtained from ASTER image and the topographic data from DEM. Then, orbital an terrain data were used to generate a multiple regression equation for soil attributes. The dependent variables were selected by a forward stepwise method. After that, the models with R^2 higher than 0,50 were tested with unknown soil samples. The

estimated values (VE) and the determined values (VD) were correlated. SiO_2 , Fe_2O_3 , TiO_2 and clay attributes were the attributes with higher determination coefficient. Results showed that the models generated with spectral data obtained from the satellite image added to topographic information allowed the quantification of the above cited soil components.

Key words: Digital Elevation Model (DEM); ASTER; Soil Attributes

3.1 Introdução

Existe uma demanda cada vez maior por informações quantitativas para fins de levantamento e mapeamento, monitoramento ambiental, estratégias de manejo entre outros (SCULL et al., 2003; McBRATNEY; MINASNY; VISCARRA ROSSEL, 2006). Especificamente em relação a solos, o principal método para a geração destas informações é a análise de solo convencional realizada em laboratório. Entretanto, esta metodologia se mostra cara e demorada para as necessidades atuais. Sendo assim, novas técnicas que tornem o processo de avaliação do solo mais rápido, menos oneroso e com menor risco ambiental vêm sendo buscadas (UDELHOVEN; EMMERLING; JARMER, 2003).

A espectrometria de reflectância em laboratório tem sido utilizada como um método rápido, não destrutivo e que permite a partir de um único espectro, a caracterização de vários constituintes do solo (VISCARRA ROSSEL et al., 2006). A reflectância do solo, em todas as faixas do espectro eletromagnético, é uma propriedade cumulativa derivada do comportamento espectral combinado dos minerais, água e matéria orgânica (UDELHOVEN; EMMERLING; JARMER, 2003).

A análise espectral quantitativa dos solos requer técnicas estatísticas para discriminar a resposta dos atributos do solo das características espectrais (VISCARRA ROSSEL et al., 2006). Vários métodos têm sido utilizados para relacionar o espectro do solo com seus atributos como, por exemplo, regressão múltipla (DEMATTE; NANNI, 2003), componentes principais (CHANG et al., 2001) e redes neurais (DANIEL; TRIPATHI, HONDA, 2003).

Existe na literatura um grande número de trabalhos sobre a utilização de dados espectrais de laboratório e análises estatísticas para a quantificação de atributos do

solo, conforme pode ser observado no trabalho de Viscarra Rossel et al. (2006), o qual fornece um levantamento sobre o tema. Entretanto, segundo Scull et al. (2003) e Huete (2004) poucos trabalhos tratam da utilização de sensores orbitais e aerotransportados.

Outra forma de estudo do solo é a utilização dos Modelos Digitais do Terreno (MDT). Segundo Moore et al. (1993), a análise do terreno possibilita quantificar os componentes do relevo que afetam o desenvolvimento do solo e, conseqüentemente, a distribuição espacial dos seus atributos. Por isso, vários pesquisadores (MOORE et al., 1993; DOBOS et al., 2000; LAGACHERIE; VOLTZ, 2000) vêm utilizando informações de elevação, declividade, aspecto e forma (concavidade e convexidade) como variáveis auxiliares na caracterização, mapeamento e predição de propriedades do solo.

Como se observa, existem duas formas de determinar quantitativamente componentes do solo: pelo sensoriamento espectral e por dados topográficos. Não se verifica, entretanto, pesquisas que unem essas duas formas, verificando sua potencialidade no estudo do solo.

Devido à correlação existente entre a radiação eletromagnética e os atributos do solo e do modelo digital do terreno (MDT) com a distribuição espacial dos solos e suas propriedades, espera-se que a informações espectrais conjugadas à dados topográficos permitam quantificar componentes físicos do solo tal como argila e ferro. Desta forma, a finalidade desta pesquisa é verificar a utilização destas duas informações combinadas na quantificação de atributos do solo.

3.2 Material e Métodos

3.2.1 Área de estudo

A área de estudo, com aproximadamente 198 ha e margeada pelo Rio Capivari, localiza-se no município de Rafard, sudoeste do Estado de São Paulo. É delimitada pelas coordenadas geográficas 23°0'31,37" – 22°58'53,97" latitude sul e 53°39'47,81" – 53°37'25,65" longitude oeste. O clima da região é classificado como mesotérmico de inverno seco em que a temperatura média do mês mais frio é inferior a 18°C e a do mês

mais quente ultrapassa 22°C (Centro Nacional de Ensino e Pesquisa Agronômica, 1960).

A geologia da região pertence à formação Itararé, Grupo Tubarão (IPT, 1981) constituindo-se de arenitos de granulação heterogênea, argilitos e folhelhos de colorações variadas desde o cinza claro ao escuro. A área possui ainda basaltos da formação Serra Geral, Grupo São Bento e, próximos ao rio, seixos. O relevo em sua maior parte é caracterizado como ondulado e suave ondulado, sendo o primeiro de maior área, com altitude variando entre 475 e 565 m sobre o nível do mar.

3.2.2 Amostragem de solo e análise de terra

As informações sobre a metodologia aplicada no trabalho de campo e amostragem de solo foram obtidas em Nanni (2000), onde estão descritas em detalhes.

Os pontos de tradagem da área foram demarcados e estaqueados em forma de grade regular de 100x100 m gerando 184 pontos, perfazendo 184 ha em um total de 198 ha. Em cada estaca foi realizado o referenciamento geográfico com GPS e a coleta de amostra nas profundidades de 0-20 cm para o horizonte superficial e 80-100 para o horizonte subsuperficial.

Após coletadas, as amostras de terra foram secas em estufa a 50°C por 48 horas e em seguida passadas em peneira de 2 mm. Posteriormente, na fração menor que 2 mm foram efetuadas as análises físicas e químicas.

Para a análise física, foram determinados os teores de areia, silte e argila a partir do método do densímetro (CAMARGO et al., 1986). Para as análises químicas, determinou-se pH em água e KCl, Ca^{2+} , Mg^{2+} , Al^{3+} , H^+ + Al^{3+} e matéria orgânica (MO) de acordo com Raij e Quaggio (1989). A partir desses dados, obteve-se o valor da soma de bases (S), capacidade de troca catiônica (CTC), saturação por bases (V%) e saturação por alumínio (m%). O ferro total (Fe_2O_3), a sílica (SiO_2) e o titânio (TiO_2) foram determinados pelo ataque sulfúrico, através de metodologia descrita por Camargo et al. (1986).

Posteriormente, com os resultados das análises de terra e as informações obtidas a campo, as amostras foram classificadas de acordo com Embrapa (1999).

3.2.3 Informações espectrais

Os dados espectrais foram extraídos do sensor ASTER, que está a bordo do satélite TERRA e que possui 14 bandas, sendo três na faixa do visível e infravermelho próximo, seis no infravermelho médio e cinco no infravermelho termal. Neste trabalho utilizaram-se as três bandas do visível e infravermelho próximo, assim designadas: B1 (verde, 520-600 nm), B2 (vermelho, 630-690 nm), B3 (infravermelho próximo, 760-860 nm) e cinco bandas do infravermelho médio B4 (infravermelho médio, 1600-1700 nm), B5 (infravermelho médio, 2145-2185 nm), B6 (infravermelho médio, 2185-2225 nm), B7 (infravermelho médio, 2235-2285 nm), B8 (infravermelho médio, 2295-2365 nm). A data da imagem é de 6 de agosto de 2004.

Para a conversão dos níveis de cinza da imagem para reflectância e para eliminar o efeito da atmosfera na imagem de satélite utilizou-se o programa ACORN (Atmospheric Correction Now) (AIG, 2001).

Posteriormente, a correção geométrica das imagens se fez necessária para integrá-las com uma base cartográfica. Desta forma, foram utilizados pontos de controle da área de estudo obtidos com um GPS trimble PRO-XRS, submétrico e pós-processado de acordo com os procedimentos descritos por Crósta (1992). Esta correção foi realizada no programa Environment for Visualizing Images – ENVI (RSI, 2005). O sistema de projeção e Datum utilizados foram UTM e SAD-1969, respectivamente.

Para a coleta dos dados espectrais orbitais, a informação da posição dos 184 pontos de amostragem foi sobreposta a composições coloridas das imagens utilizadas. Posteriormente, para certificar-se de que os pontos estavam sobre área de solo exposto, gerou-se uma imagem de índice de vegetação NDVI e utilizou-se o método da linha do solo.

Os índices de vegetação foram desenvolvidos para avaliar coberturas vegetais quantitativa e qualitativamente, utilizando-se dados espectrais (HUETE, 1988). O sucesso desta técnica se deve à reflectância diferencial da clorofila nos comprimentos de onda do visível (400-740 nm) e infravermelho (740-1400 nm). O NDVI (Normalized Difference Vegetation Index) é definido pela razão de bandas entre as faixas do

vermelho e infravermelho (JACKSON; HUETE, 1991), para o caso da imagem ASTER utilizaram-se as bandas ASTER 2 e ASTER 3.

A linha do solo, utilizada para verificar os pixels de solo exposto, é também uma relação entre as bandas do vermelho e infravermelho (BARRET; JACQUEMOUND; HANOCQ, 1993). As bandas utilizadas para esta análise foram as mesmas do índice de vegetação.

3.2.4 Modelo Digital do Terreno (MDT)

O Modelo Digital do Terreno foi gerado no programa ArcGIS 9 (ESRI, 2005) usando como base as curvas de nível da área, espaçadas de 5 em 5 m obtidas das cartas planialtimétricas de Toledos e Costa Rica, ambas na escala 1:10.000 e o limite da área de trabalho. De posse destas informações, fez-se o cruzamento no aplicativo ArcMap, modo *3D Analyst*, opção *Create TIN from Features*. Posteriormente, a partir do MDT, geraram-se os mapas de declividade e aspecto, utilizando-se também o modo *3D Analyst*, opção *Surface Analysis – slope e aspect*, respectivamente.

Após a geração dos mapas, os mesmos foram reclassificados. Para declividade utilizaram-se as classes de relevo existentes em Embrapa (1999): plano (0 a 3%), suave ondulado (3 a 8 %), ondulado (8 a 20%), forte ondulado (20 a 45 %), montanhoso (45 a 75 %) e escarpado (acima de 75 %). Para aspecto utilizaram-se as classes (ALVES, 2005): norte (0 a 45°), nordeste (45 a 90°), leste (90 a 135°), sudeste (135 a 180°), sul (180 a 225°), sudoeste (225 a 270°), oeste (270 a 315°) e noroeste (315 a 360°).

A declividade refere-se à inclinação da superfície do terreno com referência à linha horizontal, enquanto o aspecto corresponde à exposição da vertente ou a orientação da face da declividade em relação aos pontos cardeais.

Desta forma, após a geração do MDT, do mapa de declividade e do mapa de aspecto, o arquivo dos pontos de tradagem foi sobreposto às imagens, obtendo assim as informações de relevo para cada amostra de solo.

3.2.5 Análise estatística

Para geração dos modelos de estimativa de atributos, utilizaram-se as informações das bandas do sensor ASTER, elevação, declividade e aspecto de 109 amostras de solos como variáveis dependentes.

Os atributos modelados foram: pH (água e KCl), cálcio, magnésio, potássio, fósforo, acidez (H+Al), soma de bases (S), capacidade de troca catiônica (CTC), matéria orgânica, saturação por bases (V%), saturação por alumínio (m%), areia, silte, argila, ferro total (Fe₂O₃), silício total (SiO₂) e titânio total (TiO₂).

Todas as informações sobre os atributos químicos e físicos, valores de reflectância nas 8 bandas do sensor ASTER e os dados de elevação, declividade e aspecto dos pontos amostrais selecionados para a construção dos modelos estatísticos, foram inseridos no programa *Statistical Analysis System* (SAS, 1999), no qual utilizou-se o procedimento *proc reg* para a geração do modelo de regressão múltipla, juntamente com a função *stepwise* para a seleção das variáveis independentes que fariam parte do modelo para cada atributo. Inicialmente obteve-se o modelo apenas para os dados orbitais e depois com as informações orbitais e topográficas juntas.

Após a obtenção das equações, utilizou-se o procedimento de análise guiada dos dados no mesmo programa (SAS *Lab*) para melhorar os modelos obtidos. Nesta fase verificou-se qual o melhor modelo a ser ajustado aos dados: linear, raiz quadrada, logarítmica, exponencial ou inversa e a presença de *outliers* ou observações influenciáveis.

Posteriormente, os atributos cujos modelos de regressão múltipla obtiveram R² maior que 0,5, foram validados utilizando-se 62 amostras desconhecidas de terra. Os valores obtidos na validação das equações de regressão múltipla foram denominados teores estimados (VE). Em seguida, para verificar se os dados estimados tinham relação com os dados determinados em laboratório (VD), gerou-se um gráfico de dispersão entre eles.

3.3 Resultados e Discussão

3.3.1 Quantificação de teores de atributos do solo por satélite

Os elementos para os quais foram obtidas equações de regressão múltipla encontram-se na Tabela 1. Para os demais atributos determinados em laboratório: silte, pH (água, KCl), Al^{+3} , V% e m%, não foi possível obter um modelo, pois nenhuma variável independente foi estatisticamente significativa a 5%.

As equações relativas aos elementos obtidos através do ataque sulfúrico, ou seja, SiO_2 , Fe_2O_3 e TiO_2 , apresentaram coeficiente de determinação de 0,48, 0,65 e 0,66 respectivamente. Ressalta-se que o valor para titânio foi o maior obtido dentre os atributos estudados (Tabela 1). Fiorio (2002), trabalhando com solos da região de Barra Bonita e imagem TM obteve coeficientes de determinação de 0,6531, 0,6724 e 0,7210 (Tabela 2) para os mesmos atributos. Já Nanni e Demattê (2006), utilizando imagem TM obtiveram R^2 de 0,598, 0,725 e 0,727 (Tabela 2) e para sensor em laboratório obtiveram coeficientes ainda mais altos, em torno de 0,9 para estes elementos (Tabela 3). Tal fato também foi observado por Galvão; Pizarro e Epiphanyo (2001) utilizando dados AVIRIS.

Nos modelos gerados para ferro e titânio total, as bandas 1, 2 e 8 foram selecionadas em ambos os casos (Tabela 1). As bandas 1 e 2 referem-se à faixa do visível, verde (520-600 nm) e vermelho (630-690 nm), nestes comprimentos de onda ocorrem algumas das bandas de absorção do ferro como em 550 nm pelo Fe^{2+} ou estão muito próximas a elas como do Fe^{2+} em 510 nm e do Fe^{3+} em 700 nm. O titânio, por sua vez, pode estar associado ao ferro na ilmenita ($FeTiO_3$) ou na forma dos minerais anatásio e rutilo que, também podem conter ferro em sua estrutura como impureza, com isso, a feição de absorção do titânio no visível acaba tendo uma aparência muito próxima à observada para o ferro (MENESES; FERREIRA JUNIOR, 2001).

A banda 8, na faixa do infravermelho médio, também corresponde às bandas de absorção em torno de 2000 a 2500 nm, devido à ligação metal-OH, no qual o metal pode ser Fe e Ti, entre outros (MENESES; FERREIRA JUNIOR, 2001).

Com relação ao silício, a grande maioria dos minerais existentes no solo apresenta este elemento na sua estrutura. Além disso, sabe-se que o quartzo, composto basicamente de silício, apesar de não apresentar feições de absorção do visível ao infravermelho, possui uma alta intensidade de reflectância nesta faixa (BENDOR; IRONS; EPEMA, 1999). Diante disso, esperava-se que todas as bandas ASTER fossem inseridas no modelo e não apenas quatro, as duas do visível (1 e 2) e duas do infravermelho médio (4 e 5).

Verifica-se, entretanto, que os elementos do ataque sulfúrico apresentam resultados consistentes, com coeficientes em geral acima de 0,5, demonstrando que é possível estimar este atributos através de sensores orbitais e terrestres. Isso se deve ao fato de estes elementos fazerem parte da mineralogia do solo, o que tem grande efeito na resposta espectral, principalmente na faixa do visível e infravermelho. Vale ressaltar que, dentre os três, a sílica foi a que obteve menores coeficientes em todos os trabalhos.

Para os atributos granulométricos, argila e areia, os coeficientes foram de 0,36 e 0,35, respectivamente (Tabela 1). Estes valores foram considerados baixos e discordam dos obtidos por Sousa Junior (2005) que trabalhando com imagem ASTER na região de Ibaté e São Carlos, obteve coeficientes de determinação de 0,56 para argila e 0,52 para areia (Tabela 2). Fiorio (2002), utilizando imagem TM obteve um R^2 de 0,61 para argila e 0,63 para areia, enquanto Sullivan et al (2005) utilizando um sensor aerotransportado obtiveram 0,42 para areia e 0,59 para argila (Tabela 2).

Poucas bandas foram selecionadas nos modelos de areia e argila, sendo que a banda 8 está presente em ambos os casos, pois relaciona-se com a mineralogia do solo, especialmente aos minerais de argila (MENESES; FERREIRA JUNIOR, 2001). Entretanto, esperava-se que a banda 7 também estivesse presente, pois é a que mais se relaciona com a faixa conhecida para as absorções da caulinita e da gibbsita.

Tabela 1 - Equações de regressão múltipla para estimativa dos atributos do solo usando dados espectrais e topográficos

Atributo	Modelo ⁽¹⁾	R ²⁽²⁾
ASTER		
Ca ⁽³⁾	$\sqrt{\text{Ca}} = 24,85 + (125,2 \cdot \text{B1}) + (32 \cdot \text{B4}) + (-176,6 \cdot \text{B6}) + (-81,22 \cdot \text{B8})$	0,47
Mg ⁽⁴⁾	$\text{Mg} = 15,58 + (230,03 \cdot \text{B4}) + (251,81 \cdot \text{B6}) + (-554,51 \cdot \text{B8})$	0,34
H + Al ⁽⁵⁾	$\text{HAI} = 46,30 + (-206,7 \cdot \text{B2}) + (850,9 \cdot \text{B3}) + (-557,3 \cdot \text{B4})$	0,23
MO ⁽⁶⁾	$\text{MO} = 36,10 + (-110,79 \cdot \text{B5})$	0,20
S ⁽⁷⁾	$\text{S} = 40,59 + (-584,73 \cdot \text{B1}) + (1089,18 \cdot \text{B4}) + (945,52 \cdot \text{B6}) + (-2001,93 \cdot \text{B8})$	0,43
CTC ⁽⁸⁾	$\text{CTC} = 154,65 + (991,74 \cdot \text{B2}) + (-956,42 \cdot \text{B3}) + (973,80 \cdot \text{B4}) + (1031,94 \cdot \text{B6}) + (-2267,81 \cdot \text{B8})$	0,51
SiO ₂ ⁽⁹⁾	$\text{LogSiO}_2 = 2,43 + (-9,97 \cdot \text{B1}) + (9,32 \cdot \text{B2}) + (3,36 \cdot \text{B4}) + (-8,39 \cdot \text{B5})$	0,48
Fe ₂ O ₃ ⁽¹⁰⁾	$\text{LogFe}_2\text{O}_3 = 2,96 + (-20,03 \cdot \text{B1}) + (10,16 \cdot \text{B2}) + (-2,59 \cdot \text{B8})$	0,65
TiO ₂ ⁽¹¹⁾	$\text{LogTiO}_2 = 2,11 + (-20,73 \cdot \text{B1}) + (10,23 \cdot \text{B2}) + (-1,49 \cdot \text{B8})$	0,66
Argila	$\text{Argila} = 687,46 + (-2078,20 \cdot \text{B8})$	0,36
Areia	$\text{Areia} = -78,08 + (-3012,38 \cdot \text{B2}) + (4800,88 \cdot \text{B8})$	0,36
ASTER + TOPOGRAFIA		
Ca	- ⁽¹²⁾	
Mg	-	
H + Al	-	
MO	$\text{MO} = 68,58 + (-102,85 \cdot \text{B5}) + (-0,07 \cdot \text{EL})$	0,25
S	-	
CTC	-	
SiO ₂	$\text{SiO}_2 = 24,91 + (-1301,66 \cdot \text{B1}) + (1890,66 \cdot \text{B2}) + (-891,89 \cdot \text{B3}) + (1222,74 \cdot \text{B4}) + (-1124,56 \cdot \text{B5}) + (735,81 \cdot \text{B6}) + (-1243,10 \cdot \text{B8}) + (0,28 \cdot \text{EL}) + (-0,04 \cdot \text{AS})$	0,58
Fe ₂ O ₃	$\text{LogFe}_2\text{O}_3 = 2,12 + (-21,45 \cdot \text{B1}) + (10,54 \cdot \text{B2}) + (-2,42 \cdot \text{B8}) + (0,0020 \cdot \text{EL}) + (-0,0004 \cdot \text{AS})$	0,68
TiO ₂	$(\text{TiO}_2)^{0,3} = -0,30 + (9,14 \cdot \text{B1}) + (-4,29 \cdot \text{B2}) + (0,0008 \cdot \text{EL}) + (0,0001 \cdot \text{AS})$	0,66
Argila	$\text{Argila} = 109,39 + (-5473,10 \cdot \text{B1}) + (5137,16 \cdot \text{B2}) + (-2353,59 \cdot \text{B8}) + (1,18 \cdot \text{EL}) + (-0,14 \cdot \text{AS})$	0,52
Areia	$\text{Areia} = -133,03 + (-2988,14 \cdot \text{B2}) + (4871,70 \cdot \text{B8}) + (0,22 \cdot \text{AS})$	0,38

⁽¹⁾ B1...B8: Bandas ASTER; EL: elevação; AS: aspecto

⁽²⁾ Coeficiente de determinação

⁽³⁾ Cálcio

⁽⁴⁾ Magnésio

⁽⁵⁾ Acidez potencial

⁽⁶⁾ Matéria Orgânica

⁽⁷⁾ Soma de Bases

⁽⁸⁾ Capacidade de troca catiônica

⁽⁹⁾ Silício Total

⁽¹⁰⁾ Ferro Total

⁽¹¹⁾ Titânio Total

⁽¹²⁾ Não foram gerados modelos significativos com dados orbitais e topográficos

Quando foram utilizados sensores terrestres para a quantificação de areia e argila, todas as referências, citadas na tabela 2, mostram altos coeficientes de determinação, acima de 0,70. Este melhor resultado para os dados terrestres, provavelmente se deve à falta de interferência da atmosfera, as amostras são padronizadas com relação à umidade e granulometria e ao maior número de bandas espectrais, neste nível de aquisição de dados (NANNI; DEMATTÊ, 2006).

A matéria orgânica mostrou um baixo valor de R^2 com 0,20, semelhante ao obtido por Sousa Junior (2005) de 0,32 utilizando imagem ASTER e ao de Coleman; Agbu e Montgomery (1993) com 0,108 (Tabela 2) trabalhando com imagem TM. Nanni e Demattê (2006), utilizando sensor em laboratório obtiveram um R^2 de 0,797, enquanto Sousa Junior (2005), também com sensor em laboratório obteve 0,38 (Tabela 3).

A matéria orgânica tem grande influência na curva espectral do solo, por isso, espera-se que os modelos estatísticos sejam capazes de estimar este atributo de forma eficiente. No caso deste trabalho, apenas a banda 5 foi selecionada, que corresponde à faixa do infravermelho médio que vai de 2145 a 2185 nm, como a matéria orgânica possui vários grupos funcionais, que estão relacionados a diversas feições de absorção (BEN-DOR; IRONS; EPEMA, 1999), talvez uma destas feições esteja presente na faixa recoberta pela banda 5.

Por outro lado, Henderson et al. (1992) verificaram que as diferentes fases de decomposição da matéria orgânica apresentam respostas espectrais distintas em todo espectro eletromagnético, este fato pode ser a causa da variabilidade dos coeficientes de determinação obtidos pelos diferentes sensores.

Com relação aos atributos químicos, cálcio e soma de bases apresentaram R^2 de 0,47 e a CTC de 0,51 (Tabela 1). Já o magnésio e a acidez obtiveram coeficientes menores (0,34 e 0,23, respectivamente). Sousa Junior (2005) obteve 0,47 para cálcio e 0,52 para CTC e soma de bases, utilizando imagem ASTER (Tabela 2). Coeficientes similares foram verificados por Nanni e Demattê (2006) e Fiorio (2002) com imagens TM-Landsat (Tabela 2). No caso dos sensores terrestres Chang et al. (2001), Shepherd e Walsh (2002) e Nanni e Demattê (2006) obtiveram valores de R^2 acima de 0,7 para cálcio e CTC (Tabela 3).

Nota-se, nos modelos gerados para os atributos químicos que, praticamente, todos possuem as bandas 4, 6 e 8, todas na faixa do infravermelho médio, na qual ocorre maior influência da mineralogia e da matéria orgânica do solo, que são as principais fontes das cargas do solo e, desta forma, atuam sobre suas propriedades químicas avaliadas neste trabalho. A CTC representa a quantidade de íons positivos que podem ser retidos no solo por atração eletrostática, ou seja, por atração de cargas elétricas opostas e, os principais cátions trocáveis que podem ser atraídos são cálcio, magnésio, potássio, sódio, alumínio e hidrogênio (RAIJ et al., 2001).

3.3.2 Quantificação de teores de atributos do solo por dados de satélite e topográficos

Com o intuito de verificar a utilização de informações de relevo na quantificação de atributos do solo, foram inseridas nos modelos espectrais, como variáveis independentes, a elevação, a declividade e o aspecto.

Para os atributos químicos magnésio, cálcio, acidez potencial ($H + Al$), soma de bases (S) e CTC nenhum atributo de relevo foi considerado significativo para entrar no modelo (Tabela 1). Isso pode ser efeito das modificações ocorridas devido ao manejo químico e aos processos erosivos ocorrentes na área, visto que se utilizaram amostras da camada superficial para a geração dos modelos.

Os atributos físicos argila e areia com a inclusão dos dados de relevo, obtiveram modelos com maior coeficiente de determinação. Para argila, elevação e aspecto foram inseridos elevando o R^2 de 0,36 para 0,52. Já para areia, aspecto foi o atributo selecionado e o R^2 passou de 0,36 para 0,38 (Tabela 1), Moore et al. (1993) utilizando apenas dados de topografia obtiveram para areia, coeficiente de 0,52 com a declividade fazendo parte do modelo estatístico.

Ao modelo para estimar matéria orgânica foi adicionada a variável elevação e o coeficiente aumentou de 0,20 para 0,25 (Tabela 1). Moore et al. (1993), utilizando apenas parâmetros de topografia para prever atributos do solo obtiveram, para matéria orgânica, um R^2 de 0,48 incluindo no modelo o fator aspecto.

Para os elementos do ataque sulfúrico SiO_2 , Fe_2O_3 e TiO_2 , os atributos elevação e aspecto foram inseridos nos modelos e, para o caso do SiO_2 , isto resultou em aumento do coeficiente de 0,48 para 0,58, enquanto para o ferro o aumento foi de 0,65 para 0,68 e para TiO_2 se manteve o mesmo (Tabela 1).

As propriedades do solo variam com a topografia. Uma razão para isso é a orientação da vertente (aspecto) na qual o solo se forma, isso afeta o microclima, ou seja, a radiação recebida, temperatura do solo e exposição ao vento (PORTA CASANELLAS; LÓPEZ-ACEVEDO REGUERÍN; ROQUERO DE LABURU, 1999) com consequentemente diferenciação no solo. Nas vertentes mais sombreadas (face sudeste no hemisfério sul), as temperaturas do solo são menores, assim como a evapotranspiração, condicionando ambientes mais úmidos em comparação com as vertentes voltadas para o noroeste, mais ensolaradas à tarde. Resultam destas condições, alterações na intensidade dos processos de hidratação, hidrólise, oxidação e redução, dependendo da direção da face da encosta (OLIVEIRA; JACOMINE; CAMARGO, 1992). Estes efeitos da orientação da vertente sobre os atributos do solo, explicam sua presença nos modelos estatísticos de argila, areia, ferro, silício e titânio, aumento o coeficiente de determinação dos mesmos (Tabela 1).

Tabela 2 – Trabalhos na literatura utilizando sensores orbitais para a quantificação de atributos do solo

Autores	Sensor	Atributo	R ²
COLEMAN; AGBU; MONTGOMERY (1993)	TM – Landsat 5	Areia	0,143
		Silte	0,173
		Argila	0,406
		Óxidos de ferro	0,288
		Matéria orgânica	0,108
FIORIO (2002)	TM – Landsat 5	Argila	0,6140
		Al ₂ O ₃	0,6783
		Fe ₂ O ₃	0,6724
		SiO ₂	0,6531
		TiO ₂	0,7210
		Areia	0,6356
		Silte	0,5435
		Matéria orgânica	0,4100
		Soma de bases	0,3466
		V% ¹	0,013
SULLIVAN et al. (2005)	ATLAS	m% ²	0,1374
		CTC ³	0,4595
		C orgânico	0,34
		Ferro	0,47
		Areia	0,42
SOUSA JUNIOR (2005)	ASTER	Argila	0,59
		Areia	0,53
		Silte	0,33
		Argila	0,57
		Matéria orgânica	0,32
		Magnésio	0,38
		Cálcio	0,47
		Soma de bases	0,52
		CTC ³	0,52
		H+Al ⁴	0,42
NANNI; DEMATTÊ (2006)	TM-Landsat 5	Areia	0,525
		Argila	0,675
		Silte/Argila	0,561
		Matéria orgânica	0,508
		Soma de bases	0,492
		CTC ³	0,551
		m% ²	0,106
		V % ¹	0,198
		SiO ₂	0,598
		Fe ₂ O ₃	0,725
		TiO ₂	0,727

¹ Saturação por bases

² Saturação por alumínio

³ Capacidade de troca catiônica

⁴ Acidez potencial

Tabela 3 – Trabalhos na literatura utilizando sensores em laboratório para a quantificação de atributos do solo

Autores	Faixa espectral (nm)	Atributo	R ²
NANNI; DEMATTÊ (2006)	450 - 2500	Areia	0,796
		Argila	0,915
		Silte	0,269
		Matéria orgânica	0,797
		Soma de bases	0,876
		CTC ³	0,910
		m% ²	0,459
		V % ¹	0,293
		SiO ₂	0,926
		Fe ₂ O ₃	0,950
SOUSA JUNIOR (2005)	450 - 2500	TiO ₂	0,952
		Areia	0,84
		Silte	0,57
		Argila	0,70
		Matéria orgânica	0,38
		Magnésio	0,41
		Cálcio	0,20
		Soma de bases	0,21
		CTC ³	0,50
		H+Al ⁴	0,32
ISLAM; SINGH; McBRATNEY (2003)	250 - 2500	CTC	0,64
		Cálcio	0,67
		Magnésio	0,63
		Argila	0,72
		Areia	0,53
		Silte	0,05
SHEPHERD; WALSH (2002)	350 - 2500	CTC	0,88
		Cálcio	0,88
		Magnésio	0,81
		Argila	0,78
		Areia	0,76
		Silte	0,67
CHANG et al. (2001)	400 - 2498	CTC	0,81
		Cálcio	0,75
		Potássio	0,55
		Magnésio	0,68
		Argila	0,67
		Areia	0,82
		Silte	0,84

¹ Saturação por bases

² Saturação por alumínio

³ Capacidade de troca catiônica

⁴ Acidez potencial

3.3.3 Validação das equações de regressão múltipla na quantificação dos atributos dos solos

Para validar as equações de quantificação de atributos geradas utilizando as informações espectrais e topográficas, foi realizado um gráfico de dispersão entre os valores determinados em laboratório e os valores estimados pelo modelo. Esta análise foi realizada para os atributos, cujo R^2 obtido foi igual ou superior a 0,5 a partir de amostras não usadas na geração dos modelos estatísticos.

A CTC obteve valor muito baixo na validação com R^2 de 0,07 (Figura 1). Sousa Junior (2005), utilizando dados ASTER para quantificar atributos do solo também obteve valor baixo para CTC de 0,09, enquanto Fiorio (2002), usando imagem TM obteve 0,59 para CTC. No nível terrestre, Shepherd e Walsh (2002) obtiveram 0,88, enquanto Brown et al. (2006) obtiveram 0,83 para o mesmo atributo.

Para argila, o coeficiente obtido foi de 0,59 (Figura 1), maior que o encontrado por Sousa Junior (2006), utilizando imagem ASTER que foi de 0,34, Fiorio (2002) com o sensor TM que foi de 0,71 e Sullivan et al. (2005) com 0,66. Já para os sensores terrestres, Brown et al. (2006) obtiveram 0,91 e Shepherd e Walsh (2002) 0,78.

Para os elementos do ataque sulfúrico Fe, Ti e Si os coeficientes foram de 0,55, 0,41 e 0,12 respectivamente (Figura 2). Brown et al. (2006), com análise em laboratório, obtiveram para Ferro extraído por ditionito R^2 de 0,77 e Sullivan et al (2005), usando sensor a bordo de um avião obtiveram 0,27 também para Ferro ditionito.

A validação das equações de quantificação, para os atributos aqui analisados, utilizando dados ASTER e topográficos, mostram resultados satisfatórios, discordando dos verificados por Sousa Junior (2005) utilizando apenas dados ASTER. Já os resultados obtidos por Fiorio (2002) para imagem TM foram considerados adequados.

Figura 1 – Gráficos de dispersão entre os valores determinados em laboratório e os estimados pelas equações de regressão múltipla para os atributos CTC e Argila

Figura 2 – Gráficos de dispersão entre os valores determinados em laboratório e os estimados pelas equações de regressão múltipla para os elementos do ataque sulfúrico

3.4 Conclusões

1. Os modelos utilizando dados espectrais e topográficos foram melhores para estimar atributos do solo, quando comparados com os modelos contendo apenas dados espectrais;
2. É possível quantificar elementos do solo como argila, ferro total e titânio a partir de uma imagem de satélite ASTER e dados topográficos, para coeficientes na faixa de 0,5 na referida região.

Referências

ALVES, M.R. **Caracterização e uso da bacia hidrográfica do Córrego Zerede, Timóteo-MG**. 2005. 95 p. Dissertação (Mestrado em Ciência Florestal) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2005

ANALYTICAL IMAGING AND GEOPHYSICS. **Atmospheric correction now (ACORN) 3.12**. Boulder, 2001. 1CD-ROM.

BARRET, F.; JACQUEMOUND, S.; HANOCQ, J.F. The soil line concept in remote sensing. **Remote Sensing Reviews**, London, v. 7, n. 1, p. 1-18, 1993.

BEN-DOR, E.; IRONS, J.R.; EPEMA, G.F. Soil reflectance. In: RENCZ, A.N. (Ed.). **Remote sensing for the earth sciences: manual of remote sensing**. 3rd ed. New York: John Wiley. 1999. chap. 3, p. 111-188.

BROWN, D.J.; SHEPHERD, K.D.; WALSH, M.G.; DEWAYNE MAYS, M.; REINSCH, T.G. Global soil characterization with VNIR diffuse reflectance spectroscopy. **Geoderma**, Amsterdam, v. 132, n. 3/4, p. 273-290, June 2006.

CAMARGO, A.O.de; MONIZ, A.C.; JORGE, J.A.; VALADARES, J.M. **Métodos de análise química, mineralógica e física de solos do IAC**. Campinas: IAC, 1986. 94 p. (IAC. Boletim Técnico, 106).

CENTRO NACIONAL DE ENSINO E PESQUISA AGRONÔMICA. **Levantamento de reconhecimento de solos do Estado de São Paulo**. Rio de Janeiro: Ministério da Agricultura, 1960. 637 p. (SNPA. Boletim 12).

CHANG, C.; LAIRD, D.A.; MAUSBACH, M.J.; HURBURGH JUNIOR, C.R. Near infrared reflectance spectroscopy – principal components regression analyses of soil properties. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 65, n. 2, p. 480-490, Mar./Apr. 2001.

COLEMAN, T.L.; AGBU, P.A.; MONTGOMERY, O.L. Spectral differentiation of surface soils and soil properties: is it possible from space platforms? **Soil Science**, Baltimore, v. 155, n. 4, p. 283-293, Mar. 1993.

CRÓSTA, A.P. **Processamento digital de imagens de sensoriamento remoto**. Campinas: UNICAMP, IG, 1992. 170 p.

DANIEL, K.W.; TRIPATHI, N.K.; HONDA, K. Artificial neural network analysis of laboratory and in situ spectra for the estimation of macronutrients in soils of Lop Buri (Thailand). **Australian Journal of Soil Research**, Collingwood, v. 41, n. 1, p. 47-59, 2003.

DEMATTÊ, J.A.M.; NANNI, M.R. Weathering sequence of soils developed from basalt as evaluated by laboratory (IRIS), airborne (AVIRIS) and orbital (TM) sensors. **International Journal of Remote Sensing**, London, v. 24, n. 23, p. 4715-4738, Dec. 2003.

DOBOS, E.; MICHELI, E.; BAUMGARDNER, M.F.; BIEHL, L.; HELT, T. Use of combined digital elevation model and satellite radiometric data for regional soil mapping. **Geoderma**, Amsterdam, v. 97, n. 3/4, p. 367-391, Sept. 2000.

EMBRAPA. **Sistema brasileiro de classificação de solos**. Brasília: Serviço de Produção de Informação, 1999. 412 p.

ENVIRONMENTAL SYSTEMS RESEARCH INSTITUTE. **ArcGIS 9.0**. Redlands, 2005. 3 CD-ROM.

FIORIO, P.R. **Dados radiométricos obtidos nos níveis terrestre e orbital na avaliação de solos**. 2002. 198 p. Tese (Doutorado em Solos e Nutrição de Plantas) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2002

GALVÃO, L.S.; PIZARRO, M.A.; EPIPHANIO, J.C.N. Variations in reflectance of tropical soils: spectral-chemical composition relationships from AVIRIS data. **Remote Sensing of Environment**, New York, v. 75, n. 4, p. 245-255, Feb. 2001.

HENDERSON, T.L.; BAUMGARDNER, M.F.; FRANZMEIER, D.P.; SCOTT, D.E.; COSTER, D.C. Spectral band selection for classification of soil organic matter content. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 56, n. 3, p. 865-872, May/June 1992.

HUETE, A.R. A soil-adjusted vegetation index (SAVI). **Remote Sensing of Environment**, New York, v. 25, n. 3, p. 295-309, Aug. 1988.

HUETE, A. R. Remote sensing of soils and soil processes. In: USTIN, S. (Ed). **Remote sensing for natural resources management and environmental monitoring**: manual of remote sensing, 3rd ed. Hoboken: John Wiley, 2004. v. 4, chap 1, p. 3-52.

INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS. Divisão de Minas e Geologia Aplicada. **Mapa geológico de Estado de São Paulo**. São Paulo, 1981. Escala 1:1000.000.

ISLAM, K.; SINGH, B. McBRATNEY, A.B. Simultaneous estimation of several soil properties by ultra-violet, visible, and near-infrared reflectance spectroscopy. **Australian Journal of Soil Research**, Collingwood, v. 41, n. 6, p. 1101-1114, 2003.

JACKSON, R.D.; HUETE, A. R. Interpreting vegetation indices. **Preventive Veterinary Medicine**, Amsterdam, v. 11, n. 3/4, p. 185-200, Dec. 1991.

LAGACHERIE, P.; VOLTZ, M. Predicting soil properties over a region using sample information from a mapped reference área and digital elevation data: a conditional probability approach. **Geoderma**, Amsterdam, v. 97, n. 3/4, p. 187-208, Sept. 2000.

McBRATNEY, A.C.; MINASNY, B.; VISCARRA ROSSEL, R. Spectral soil analysis and inference systems: a powerful combination for solving the soil data crisis. **Geoderma**, Amsterdam, 2006. In press. Disponível em: <http://www.sciencedirect.com/science/journal/00167061>>. Acesso em 7 jun. 2006.

MENESES, P.R.; FERREIRA JUNIOR, L.G. Comportamento espectral de minerais e rochas. In: MENESES, P.R.; MADEIRA NETTO, J.S. (Org.). **Sensoriamento remoto**: reflectância de alvo naturais. Brasília: Editora UnB; EMBRAPA Cerrados, 2001. cap. 3, p. 63-126.

MOORE, I.D.; GESSLER, P.E.; NIELSEN, G.A.; PETERSON, G.A. Soil attributes prediction using terrain analysis. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 57, n. 6, p. 443-452, Nov./Dec. 1993.

NANNI, M.R. **Dados radiométricos obtidos em laboratório e no nível orbital na caracterização e mapeamento de solos**. 2000. 366 p. Tese (Doutorado em Solos e Nutrição de Plantas) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba. 2000.

NANNI, M.R.; DEMATTÊ, J.A.M. Spectral methodology in comparison to traditional soil analysis. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 70, n. 2, p. 393-407, Mar./Apr. 2006.

OLIVEIRA, J.B.; JACOMINE, P.K.T.; CAMARGO, M.N. **Classes gerais de solos do Brasil**. Jaboticabal: FUNEP, 1992. 201 p.

PORTA CASANELLAS, J.; LOPÉZ-ACEVEDO REGUERÍN, M.; ROQUERO DE LABURU, C. **Edafología**: para la agricultura y el medio ambiente. Bilbao: Mundi-Prensa, 1999. 849 p.

RAIJ, B. van; QUAGGIO, J.A. **Métodos de análise de solo para fins de fertilidade**. Campinas: IAC, 1989. 40 p. (IAC. Boletim Técnico 8).

RAIJ, B. van; QUAGGIO, J.A.; CANTARELLA, H.; ABREU, C.A. Os métodos de análise química do sistema IAC de análise de solo no contexto nacional. In: RAIJ, B.van; ANDRADE, J.C.; CANTARELLA, H.; QUAGGIO, J.A. (Ed.). **Análise química para avaliação da fertilidade de solos tropicais**. Campinas: IAC. 2001. cap. 1, p. 5-39.

RESEARCH SYSTEMS INC. **ENVI 4.1.**, 2005. Boulder, 2005. 2 CD-ROM.

SCULL, P.; FRANKLIN, J.; CHADWICK, O.A.; McARTHUR, D. Predictive soil mapping: a review. **Progress in Physical Geography**, London, v. 27, n. 2, p. 171-197, June 2003.

SHEPHERD, K.D.; WALSH, M.G. Development of reflectance spectral libraries for characterization of soil properties. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 66, n. 3, p. 988-998, May/June 2002.

SOUSA JUNIOR, J.G. **Sensoriamento remoto e sistema de informações geográficas na caracterização de solos e quantificação de seus atributos**. 2005. 141 p. Dissertação (Mestrado em Solos e Nutrição de Plantas) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2005.

STATISTICAL ANALYSIS SYSTEM. **SAS 8.02**. Cary, 1999. 5 CD-ROM.

SULLIVAN, D.G.; SHAW, J.N.; RICKMAN, D.; MASK, P.L.; LUVALL, J.C. Using remote sensing data to evaluate surface soil properties in Alabama Ultisols. **Soil Science**, Philadelphia, v. 170, n. 12, p. 954-968, Dec. 2005.

UDELHOVEN, T.; EMMERLING, C.; JARMER, T. Quantitative analysis of soil chemical properties with diffuse reflectance spectroscopy and partial least-square regression: a feasibility study. **Plant and Soil**, Dordrecht, v. 251, n. 2, p. 319-329, Apr. 2003.

VISCARRA ROSSEL, R.; WALVOORT, D.J.J.; McBRATNEY, A.B.; JANIK, L.J.; SKJEMSTAD, J.O. Visible, near infrared, mid infrared or combined diffuse reflectance spectroscopy for simultaneous assessment of various soil properties. **Geoderma**, Amsterdam, v. 131, n. 1/2, p. 59-75, Mar. 2006.

4 MODELO DE ANÁLISE DE MISTURA ESPECTRAL COM MÚLTIPLOS MEMBROS FINAIS (MESMA) NO MAPEAMENTO DE ATRIBUTOS DO SOLO POR IMAGEM ASTER

Resumo

A obtenção de informações sobre solo de modo sistematizado e baseado em dados físicos é necessária com a crescente demanda no sistema agrícola e ambiental. Este trabalho pretende, pois, testar a técnica do modelo de análise de mistura espectral com múltiplos membros finais (MESMA) para mapear atributos do solo em uma imagem ASTER. Para tanto, foram utilizadas 184 amostras georeferenciadas de terra da região de Rafard. Estes pontos foram sobrepostos a imagem de satélite para a coleta dos dados espectrais. Na sequência, as informações de laboratório e da imagem foram combinadas e procedeu-se o agrupamento das amostras em classes para os atributos textura, matéria orgânica, saturação por bases, CTC e ferro total. Após classificadas, geraram-se curvas médias para cada classe de atributo. As informações espectrais foram utilizadas como membros finais para a geração dos mapas através do MESMA. Mapas dos mesmos atributos também foram obtidos através de análise geoestatística. A partir dos dois mapas gerados, realizou-se uma análise de tabulação cruzada entre eles para verificar a eficiência do MESMA no mapeamento de atributos do solo. Observou-se que houve até 75% de similaridade entre os mapas de textura, matéria orgânica, CTC e ferro total. Conclui-se que a metodologia mostra-se eficiente no mapeamento de atributos do solo.

Palavras Chaves: Imagem ASTER; Atributos do solo; MESMA

MULTIPLE ENDMEMBER SPECTRAL MIXTURE ANALYSIS (MESMA) ON SOIL ATTRIBUTES MAPPING BY ASTER IMAGE

Abstract

To acquire information about soils in a systematic way and based on physical data is necessary with the increasing demand on agricultural and environmental systems. This work aims to utilize the multiple endmember spectral mixture analysis (MESMA) technique to map soil attributes in an ASTER image. For this, 184 georeferenced soil samples from Rafard, SP. These points were also overlaid to the image for spectral data collection. After that, laboratory and image information were combined and clustered based on attribute classes for clay content, organic matter, base saturation (V%), CEC and total iron content. After this classification, mean spectral curves were

generated for each attribute class. These spectral informations were used as endmembers to generate the maps through MESMA. Maps for the same attributes were also obtained through geostatistical analysis. Based on the generated maps, it was obtained an confusion matrix between them to verify MESMA efficiency on soil attributes mapping. It was observed 75% of similarity between maps for clay content, organic matter, CEC and total iron content. Results showed that the methodology is efficient for soil attributes mapping.

Key Words: ASTER Image; Soil Attributes; MESMA

4.1 Introdução

O entendimento da distribuição espacial das propriedades do solo é importante para refinar as práticas de manejo e minimizar os problemas ambientais (MAPA; KUMARAGAMAGE, 1996; MCKENZIE; RYAN, 1999). O estudo dos atributos físicos e químicos do solo, sempre foi importante instrumento no processo de análise de produtividade e da conseqüente escolha sobre técnicas de manejo a serem adotadas em uma determinada área (PIERCE; NOWAK, 1999). No Brasil, por exemplo, grandes áreas agrícolas sobre Latossolos, considerados homogêneos do ponto de vista pedológico e de manejo, apresentam diferenças na distribuição espacial de seus atributos (CORÁ et al., 2000), o que pode afetar o manejo de tais áreas. Outro exemplo, é a importante correlação entre teor de matéria orgânica e resíduos de herbicidas (LING et al., 2005). Portanto, conhecer de contramão a distribuição espacial do atributo matéria orgânica é uma importante informação que permite aplicar quantidades diferenciadas dos produtos químicos.

A determinação de mapas de atributos do solo foram inicialmente obtidos utilizando-se métodos estatísticos como inverso da distância, krigagem fatorial e ordinária e lógica *fuzzy*. Os métodos estatísticos convencionais necessitam de amostras de terra coletadas no campo e analisadas em laboratório, o que demanda tempo e custo. Com o advento do sensoriamento remoto, observou-se que existe estreita relação entre atributos de solo e a informação eletromagnética refletida. Inicialmente estudadas por radiometria ao nível de laboratório, os solos passaram a ser também avaliados ao nível de satélite. A premissa básica é que através de uma imagem pode-

se determinar o teor de determinado atributo físico, diminuindo o custo de análise, aumento de velocidade de informação e maior detalhamento no mapeamento.

Os dados obtidos através do sensoriamento remoto podem ser utilizados para caracterizar e mapear atributos do solo de diferentes formas, como realizando medições diretas comparáveis com as formas tradicionais, ou seja, gerando informações sobre o comportamento espectral do solo e também através de modelos de mistura espectral (SMA – *Spectral Mixture Analysis*) para isolar e discriminar propriedades do solo, assim como gerar imagens de seus componentes (HUETE, 2004).

Para se chegar a tal resultado, a técnica de análise de mistura tem como premissa que cada pixel da imagem é uma medida única de uma área que compreende múltiplos componentes e o espectro desta mistura é uma combinação linear da reflectância destes componentes ou membros finais (*endmembers*). Os membros finais são, então, os elementos cuja presença e abundância na imagem estão sendo modeladas (TOMPKINS et al., 1997).

Entretanto, este método considera todos os pixels como mistura de um único conjunto inicial de membros finais. Desta forma, pode-se ter um pixel modelado por membros finais que nele sejam inexistentes. Considerando-se uma cena descrita pelos membros finais: vegetação, solo e sombra, o cálculo da mistura será realizado com base nos três elementos, mesmo que não haja um dos componentes para o pixel (CARVALHO JUNIOR et al., 2003).

Diante disso, foi proposto um novo método que gera para cada *pixel* o melhor modelo de mistura, chamado de modelo de análise de mistura espectral com múltiplos membros (*Multiple Endmember Spectral Mixture Analysis* - MESMA) (ROBERTS et al., 1998). O MESMA difere do SMA por permitir que o número e o tipo de membros finais, tanto quanto sua abundância, variem de pixel para pixel (CARVALHO JUNIOR et al., 2003). Esta técnica tem sido utilizada no mapeamento de vegetação (OKIN et al., 2001), depósitos minerais (CARVALHO JUNIOR et al., 2003) e queimada (ROBERTS et al., 2003), porém pouco se sabe da relação com solos..

A resposta espectral do solo em imagens de satélite é afetada pela presença e teor dos atributos que o compõem, tornando possível identificá-los e mapeá-los. Portanto, o presente trabalho tem por objetivo determinar o potencial da técnica do

modelo de análise de mistura espectral com múltiplos membros na espacialização de classes de atributos do solo por imagem de satélite. Tais resultados podem auxiliar em mapeamentos mais rápidos e menos onerosos, integrando mais uma informação para a tomada de decisões relacionadas a mapeamento e manejo de solos.

4.2 Material e Métodos

4.2.1 Área de estudo

A área de estudo, com aproximadamente 198 ha e margeada pelo Rio Capivari, localiza-se no município de Rafard, sudoeste do Estado de São Paulo. É delimitada pelas coordenadas geográficas 23°0'31,37" – 22°58'53,97" latitude sul e 53°39'47,81" – 53°37'25,65" longitude oeste. O clima da região é classificado como mesotérmico de inverno seco em que a temperatura média do mês mais frio é inferior a 18°C e a do mês mais quente ultrapassa 22°C (CENTRO NACIONAL DE ENSINO E PESQUISA AGRONÔMICA, 1960).

A geologia da região pertence à formação Itararé, Grupo Tubarão (IPT, 1981) constituindo-se de arenitos de granulação heterogênea, argilitos e folhelhos de colorações variadas desde o cinza claro ao escuro. A área possui ainda basaltos da formação Serra Geral, Grupo São Bento e, próximo ao rio, seixos. O relevo em sua maior parte é caracterizado como ondulado e suave ondulado, sendo o primeiro de maior área e com altitude variando entre 475 e 565 m sobre o nível do mar.

4.2.2 Amostragem de solo e análise de terra

As informações sobre os procedimentos metodológicos de amostragem e análise de terra são detalhados em Nanni (2000) e a seguir descritos.

A área foi demarcada e estaqueada em forma de grade regular de 100x100 m gerando 184 pontos, perfazendo 184 ha. Cada estaca foi georeferenciada com GPS e a amostra coletada nas profundidades de 0-20 cm para o horizonte superficial e 80-100 para o horizonte subsuperficial.

As amostras de terra foram posteriormente, secas em estufa a 50°C por 48 horas e peneiradas (2 mm); na fração menor que 2 mm foram efetuadas as análises físicas e químicas.

Para a análise física, foram determinados os teores de areia, silte e argila a partir do método do densímetro (CAMARGO et al., 1986). Para as análises químicas, determinou-se pH em água e KCl, Ca^{2+} , Mg^{2+} , Al^{3+} , H^+ + Al^{3+} e matéria orgânica (MO) de acordo com Raij e Quaggio (1989). A partir desses dados, obteve-se o valor da soma de bases (S), capacidade de troca catiônica (CTC), saturação por bases (V%) e saturação por alumínio (m%). O ferro total (Fe_2O_3), a sílica (SiO_2) e o titânio (TiO_2) foram determinados pelo ataque sulfúrico, através de metodologia descrita por Camargo et al. (1986).

Posteriormente, as amostras foram agrupadas em relação a determinado atributo. A avaliação dos atributos com os dados espectrais foi realizada baseada em intervalos para cada um deles. Para matéria orgânica (MO) utilizaram-se as classes alto ($\text{MO} > 25 \text{ g dm}^{-3}$), médio (MO entre 15 e 25 g dm^{-3}) e baixo ($\text{MO} < 15 \text{ g dm}^{-3}$) (TOMÉ JR., 1997); para saturação por bases (V %) utilizou-se distrófico ($V < 50 \%$) e eutrófico ($V > 50 \%$) (TOMÉ JR., 1997); ferro total (Fe_2O_3) foi dividido em hipoférrico ($\text{Fe}_2\text{O}_3 < 80 \text{ g kg}^{-1}$), mesoférrico (Fe_2O_3 entre 80 e 180 g kg^{-1}) e férrico ($\text{Fe}_2\text{O}_3 > 180 \text{ g kg}^{-1}$) (EMBRAPA, 1999); a CTC foi dividida em muito baixo ($\text{CTC} < 30 \text{ mm}_c \text{ dm}^{-3}$), baixo (CTC entre 30 e $60 \text{ mm}_c \text{ dm}^{-3}$), médio (CTC entre 60 e $100 \text{ mm}_c \text{ dm}^{-3}$), alto (CTC entre 100 e $150 \text{ mm}_c \text{ dm}^{-3}$) e muito alto ($\text{CTC} > 150 \text{ mm}_c \text{ dm}^{-3}$) e, para textura utilizou-se as seguintes classes quanto ao teor de argila (TA): arenosa ($\text{TA} < 150 \text{ g kg}^{-1}$), média arenosa (TA entre 150 e 250 g kg^{-1}), média argilosa (TA entre 250 e 350 g kg^{-1}), argilosa (TA entre 350 e 600 g kg^{-1}) e muito argilosa ($\text{TA} > 600 \text{ g kg}^{-1}$) (DEMATTE et al., 2005).

4.2.3 Informações espectrais

O sensor ASTER do satélite TERRA possui 14 bandas sendo três na faixa do visível e infravermelho próximo, seis no infravermelho médio e cinco no infravermelho termal. Neste trabalho utilizaram-se as três bandas do visível e infravermelho próximo

assim designadas (nm): ASTER 1 (verde, 520-600), ASTER 2 (vermelho, 630-690), ASTER 3 (infravermelho próximo, 760-860) e cinco bandas do infravermelho médio ASTER 4 (infravermelho médio, 1600-1700), ASTER 5 (infravermelho médio, 2145-2185), ASTER 6 (infravermelho médio, 2185-2225), ASTER 7 (infravermelho médio, 2235-2285), ASTER 8 (infravermelho médio, 2295-2365). A data da imagem é de 6 de agosto de 2004.

Para a conversão dos níveis de cinza da imagem para reflectância e para eliminar o efeito da atmosfera na imagem de satélite ASTER, utilizou-se o programa ACORN (Atmospheric Correction Now) (AIG, 2001).

Posteriormente, a correção geométrica das imagens se fez necessária para integrá-las com uma base cartográfica. Desta forma, coletaram-se pontos de controle da área de estudo com um GPS trimble PRO-XRS, submétrico e pós-processado de acordo com os procedimentos descritos por Crósta (1992). Esta correção foi realizada no programa Environment for Visualizing Images – ENVI (RSI, 2005). O sistema de projeção e Datum utilizados foram UTM e SAD-1969, respectivamente.

Para a coleta dos dados espectrais orbitais, a informação da posição dos 184 pontos de amostragem foi sobreposta a composições coloridas das imagens utilizadas. Posteriormente, para certificar-se de que os pontos estavam sobre área de solo exposto, gerou-se uma imagem de índice de vegetação NDVI e utilizou-se o método da linha do solo.

Os índices de vegetação foram desenvolvidos para avaliar coberturas vegetais quantitativa e qualitativamente, utilizando-se dados espectrais (HUETE, 1988). O sucesso desta técnica se deve a reflectância diferencial da clorofila nos comprimentos de onda do visível (400-740 nm) e infravermelho (740-1400 nm). O NDVI (Normalized Difference Vegetation Index) é definido pela razão de bandas entre as faixas do vermelho e infravermelho (JACKSON; HUETE, 1991), para a imagem ASTER utilizaram-se as bandas ASTER 2 e ASTER 3.

A linha do solo, utilizada para a verificação das áreas de solo exposto, é uma relação gráfica entre as bandas do vermelho e infravermelho (BARRET; JACQUEMOUND; HANOCQ, 1993). As bandas utilizadas para esta análise foram as mesmas do índice de vegetação, ASTER 2 e ASTER 3.

4.2.4 Análise da imagem usando MESMA

O primeiro passo para a análise foi a geração de uma imagem NDVI, com o intuito de separar as áreas de vegetação daquelas de solo exposto. Na sequência, esta imagem NDVI foi utilizada como máscara, de tal forma que a vegetação ficasse com valor zero, gerando-se uma nova imagem. Esse procedimento foi realizado para que o tempo de processamento da imagem fosse reduzido.

Na sequência, o arquivo vetor dos pontos de amostragem foi sobreposto à nova imagem no programa ENVI 4.1 (RSI, 2005). Em seguida, a reflectância dos pixels referentes aos pontos de amostragem foi obtida.

A reflectância das oito bandas do sensor ASTER, para cada ponto de amostragem, foi então associada aos dados da análise de laboratório. Com isso, seguiu-se o agrupamento das amostras de acordo com as classes de atributos anteriormente mencionadas. Após o agrupamento, gerou-se o valor médio de reflectância para cada banda ASTER nas classes de atributos, ou seja, obteve-se a curva espectral média para as classes de atributos do solo.

As curvas espectrais médias foram inseridas no programa ENVI na forma de bibliotecas espectrais (BE). Foram geradas cinco bibliotecas, uma para cada atributo e cada uma composta pelas curvas espectrais médias das suas classes. Por exemplo, a BE para textura era composta por cinco curvas, que representam as classes arenosa, média arenosa, média argilosa, argilosa e muito argilosa.

Após isso, realizou a análise MESMA na imagem obtida, após a aplicação da máscara, utilizando como membros finais as cinco bibliotecas espectrais geradas. A análise foi realizada utilizando-se uma biblioteca de cada vez sobre a imagem. Como resultado, a análise gera uma imagem, na qual cada pixel é classificado como pertencente a uma classe de atributo. No caso de não haver concordância entre o dado da BE e do pixel, o mesmo não foi classificado.

Estas imagens classificadas foram, então, exportadas para o programa ArcGIS 9.0 (ESRI, 2005) e denominadas de mapas orbitais.

4.2.5 Obtenção dos mapas de atributos por geoestatística

Os dados das análises de terra, juntamente com as coordenadas geográficas de cada ponto, foram importados para o programa Matlab 7.0 (MATHWORKS, 2005), no qual se realizaram as análises geoestatísticas.

Inicialmente, gerou-se o semivariograma dos atributos do solo para verificar a existência de continuidade espacial. Em seguida, ajustou-se um modelo estatístico aos dados que pode ser linear, esférico, gaussiano, exponencial e com ou sem efeito pepita. Na sequência, com base nas informações do tipo de modelo ajustado, efeito pepita, alcance e patamar foi realizada a interpolação dos pontos de amostragem, através do método da krigagem e, então, gerado o mapa para cada atributo.

Em seguida, os mapas foram exportados para o programa ArcGIS 9.0, no qual foram divididos nas classes anteriormente mencionadas. Para fins de discussão e comparação com o mapa orbital, os mapas gerados pela análise geoestatística foram denominados de mapas reais.

4.2.6 Comparação dos mapas

Com os mapas de classes de atributos gerados pelo método MESMA e pela análise geoestatística inseridos no programa ArcGIS 9.0, realizou-se inicialmente o ajustamento espacial dos dois mapas.

Em seguida, como o mapa geoestatístico gerado compreendia toda a área de estudo (184 ha) e o mapa orbital (gerado pelo MESMA) apenas uma parte dela (100 ha) devido à presença de vegetação no restante, realizou-se primeiramente o “corte” do mapa geoestatístico, utilizando como base o mapa orbital, através da função *clip* disponível no ArcToolBox, parte integrante do ArcGIS.

Na sequência, com ambos os mapas compreendendo a mesma área, foi realizado o cruzamento dos mesmos no programa ArcGIS 9.0, utilizando-se a função *raster calculator* do módulo *spatial analyst*, com o intuito de determinar a porcentagem de similaridade entre os dois métodos. Este procedimento foi realizado para cada atributo.

4.3 Resultados e Discussão

Os mapas de textura (Figura 1) gerados mostraram uma distribuição espacial das classes arenosa, média arenosa e argilosa muito similar. As classes com maior nível de acerto foram a arenosa com 18,58 % e a argilosa com 8,80 %. A classe média arenosa foi, em sua maior parte, classificada como arenosa (12,86 %) mas este valor é próximo ao índice de acerto que foi de 10,92 %. Já a classe média argilosa, que não apresentou similaridades entre os mapas, foi confundida com argilosa (6,39 %) e média arenosa (4,74 %) (Tabela 1).

A textura é um fator que afeta diretamente a resposta espectral do solo; normalmente, quanto maior o teor de argila, menor será a sua reflectância (MADEIRA NETTO, 2001). Desta forma, a curva espectral de um solo arenoso apresenta maior intensidade de reflectância que um solo argiloso por isso, o índice de acerto para estas duas classes foi alto.

Okin et al. (2001) trabalhando com imagens AVIRIS e o método MESMA, conseguiram discriminar solos argilosos de solos arenosos com cerca de 90 % de confiança. De forma semelhante Drake; Mackin e Settle (1999) conseguiram mapear solos de acordo com seus teores de argila, a partir de imagem AVIRIS.

A matéria orgânica foi dividida em teores alto, médio e baixo e espacialmente os mapas mostram similaridade, principalmente para as classes média e baixa. Pode-se também observar que a classe alto teor no mapa orbital confundiu-se na maior parte com a de baixo teor no mapa real, enquanto que a área de alto teor no mapa real foi praticamente toda classificada no mapa orbital como médio (Figura 2).

Esse resultado pode ser verificado na Tabela 1, na qual se observa que 17,23 % da área de alto teor no mapa orbital pertence à classe baixa no mapa real, enquanto que a área de alto teor no mapa real, que é de 1,07 %, teve 1,02 % classificado como médio.

A classe alto teor, no mapa real, ocupa apenas 1,07 % da área (Tabela 1), isso ocorre, porque a maior parte das amostras de teor alto de matéria orgânica encontra-se na região não utilizada da imagem ASTER, devido à cobertura vegetal.

A área ocupada pela classe de baixo teor de matéria orgânica ocupa a maior parte com 82 % e obteve um índice de acerto de 48,59 % entre os mapas. Já a classe de teor médio tem 16,14 % da área com 10,38 % de similaridade na classificação (Tabela 1).

Matéria orgânica tem uma forte influência na reflectância do solo. Em geral, com o aumento do teor de matéria orgânica, a reflectância do solo diminui na faixa que vai de 400 a 2500 nm (LEONE; SOMMER, 2000), proporcionando a diferenciação das classes de matéria orgânica, a partir das curvas espectrais orbitais.

Palacios-Orueta et al. (1999), utilizando uma forma modificada da análise de mistura espectral aplicada sobre imagem AVIRIS em duas áreas de estudo localizadas na Califórnia, conseguiram discriminar o teor de matéria orgânica dos solos dessas áreas. Os autores também verificaram que, apesar da faixa de matéria orgânica ser a mesma para ambas as áreas (0 a 6 %), um dos locais de estudo (La Jolla) apresentou maior número de pixels com valores entre 4 e 5 %, enquanto o outro (Serrano), valores mais baixos entre 2,5 e 3,5 %.

Figura 1 - Mapas real e orbital (MESMA) das classes de textura da área

Tabela 1 – Similaridade entre o mapa gerado pelo método MESMA e pelo mapa real da área para as classes de atributos do solo

Classes dos atributos no mapa real	Área (%) ¹	Classes dos atributos no mapa gerado pelo MESMA				
Textura ²						
		Arenosa	Média arenosa	Média argilosa	Argilosa	
Arenosa	32,86	18,58	7,74	2,89	3,65	
Média arenosa	36,70	12,86	10,92	5,38	7,53	
Média argilosa	14,96	2,17	4,74	1,66	6,39	
Argilosa	15,48	0,73	5,27	0,68	8,80	
Matéria Orgânica ²						
		Baixo		Médio	Alto	
Baixo	82,80	48,59		16,98	17,23	
Médio	16,14	5,20		10,38	0,56	
Alto	1,07	0,05		1,02	0,00	
Saturação por Bases ²						
		Distrófico		Eutrófico		
Distrófico	4,08	3,92		0,15		
Eutrófico	95,92	54,88		41,04		
Capacidade de Troca Catiônica ²						
		Muito baixa	Baixa	Média	Alta	Muito alta
Muito baixa	1,41	0,93	0,46	0,02	0,00	0,00
Baixa	38,73	5,83	8,23	21,32	2,05	1,30
Média	45,05	4,08	6,02	25,67	3,75	5,53
Alta	11,77	1,50	0,32	2,37	2,99	4,59
Muito alta	3,05	0,00	0,68	0,79	0,51	1,06
Ferro Total ²						
		Hipoférrico		Mesoférrico		
Hipoférrico	86,33	64,95		21,38		
Mesoférrico	13,67	2,86		10,81		

¹ Porcentagem de área ocupada por cada classe

² Porcentagem de área ocupada por cada classe do mapa gerado pelo método MESMA por classe do mapa real

Figura 2 - Mapas real e orbital (MESMA) das classes de matéria orgânica da área

Para a saturação por bases (V %), os mapas gerados mostraram-se bastante distintos (Figura 3), no mapa real praticamente toda a área é eutrófica, devido ao manejo químico do solo realizado no local. No mapa orbital, ao contrário, praticamente toda a área foi classificada como distrófica.

A classe distrófica representa apenas 4,08 % da área e obteve 3,92 % de similaridade com o mapa orbital (Tabela 1). Nos 95,92 % da área correspondente à classe eutrófica, 41,04 % foi classificada corretamente. A energia eletromagnética interage com cerca de 3 microns, enquanto na análise convencional, a amostra de terra foi avaliada pegando a mistura de uma camada de 0 a 20 cm, sob este ponto de vista, o resultado obtido foi bom.

No entanto, a influência dos atributos químicos na resposta espectral dos solos ainda não está completamente entendida. Demattê et al. (2003) indicam que quanto maior a concentração das bases e maior a saturação por bases, maior será a intensidade de reflectância, entretanto, tal comportamento não foi verificado por Sousa Junior (2005) utilizando imagem ASTER.

Segundo Ben-Dor et al. (2002), existem propriedades do solo que não geram uma feição de absorção na curva espectral como, por exemplo, pH e condutividade elétrica, talvez este seja o caso da saturação por bases e, por isso, o resultado do mapa usando o método MESMA tenha sido distinto do mapa real.

Por outro lado, os mapas para CTC mostraram-se semelhantes, principalmente para a classe média, que representa a maior parte da área (Figura 4). As classes extremas, muito baixa e muito alta, são as que apresentam menor área com 1,41 % e 3,05 %, respectivamente; mesmo assim, houve um alto índice de acerto para estas classes entre os dois mapas de 0,93 e 1,06 % (Tabela 1).

Para as classes baixa, média e alta, o resultado da similaridade entre os mapas mostra que a classe baixa, com 38,73 % da área, confundiu em 21,32 % com a classe média. As outras duas classes obtiveram maiores índices de acerto, no caso da média que ocupa 45,06 % da área de estudo a correta classificação ficou em 25,67 %, enquanto a alta, com 11,77 % da área, obteve 4,59 % (Tabela 1).

Figura 3 - Mapas real e orbital (MESMA) das classes de saturação por bases (V%) da área

Figura 4 - Mapas real e orbital (MESMA) das classes de capacidade de troca catiônica (CTC) da área

Apesar da CTC também ser um atributo químico, ela é extremamente influenciada pelo tipo e quantidade dos minerais de argila e da matéria orgânica no solo (HAVLIN et al., 1999). Solos mais argilosos e com alta matéria orgânica possuem maior CTC do que os solos arenosos e com baixa matéria orgânica.

Como observado por Ben-Dor; Irons e Epema (1999), propriedades do solo sem feição podem ser quantificados e mapeados a partir das curvas espectrais, devido a sua forte correlação com outras propriedades que apresentam bandas de absorção, caso dos minerais e matéria orgânica do solo. Esta pode ser a explicação para o fato de ter sido obtida similaridade entre os mapas para CTC, mas não para a V %.

O ferro total apresenta um grande efeito na resposta espectral dos solos dependendo da sua forma (DEMATTÊ; EPIPHANIO; FORMAGGIO, 2003). Várias feições na curva espectral são atribuídas à sua presença, sendo que a hematita e a goetita mostram bandas de absorção em 530 nm e 480 nm, respectivamente e em 900 nm, ela é mais intensa quanto maior for o teor de ferro (DALMOLIM et al., 2005).

O resultado desta influência do ferro sobre a resposta espectral do solo proporcionou um alto índice de acerto entre os mapas real e orbital para este atributo (Figura 5). O ferro total foi dividido em três classes, porém apenas duas delas estão presentes nos dois mapas, devido ao recobrimento da área das amostras férricas.

A maior parte da área foi classificada como hipoférrica, 86,33 % e o índice de similaridade foi de 64,95 %. Para a classe mesoférrica, com 13,67 % de recobrimento da área a similaridade foi de 10,81 % (Tabela 1).

Palacios-Orueta et al. (1999) conseguiram mapear teores de ferro, que variavam de 2 a 6 %, em imagem AVIRIS para duas áreas de estudo na Califórnia, utilizando um método modificado da análise de mistura espectral com acurácia. Foi possível também, verificar a diferença nos intervalos de teores para as duas áreas, no Vale Serrano, cuja geologia principal são rochas ígneas básicas, os teores foram mais altos indo, de 4, 5 a 6 % enquanto no Vale La Jolla, formada sobre sedimentos superficiais de arenito e folhelho, os teores estiveram entre 3 e 4 %.

Figura 5 - Mapas real e orbital (MESMA) das classes de ferro total (Fe_2O_3) da área

4.4 Conclusões

1. O modelo de análise de mistura espectral com múltiplos membros finais mostrou-se um método eficiente no mapeamento dos atributos textura, matéria orgânica, ferro total e CTC, com índices de similaridade de até 75%;
2. Para a saturação por bases, o índice de acerto foi de 41%, indicando a necessidade de futuros estudos sobre os aspectos químicos do solo.

Referências

ANALYTICAL IMAGING AND GEOPHYSICS. **Atmospheric correction now (ACORN) 3.12**. Boulder, 2001. 1 CD-ROM.

BARRET, F.; JACQUEMOUND, S.; HANOCQ, J.F. The soil line concept in remote sensing. **Remote Sensing Reviews**, London, v. 7, n. 1, p. 1-18, 1993.

BEN-DOR, E.; IRONS, J.R.; EPEMA, G.F. Soil reflectance. In: RENCZ, A.N. (Ed.). **Remote sensing for the earth sciences**: manual of remote sensing. 3rd ed. New York: John Wiley; American Society for Photogrammetry and Remote Sensing, 1999. chap. 3, p. 111-188.

BEN-DOR, E.; PATKIN, K.; BANIN, A.; KARNIELI, A. Mapping of several soil properties using DAIS-7915 hyperspectral scanner data – a case study over clayey soils in Israel. **International Journal of Remote Sensing**, London, v. 23, n. 6, p. 1043-1062, Mar. 2002.

CAMARGO, A.O.de; MONIZ, A.C.; JORGE, J.A.; VALADARES, J.M. **Métodos de análise química, mineralógica e física de solos do IAC**. Campinas: IAC, 1986. 94 p. (IAC. Boletim Técnico, 106).

CARVALHO JUNIOR, O. A.; CARVALHO, A. P. F.; MENESES, P. R.; GUIMARÃES, R. F.; MARTINS, E. S. Análise de imagens hiperespectrais pelo método multiple endmember spectral mixture analysis (MESMA) em depósito supergênico de níquel. **Revista Brasileira de Geociências**, São Paulo, v. 33, n. 1, p. 63-74, mar. 2003.

CENTRO NACIONAL DE ENSINO E PESQUISA AGRONÔMICA. **Levantamento de reconhecimento de solos do Estado de São Paulo**. Rio de Janeiro: Ministério da Agricultura, 1960. 637p. (SNPA. Boletim, 12).

CORÁ, J.E.; ARAÚJO, A.V.; MARQUES JUNIOR, J.; PEREIRA, G.T.; BERALDO, J.M.G.; POYAY, V.G. Definição de zonas homogêneas de manejo visando agricultura de precisão através da caracterização da variabilidade de atributos do solo. In: REUNIÃO BRASILEIRA DE FERTILIDADE DO SOLO E NUTRIÇÃO DE PLANTAS, 24., REUNIÃO BRASILEIRA SOBRE MICORRIZAS, 8., SIMPÓSIO BRASILEIRO DE MICROBIOLOGIA DO SOLO, 6., REUNIÃO BRASILEIRA DE BIOLOGIA DO SOLO, 3. Santa Maria, 2000. **Anais...** Santa Maria, Sociedade Brasileira de Ciência do Solo. Sociedade Brasileira de Microbiologia, 2000. CD-ROM.

CRÓSTA, A.P. **Processamento digital de imagens de sensoriamento remoto**. Campinas: UNICAMP, IG, 1992. 170 p.

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, mar./abr. 2005.

DEMATTÊ, J.A.M.; EPIPHANIO, J.C.N.; FORMAGGIO, A.R. Influência da matéria orgânica e de formas de ferro na reflectância de solos tropicais. **Bragantia**, Campinas, v. 62, n. 3, p. 451-464, set./dez. 2003.

DEMATTÊ, J.A.M.; MORETTI, D.; VASCONCELOS, A.C.F.; GENÚ, A.M. Uso de imagens de satélite na discriminação de solos desenvolvidos de basalto e arenito na região de Paraguaçu Paulista. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 40, n. 7, p. 697-706, jul. 2005.

DEMATTÊ, J.A.M.; PEREIRA, H.S.; NANNI, M.N.; COOPER, M.; FIORIO, P.R. Soil chemical alterations promoted by fertilizer application assessed by spectral reflectance. **Soil Science**, Philadelphia, v. 168, n. 10, p. 730-747, Oct. 2003.

DRAKE, N.A.; MACKIN, S.; SETTLE, J.J. Mapping vegetation, soil, and geology in semiarid shrublands using spectral matching and mixture modeling of SWIR AVIRIS imagery. **Remote Sensing of Environment**, New York, v. 68, n. 1, p. 12-25, Apr. 1999.

EMBRAPA. **Sistema brasileiro de classificação de solos**. Brasília: Serviço de Produção de Informação, 1999. 412 p.

ENVIRONMENTAL SYSTEMS RESEARCH INSTITUTE. **ArcGIS 9.0**. Redlands, 2005. 3 CD-ROM.

HAVLIN, J.L.; BEATON, J.D.; TISDALE, S.L.; NELSON, W.L. **Soil fertility and fertilizer**: an introduction to nutrient management. 6th ed. New Jersey: Prentice Hall, 1999. 499 p.

HUETE, A.R. A soil-adjusted vegetation index (SAVI). **Remote Sensing of Environment**, New York, v. 25, n. 3, p. 295-309, Aug. 1988.

HUETE, A. R. Remote sensing of soils and soil processes. In: USTIN, S. (Ed). **Remote sensing for natural resources management and environmental monitoring**: Manual of remote sensing, 3rd ed. Hoboken: John Wiley, 2004. v. 4, chap 1, p. 3-52.

INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS. Divisão de Minas e Geologia Aplicada. **Mapa geológico de Estado de São Paulo**. São Paulo, 1981. Escala 1:1000.000.

JACKSON, R.D.; HUETE, A. R. Interpreting vegetation indices. **Preventive Veterinary Medicine**, Amsterdam, v. 11, n. 3/4, p. 185-200, Dec. 1991.

LEONE, A.P.; SOMMER, S. Multivariate analysis of laboratory spectra for the assessment of soil development and soil degradation in the southern Apennines (Italy). **Remote Sensing of Environment**, New York, v. 72, n. 3, p. 346-359, June 2000.

LING, W.T.; WANG, H.Z.; XU, J.M.; GAO, Y.Z. Sorption of dissolved organic matter and its effects on the atrazine sorption on soils. **Journal of Environmental Sciences-China**, Beijing, v. 17, n. 3, p. 478-482, 2005

MADEIRA NETTO, J. S. Comportamento espectral dos solos. In: MENESES, P.R.; MADEIRA NETTO, J.S. (Org.). **Sensoriamento remoto**: reflectância de alvo naturais. Brasília: Editora UnB; EMBRAPA Cerrados, 2001. cap. 4, p. 127-156.

MAPA, R. B.; KUMARAGAMAGE, D. Variability of soil properties in a tropical Alfisol used for shifting cultivation. **Soil Technology**, Amsterdam, v. 9, n. 3, p. 187-197, Sept. 1996.

MATWORKS INC. **Matlab 7.0**. Gouda, 2005. 1 CD-ROM.

McKENZIE, N.J.; RYAN, P.J. Spatial prediction of soil properties using environmental correlation. **Geoderma**, Amsterdam, v. 89, n.1/2, p. 67-94, Apr. 1999.

NANNI, M.R. **Dados radiométricos obtidos em laboratório e no nível orbital na caracterização e mapeamento de solos**. 2000. 366 p. Tese (Doutorado em Solos e Nutrição de Plantas) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2000.

OKIN, G. S.; ROBERTS, D.A.; MURRAY, B.; OKIN, W.J. Practical limits on hyperspectral vegetation discrimination in arid and semiarid environments. **Remote Sensing of Environment**, New York, v. 77, n. 2, p. 212-225, Aug. 2001.

PALACIOS-ORUETA, A.; PINZÓN, J.E.; USTIN, S.L.; ROBERTS, D.A. Remote sensing of soils in the Santa Monica Mountains: II. Hierarchical foreground and background analysis. **Remote Sensing of Environment**, New York, v. 68, n. 2, p. 138-151, May 1999.

PIERCE, F.J.; NOWAK, P. Aspects of precision agriculture. **Advances in Agronomy**, San Diego, v. 67, p.1-85, 1999.

RAIJ, B. van; QUAGGIO, J.A. **Métodos de análise de solo para fins de fertilidade**. Campinas: IAC, 1989. 40 p. (IAC. Boletim Técnico 8).

RESEARCH SYSTEMS INC. **ENVI 4.1.**, 2005. Boulder, 2005. 2 CD-ROM.

ROBERTS, D.A.; DENNISON, P.E.; GARDNER, M.E.; HETZEL, Y.; USTIN, S.L.; LEE, C.T. Evaluation of the potential of hyperion for fire danger assessment by comparison to the airborne visible/infrared imaging spectrometer. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, New Jersey, v. 41, n. 6, p. 1297-1310, June 2003.

ROBERTS, D.A.; GARDNER, M.; CHURCH, R.; USTIN, S.; SCHEER, G.; GREEN, R.O. Mapping chaparral in the santa monica mountains using multiple endmember spectral mixture models. **Remote Sensing of Environment**, New York, v. 65, n. 3, p. 267-279, Sept. 1998.

SCULL, P.; FRANKLIN, J.; CHADWICK, O.A.; McARTHUR, D. Predictive soil mapping: a review. **Progress in Physical Geography**, London, v. 27, n. 2, p. 171-197, June 2003.

SOUSA JUNIOR, J.G. **Sensoriamento remoto e sistema de informações geográficas na caracterização de solos e quantificação de seus atributos**. 2005. 141 p. Dissertação (Mestrado em Solos e Nutrição de Plantas) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2005.

TOMÉ JUNIOR, J.B. **Manual para interpretação de análises de solo**. Guaíba: Agropecuária, 1997. 247 p.

TOMPKINS, S.; MUSTARD, J.F.; PIETERS, C.M.; FORSYTH, D.W. Optimization of endmembers for spectral mixture analysis. **Remote Sensing of Environment**, New York, v. 59, n. 3, p. 472-489, Mar. 1997.

5 GEOPROCESSAMENTO NA CARACTERIZAÇÃO DA DISTRIBUIÇÃO ESPACIAL DE VARIÁVEIS DO SOLO DA REGIÃO DE RAFARD-SP

Resumo

A classificação de um solo é dependente da união de uma série de fatores, entre eles os químicos, físicos, morfológicos e topográficos. O entendimento da relação entre estas características auxilia no conhecimento da paisagem e consequente mapeamento. Desta forma, o objetivo deste trabalho foi verificar a correlação espacial entre classes de solos com informações de geologia, topografia e atributos do solo. Para tanto, foi montado em banco de dados com as informações de análises de solo, curvas de nível e geologia. Estas informações foram cruzadas para verificar a contribuição de cada uma no mapa de solos. Os dados de relevo foram obtidos a partir de um modelo digital do terreno e o de geologia de um mapa já existente da área. Concluiu-se que existe alta correlação entre os atributos do solo e dos mesmos com a geologia e principalmente com o mapa de solos. Tal resultado mostra a importância em conhecer espacialmente cada atributo, visando a delimitação de classes de solo.

Palavras Chaves: Variabilidade espacial; Mapa de solos; SIG

GEOPROCESSING ON SPATIAL DISTRIBUTION CHARACTERIZATION OF SOIL VARIABLES FROM RAFARD-SP

Abstract

Soil classification depends on the union of a series of chemical, physical, morphological and topographic factors. Understanding the relationship among these characteristics aids in the knowledge of the landscape and consequent mapping. This way, the objective of this work was to verify the spatial correlation among soil classes and information about geology, topography and soils attributes. For this, it was generated a data bank with informations about soil analysis, contour lines and geology. These informations were crossed to verify the contribution of each one on soil map. The relief data were obtained from digital elevation model and the geology from an existing map of the area. It was concluded that there is high correlation among soil attributes and among them with geology and soil map. This result showed the importance to known spatially each attribute for soil classes delimitation.

Key words: Spatial variability; Soil map; GIS

5.1 Introdução

O solo é um recurso natural fundamental e o entendimento da sua distribuição espacial e manejo é crítico para a manutenção de uma sociedade produtiva. Esta variabilidade dos solos e de seus atributos está diretamente relacionada à ação dos cinco fatores de formação dos solos: clima, organismos, material de origem, relevo e tempo.

Destes cinco fatores de formação, o relevo e a geologia são os mais facilmente avaliados. Mudanças na topografia e na geologia influenciam o movimento da água na superfície e subsuperfície (MZUKU et al., 2005), afetando a distribuição das propriedades do solo na paisagem (SOUZA et al., 2006).

Uma das formas de se caracterizar esta variabilidade é a utilização de técnicas geoestatísticas. Segundo Cressie (1991), a geoestatística é baseada em dois conceitos: o semivariograma e a krigagem. O primeiro descreve a estrutura da variabilidade espacial, ou seja, estima a continuidade ou dependência espacial. O segundo prediz, de forma não tendenciosa e com variância mínima, valores em locais não amostrados, convertendo-se, dessa maneira, em um interpolador ideal, gerando superfícies contínuas dos atributos para entender melhor sua continuidade.

Atualmente, um método de se realizar a análise destes fatores simultaneamente é a utilização das técnicas de geoprocessamento, permitindo uma caracterização mais robusta da variabilidade espacial e que informações sejam analisadas e guardadas, usando uma variedade de modelos de dados (SCULL et al., 2003).

Muitos trabalhos partem para a análise de modelos de dependência espacial com o objetivo de estimar valores de atributos do solo em locais não conhecidos (Goovaerts, 1997).

Conforme Corá (1997), solos de uma mesma classe, quando submetidos a manejos diferenciados, podem apresentar diferenças significativas em suas propriedades no espaço. Ou seja, apesar de um solo estar classificado, podem haver diferenças que reflitam na produtividade, justamente por variações que não são detectadas pelo mapeamento de solos. Essas variações podem então ser detectadas por métodos de geoprocessamento, visando melhorar a informação do mapa de solos.

Neste sentido, cabe a necessidade de comparar mapas de solos realizados por métodos tradicionais, com a variabilidade espacial dos atributos do solo individualizados. A literatura carece deste tipo de informação, que pode dar suporte a futuros mapeamentos.

Desta forma, o objetivo deste trabalho foi verificar a correlação espacial entre atributos do solo, geologia e topografia (elevação e declividade) e dos mesmos com o mapa de solos, através do cruzamento de seus mapas em um sistema de informações geográficas. Devido à correlação entre os atributos do solo, geologia e relevo, espera-se que os mesmos estejam relacionados com o mapa de solos e possam auxiliar na sua delimitação.

5.2 Material e Métodos

5.2.1 Área de estudo

A área de estudo, com aproximadamente 198 ha e margeada pelo Rio Capivari, localiza-se no município de Rafard, sudoeste do Estado de São Paulo. É delimitada pelas coordenadas geográficas 23°0'31,37" – 22°58'53,97" latitude sul e 53°39'47,81" – 53°37'25,65" longitude oeste. O clima da região é classificado como mesotérmico de inverno seco em que a temperatura média do mês mais frio é inferior a 18°C e a do mês mais quente ultrapassa 22°C (CENTRO NACIONAL DE ENSINO E PESQUISA AGRONÔMICA, 1960).

A geologia da região pertence à formação Itararé, Grupo Tubarão (IPT, 1981) constituindo-se de arenitos de granulação heterogênea, argilitos e folhelhos de colorações variadas desde o cinza claro ao escuro. A área possui ainda basaltos da formação Serra Geral, Grupo São Bento e, próximo ao rio, seixos. O relevo em sua maior parte é caracterizado como ondulado e suave ondulado, sendo o primeiro de maior área e, com altitude variando entre 475 e 565 m sobre o nível do mar.

5.2.2 Amostragem de solo e análise de terra

As informações sobre os procedimentos metodológicos de amostragem e análise de terra são detalhados em Nanni (2000) e a seguir descritos.

A área foi demarcada e estaqueada em forma de grade regular de 100x100 m gerando 184 pontos, perfazendo 184 ha. Cada estaca foi georeferenciada com GPS e a amostra coletada nas profundidades de 0-20 cm para o horizonte superficial e 80-100 para o horizonte subsuperficial.

As amostras de terra foram, posteriormente, secas em estufa a 50°C por 48 horas e peneiradas (2 mm); na fração menor que 2 mm foram efetuadas as análises físicas e químicas.

Para a análise física, foram determinados os teores de areia, silte e argila a partir do método do densímetro (CAMARGO et al., 1986). Para as análises químicas, determinou-se pH em água e KCl, Ca^{2+} , Mg^{2+} , Al^{3+} , H^+ + Al^{3+} e matéria orgânica (MO) de acordo com Raij e Quaggio (1989). A partir desses dados, obteve-se o valor da soma de bases (S), capacidade de troca catiônica (CTC), saturação por bases (V%) e saturação por alumínio (m%). O ferro total (Fe_2O_3), a sílica (SiO_2) e o titânio (TiO_2) foram determinados pelo ataque sulfúrico, através de metodologia descrita por Camargo et al. (1986).

Posteriormente, as amostras foram agrupadas em relação a determinado atributo. A avaliação dos atributos com os dados espectrais foi realizada baseada em intervalos para cada um deles. Para matéria orgânica (MO) utilizaram-se as classes alto ($\text{MO} > 25 \text{ g dm}^{-3}$), médio (MO entre 15 e 25 g dm^{-3}) e baixo ($\text{MO} < 15 \text{ g dm}^{-3}$) (TOMÉ JR., 1997); ferro total (Fe_2O_3) foi dividido em hipoférrico ($\text{Fe}_2\text{O}_3 < 80 \text{ g kg}^{-1}$), mesoférrico (Fe_2O_3 entre 80 e 180 g kg^{-1}) e férrico ($\text{Fe}_2\text{O}_3 > 180 \text{ g kg}^{-1}$) (EMBRAPA, 1999); a CTC foi dividida em muito baixo ($\text{CTC} < 30 \text{ mm}_c \text{ dm}^{-3}$), baixo (CTC entre 30 e $60 \text{ mm}_c \text{ dm}^{-3}$), médio (CTC entre 60 e $100 \text{ mm}_c \text{ dm}^{-3}$), alto (CTC entre 100 e $150 \text{ mm}_c \text{ dm}^{-3}$) e muito alto ($\text{CTC} > 150 \text{ mm}_c \text{ dm}^{-3}$). Para textura, utilizou-se as seguintes classes, quanto ao teor de argila (TA): arenosa ($\text{TA} < 150 \text{ g kg}^{-1}$), média arenosa (TA entre 150 e 250 g kg^{-1}), média argilosa (TA entre 250 e 350 g kg^{-1}), argilosa (TA entre 350 e 600 g kg^{-1}) e muito argilosa ($\text{TA} > 600 \text{ g kg}^{-1}$) (DEMATTE et al., 2005).

5.2.3 Obtenção dos mapas

Os dados das análises de terra, juntamente com as coordenadas geográficas de cada ponto, foram importados para o programa Matlab 7.0 (MATHWORKS, 2005), no qual se realizaram as análises geoestatísticas.

Inicialmente, gerou-se o semivariograma dos atributos do solo para verificar a existência de continuidade espacial. Em seguida, ajustou-se um modelo estatístico aos dados que pode ser linear, esférico, gaussiano, exponencial e, com ou sem efeito pepita. Na sequência, com base nas informações do tipo de modelo ajustado, efeito pepita, alcance e patamar foi realizada a interpolação dos pontos de amostragem através do método da krigagem e, então, gerado o mapa para cada atributo.

Em seguida, os mapas foram exportados para o programa ArcGIS 9.0, os quais foram divididos nas classes anteriormente mencionadas.

O Modelo Digital do Terreno foi gerado no programa ArcGIS 9 (ESRI, 2005) usando como base as curvas de nível da área, espaçadas de 5 em 5 m, obtidas das cartas planialtimétricas de Toledos e Costa Rica, ambas na escala 1:10.000 e o limite da área de trabalho. De posse destas informações, fez-se o cruzamento no aplicativo ArcMap, modo *3D Analyst*, opção *Create TIN from Features*. Posteriormente, a partir do MDT, gerou-se o mapa de declividade, utilizando-se também o modo *3D Analyst*, opção *Surface Analysis – slope*.

Após a geração do MDT, foi realizada uma divisão das elevações em 7, níveis partindo da cota mais baixa à cota mais alta. O mapa de declividade foi dividido nas classes relevo de acordo com Embrapa (1999), em plano (0 a 3%), suave ondulado (3 a 8%), ondulado (8 a 20%), forte ondulado (20 a 45%) e montanhoso (45 a 75%).

O mapa de geologia foi obtido do Instituto de Pesquisas Tecnológicas (IPT, 1981) e o mapa de solos detalhado utilizado neste trabalho foi realizado pelo método convencional por Nanni (2000).

5.2.4 Análise estatística e comparação dos mapas

Com os resultados da análise de solo e dos atributos do relevo, realizou-se a análise de correlação linear simples entre textura, matéria orgânica, ferro total, capacidade de troca catiônica, elevação e declividade, utilizando todos os 184 pontos de amostragem. Esta análise foi realizada no programa Statistical Analysis System (SAS, 1999) a partir do procedimento *proc corr*.

Para a comparação entre os mapas, utilizou-se a função *raster calculator* do módulo *spatial analyst* no programa ArcGIS. Foram cruzados dois mapas de cada vez, gerando um terceiro mapa, o qual continha, na tabela de atributos, as informações sobre os dois mapas iniciais. A partir desta tabela, ordenou-se um dos atributos de acordo com suas classes e verificou-se, em cada uma delas, a porcentagem de área de ocorrência das classes do outro atributo. Por exemplo, ao cruzar o mapa de textura com o de matéria orgânica, verificou-se qual a porcentagem da área que cada classe de matéria orgânica possuía em cada classe de textura.

5.3 Resultados e Discussão

5.3.1 Correlação entre atributos do solo

Primeiramente realizou-se uma avaliação pontual entre as análises. Neste caso, foi verificada a correlação entre os atributos matéria orgânica, argila, ferro total e CTC do solo. A análise de correlação linear mostrou que existe uma alta correlação positiva entre todos os atributos avaliados, com significância de 1% (Tabela 1).

Tabela 1 – Coeficientes de correlação (r) entre os atributos do solo

Atributo	Matéria Orgânica	CTC ¹	Ferro Total	Argila
Matéria Orgânica	1,00	0,73 ²	0,80	0,66
CTC ¹	0,73	1,00	0,76	0,70
Ferro Total	0,80	0,76	1,00	0,89
Argila	0,66	0,70	0,89	1,00

¹ Capacidade de troca catiônica

² Correlações significativas a 1%

A matéria orgânica apresentou maior correlação com o ferro total, seguido pela CTC e, por último, com a argila, com coeficientes de 0,80, 0,73 e 0,66 respectivamente (Tabela 1). Isso significa dizer que, quando se aumenta o teor de matéria orgânica, também ocorre um aumento no teor de ferro total, da CTC e do teor de argila, o que está de acordo com Brady e Weil (2002).

A avaliação espacial é outra forma de visualizar o que ocorre no campo. Espacialmente, o mapa de matéria orgânica (Figura 1a) mostra-se similar aos mapas dos outros atributos, ferro total, argila e CTC (Figuras 1b, 2a e 2b). Para verificar esta correlação espacial, os atributos foram divididos em classes nos mapas, que foram cruzados em um sistema de informações geográficas.

Na comparação entre os mapas de matéria orgânica e ferro total (Figuras 1a e 2a), ambos com três classes, verifica-se a correspondência entre elas, ou seja, a área com baixo teor de matéria orgânica e baixo teor de ferro (hipoférico) têm 47 % de concordância, os teores médios de matéria orgânica e ferro (mesoférico) possuem 16,14 % e as classes de teores altos 16,20 % de concordância (Tabela 2).

A relação matéria orgânica e ferro acontece devido a complexação do ferro pela MO na formação dos agregados do solo. Isso ocorre pois a matéria orgânica funciona como uma ponte na ligação entre dois minerais de argila (SIX; ELLIOTT; PAUSTIAN, 2000)

Observa-se que nas áreas com maior teor de matéria orgânica, também ocorrem os maiores valores de CTC pois os radicais orgânicos apresentam grande número de cargas negativas, aumentando a CTC do solo (HAVLIN et al., 1999). A comparação entre matéria orgânica e CTC, com cinco classes, mostra que a classe baixo teor de matéria orgânica corresponde às classes muito baixa, baixa e média de CTC (Tabela 2). A classe média de MO corresponde a 16,14 % da classe alta de CTC e a classe alta de MO com 16,20 % de área concordante com classe muito alta de CTC (Tabela 2).

Entre matéria orgânica e argila, as áreas com alto teor do primeiro atributo ocorrem as maiores porcentagens de áreas com maiores teores de argila (texturas argilosa e muito argilosa) (Tabela 2). As áreas com médio teor de matéria orgânica correspondem a áreas com textura média argilosa e uma parte da área argilosa enquanto a área de baixo teor corresponde as texturas arenosa, média arenosa e ainda

parte da média argilosa (Tabela 2). Isto ocorre pois em solos argilosos a decomposição da matéria orgânica é mais lenta, ao contrário do que ocorre no solos arenosos cuja maior aeração e temperatura aceleram o processo de decomposição diminuindo seu teor (PORTA CASANELLAS; LOPÉZ-ACEVEDO REGUERÍN; ROQUERO DE LABURU, 1999).

A correlação da CTC com ferro total e argila ficou em torno de 0,70 (Tabela 1). Espacialmente, os mapas de CTC e ferro total (Figuras 2a e 2b), apesar do número diferente de classes, demonstram que as classes muito baixa, baixa e média de CTC correspondem à classe de baixo ferro (hipoférico) (Tabela 2). A classe alta de CTC tem a maior parte de sua área (10,74 %) na classe mesoférico e, a classe muito alta, com 13,34 % na classe férrico (Tabela 2). Os óxidos de ferro, em solos tropicais, juntamente com a caulinita, gibbsita e matéria orgânica são as fontes de carga do solo, logo responsáveis pela CTC (ALLEONI; CAMARGO, 1995)

Nas classes de CTC e argila (Figuras 2a e 1b), tem-se toda a área da classe muito baixa de CTC na classe arenosa (Tabela 2), a classe arenosa contém ainda a maior da área de baixa CTC (14,07 %) (Tabela 2). A classe de média CTC ficou em sua maior parte na classe média arenosa (15,03 %) e as classes alta e muito alta de CTC, na classe argilosa (Tabela 2). A relação CTC e argila é alta, pois assim como a matéria orgânica, os minerais da fração argila dos solos, são os responsáveis pela geração de cargas negativas no solo (HAVLIN et al., 1999).

A correlação obtida entre ferro total e argila foi a mais alta com 0,89 (Tabela 1), os mapas destes atributos (Figura 1b e 2a) mostram esta relação. As classes arenosa, média arenosa e média argilosa correspondem à classe hipoférico, já as classes mesoférico e férrico estão em sua maior parte na classe argilosa (Tabela 2). Os óxidos de ferro fazem parte da fração argila dos solos e, quanto maior sua quantidade, maior o teor de argila dos solos (ALLEONI; CAMARGO, 1995).

Figura 1 – Mapas de (a) matéria orgânica e (b) textura da área de estudo

Figura 2 – Mapas de (a) ferro total e (b) capacidade de troca catiônica

Tabela 2 – Comparação entre os mapas de atributos do solo com os valores em porcentagem da área total

	Classe	Textura					Matéria Orgânica (MO)			Ferro Total (Fe ₂ O ₃)		
		Arenosa	Média arenosa	Média argilosa	Argilosa	Muito argilosa	Alto	Médio	Baixo	Hipoférrico	Mesoférrico	Férrico
Textura	Arenosa						0,00	0,21	17,97	17,99	0,00	0,00
	Média arenosa						0,03	4,43	21,27	26,36	0,02	0,00
	Média argilosa						1,86	4,16	5,58	7,65	3,81	0,00
	Argilosa						20,83	16,39	4,66	3,93	22,69	15,03
	Muito argilosa						1,85	0,77	0,00	0,00	0,55	1,97
MO ¹	Alto	0,00	0,03	1,86	20,83	1,85				0,16	8,21	16,20
	Médio	0,21	4,43	4,16	16,39	0,77				8,43	16,14	1,37
	Baixo	17,97	21,27	5,58	4,66	0,00				47,00	2,49	0,00
CTC ²	Muito baixa	1,78	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	3,58	1,78	0,00	0,00
	Baixa	14,07	7,97	0,32	0,13	0,00	0,00	0,27	43,07	22,27	0,23	0,00
	Média	2,44	15,03	6,18	6,43	0,00	0,02	16,49	43,39	24,17	5,91	0,00
	Alta	0,00	2,40	4,35	14,20	1,24	13,35	22,14	6,40	6,91	10,74	4,52
	Muito alta	0,00	0,00	0,84	21,22	1,42	32,65	10,81	0,39	0,28	9,85	13,34
Fe ₂ O ₃ ³	Hipoférrico	17,99	26,36	7,65	3,93	0,00	0,16	8,43	47,00			
	Mesoférrico	0,00	0,02	3,81	22,69	0,55	8,21	16,14	2,49			
	Férrico	0,00	0,00	0,00	15,03	1,97	16,20	1,37	0,00			

¹ Matéria orgânica

² Capacidade de troca catiônica

³ Ferro total obtido pelo ataque sulfúrico

5.3.2 Correlação entre atributos do solo, geologia e relevo

Foi avaliada a relação entre os atributos do solo, a geologia, a elevação e a declividade. A geologia, por ser uma variável qualitativa (não numérica), não foi utilizada na análise de correlação.

A análise de correlação entre os atributos do solo e do relevo, apresentou valores mais altos entre ferro total e elevação com 0,52, argila e elevação com 0,49 e CTC e declividade com 0,42 (Tabela 3).

Tabela 3 – Análise de correlação entre os atributos do solo e do relevo

	Matéria Orgânica	CTC ¹	Ferro Total	Argila
Elevação	0,32	0,35	0,52	0,49
Declividade	0,26	0,42	0,29	0,28

¹ Capacidade de troca catiônica

Os mapas de atributos de solo (Figuras 1 e 2) podem, então, ser comparados com o relevo (Figura 3). Nas áreas de menor elevação (faixa de 475 m) ocorrem também os menores valores de matéria orgânica, argila, CTC e ferro total e, o oposto ocorre nas áreas de maior altitude.

Para elevação e ferro total, que obtiveram maior correlação, verifica-se que a classe hipoférrico ocorre de 472 até 554 m, já a classe mesoférrico ocorre de 486 m até a cota mais alta, 568 m, assim como a classe férrico (Tabela 4). Já para elevação e argila, tem-se que as classes arenosa, média arenosa e argilosa só não ocorrem na faixa entre 555 e 568 m, enquanto que as classes argilosa e muito argilosa não ocorrem na classe de 472 a 485 m (Tabela 4).

Entre elevação e matéria orgânica, a classe de teor baixo deste atributo do solo não ocorre a altas cotas, entre 555 e 568 m, porém o teor alto não acontece nas mais baixas, de 472 a 485 m (Tabela 4). A classe de teor médio de matéria orgânica ocorre em todas as altitudes (Tabela 4). Já entre elevação e CTC, a classe de CTC muito baixa ocorre apenas na faixa de 542 a 555 m, a classe baixa não ocorre nas maiores altitudes, ao contrário da muito alta que não ocorre na faixa de menor altitude (Tabela

4), as duas outras classes de CTC, média e alta, ocorrem em todas as altitudes.

Brubaker et al. (1993), verificaram que a CTC, o teor de argila e matéria orgânica diminuem na direção das menores elevações, e que estas alterações estão relacionadas aos processos de formação, erosão e diferenças no manejo da área de estudo.

Para a declividade, o resultado da comparação dos mapas não apresenta semelhanças (Tabela 3). De forma geral, as classes de todos os atributos do solo ocorrem em todas as classes de declividade.

Na comparação entre declividade e argila, a maior relação encontrada é da textura argilosa na classe ondulada com 27,98 % da área. Entre declividade e ferro total tem-se, em maior proporção, a classe hipoférrico e mesoférrico nas classes suave ondulado e ondulado (Tabela 4). Na relação com a matéria orgânica, as três classes, alto, médio e baixo têm maior área na classe de relevo ondulado (Tabela 4). As classes de CTC, em sua maioria, se encontram na classe ondulado. O motivo pelo qual a maior parte das classes dos atributos de solo estarem na classe de declive ondulado é que a área, possui, na maior parte, relevo ondulado (Figura 3b).

Verificou-se uma alta relação entre o mapa de geologia e os mapas de atributos do solo. Isso ocorre pois o diabásio e o folhelho são rochas de granulação fina e que dão origem à solos mais argilosos e, conseqüentemente, de maiores CTC, teor de matéria orgânica e ferro total (Figuras 1, 2 e 4).

Figura 3 – Mapas de (a) elevação e (b) declividade da área de estudo

Tabela 4 – Comparação entre os mapas de atributos do solo e do relevo

Classes de atributos		Declividade				Elevação						
	do solo	Plano	Suave Ondulado	Ondulado	Forte ondulado	475-485	486-499	500-513	514-527	528-541	542-554	555-565
Textura	Arenosa	4,76 ⁴	6,78	5,99	0,44	4,30	3,90	0,92	2,50	3,61	2,76	0,00
	Média arenosa	3,53	9,68	10,47	0,78	5,35	10,80	2,51	3,20	1,37	1,23	0,00
	Média argilosa	0,12	3,64	6,37	1,51	0,62	2,71	3,32	2,08	1,85	1,08	0,00
	Argilosa	1,96	9,95	27,98	3,37	0,00	3,06	9,38	11,52	7,07	6,26	5,97
	Muito argilosa	0,15	0,40	1,98	0,13	0,00	0,21	0,02	0,07	0,38	5,97	1,26
Fe ₂ O ₃ ¹	Hipoférrico	8,62	21,26	22,54	1,72	10,29	17,32	5,69	6,85	7,35	6,61	0,03
	Mesoférrico	0,55	6,48	18,40	2,60	0,00	3,14	8,34	9,69	4,39	1,40	1,08
	Férrico	1,37	2,71	11,83	1,91	0,00	0,21	2,11	2,82	2,54	4,03	6,11
MO ²	Baixo	7,74	19,50	20,54	1,18	8,34	16,21	5,63	5,70	7,09	5,99	0,00
	Médio	0,99	6,35	16,83	1,52	1,37	3,69	6,13	7,12	3,46	2,55	1,37
	Alto	1,63	4,17	15,98	3,55	0,00	0,61	4,13	6,65	4,14	3,80	6,03
CTC ³	Muito baixa	0,97	0,60	0,08	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	1,65	0,00
	Baixa	5,11	8,14	9,06	0,50	3,68	8,20	1,34	3,54	3,52	2,20	0,00
	Média	1,52	11,86	14,53	1,10	4,68	8,43	6,94	4,85	2,97	0,93	1,00
	Alta	2,07	7,48	11,69	1,18	1,06	3,50	3,53	3,44	2,18	3,98	4,60
	Muito alta	0,46	1,76	18,44	3,42	0,00	0,38	3,99	7,62	5,20	3,78	2,80

¹ Ferro total

² Matéria orgânica

³ Capacidade de troca catiônica

⁴ Valores em porcentagem da área total

A comparação geologia e argila, mostrou que as áreas com maior teor de argila encontram-se nos locais de rochas mais argilosas, no caso, folhelhos e diabásio (Tabela 5). Para o ferro total, a classe hipoférrico está nas área de arenito e aluvio, em sua maioria, enquanto a classe férrico ocorre nas áreas de diabásio e folhelho (Tabela 5). A matéria orgânica segue o resultado obtido para o ferro total, a classe de baixo teor está nas áreas de arenito e aluvio e os de alto teor nos locais de rochas mais argilosas (Tabela 5). As classes muito baixa, baixa e média de CTC estão em áreas sob arenito e as classes alta e muito alta em locais de diabásio e folhelho (Tabela 5).

Figura 4 – Mapa de geologia da área de estudo

Tabela 5 – Porcentagem da área total na comparação entre o mapa de geologia e os de atributos do solo

Atributos	Classes	Geologia			
		Aluvial	Arenito	Diabásio	Folhelho
Textura	Arenosa	4,04	13,83	0,00	0,04
	Média arenosa	3,39	19,04	0,49	1,56
	Média argilosa	0,00	5,17	3,63	2,86
	Argilosa	0,00	4,73	16,86	21,70
	Muito argilosa	0,00	0,00	0,50	2,15
Ferro Total (Fe ₂ O ₃)	Hipoférrico	7,44*	39,85	2,33	4,37
	Mesoférrico	0,00	1,62	10,43	16,09
	Férrico	0,00	1,31	8,72	7,84
Matéria Orgânica (MO)	Baixo	6,17	35,62	1,71	4,99
	Médio	0,85	5,83	6,89	12,33
	Alto	0,00	1,51	12,86	11,22
Capacidade de Troca Catiônica (CTC)	Muito baixa	0,00	1,61	0,00	0,00
	Baixa	3,17	18,79	0,27	0,57
	Média	3,42	16,06	0,67	8,48
	Alta	0,24	5,55	5,23	11,55
	Muito alta	1,05	0,00	15,33	7,99

5.3.3 Correlação entre classes de solos e seus atributos

O mapa de solo da área foi comparado aos mapas dos atributos. Observando o mapa de textura e o mapa de solos (Figuras 1b e 5) verifica-se que as áreas de textura argilosa e muito argilosa coincidem com os solos que, por definição, são argilosos como os Nitossolos Vermelhos e o Chernossolo Argilúvico. Os Argissolos, que apresentam gradiente textural do horizonte superficial para o subsuperficial, e por isso têm textura mais arenosa em superfície, encontram-se nas áreas arenosa e média arenosa, em sua maior parte.

A relação dos solos com a textura também pode ser observada na tabela 6. O NVef, NVefl e MTf ocorrem apenas nas classes argilosa e muito argilosa. Outras classes como o LVe, LVAe e os Cambissolos eutróficos possuem maior área de

ocorrência nestas texturas. Os PVA possuem, a maior parte, nas texturas arenosa à média argilosa (Tabela 6). Outros solos como os Neossolos Flúvicos, Cambissolo distrófico e Latossolo Vermelho-Amarelo distrófico também estão presentes nas áreas de textura mais arenosa (Tabela 6).

Com relação ao teor de ferro total, observando os mapas (Figuras 2a e 5), verifica-se que os Nitossolos e Chernossolo encontram-se nas áreas de maior teor de ferro total, os férricos, ocupando 1,22, 7,18 e 5,20 %, respectivamente, assim como o RLe com 3,08 %. Os demais solos estão nos locais classificados como hipoférrico e mesoférrico. O LVAe e o LVe estão na classe do mesoférricos, enquanto o LVAd na classe hipoférrico, juntamente com os RU, PVAd e PVAdab (Tabela 6).

O mapa de matéria orgânica, quando comparado ao mapa de solos (Figuras 1a e 5) apresenta, na classe de alto teor, os Nitossolos, Chernossolos e Neossolo Litólico, enquanto as outras classes estão divididas, em sua maior parte, nas classes de baixo e médio teor de MO. Entretanto, a maioria das classes de solos ocorrem em duas ou mais classes de matéria orgânica em porcentagem semelhante. Este resultado pode ser verificado na tabela 6 onde o PVAe está nas classes baixo e médio assim como o PVAeab, LVAe e Ruq.

A CTC, assim como os demais atributos, mostra que os NV, MT, CXve, LVe e RL apresentam alta a muito alta CTC (Figuras 2b e 5), enquanto os outros solos correspondem às classes baixa e média em sua maioria. Apenas o PVAd apresenta área na classe muito baixa de CTC. Comparando-se os mapas, verifica-se que o NVefl, apresenta 0,97 % da sua área na classe alta e 0,67 % na classe muito alta (Tabela 6), o NVef tem 4,97 % de área classificada como alta e 4,34 % como muito alta e, praticamente, toda a área do CXve (4,56 %) e do MTf (7,33 %) está na classe muito alta.

É interessante ressaltar que as classes NV, MT, RL e CXve estão nas classes de maior teor de todos os atributos. Tal resultado demonstra, como descrito anteriormente, que existe correlação entre os atributos, que por sua vez estão atrelados às classes de solos.

Figura 5 – Mapa de solos da área

Tabela 6 – Comparação entre os mapas de atributos e de solos

Classes de atributos do solo		Classes de solo ⁵															
		PVAe	PVAd	PVAeab	PVAdab	NVefl	NVef	CXbd	CXbe	CXve	LVAe	LVAd	LVe	RLe	RUq	RUbe	MTf
Textura	Arenosa	0,49 ⁴	10,65	0,00	1,42	0,00	0,00	2,70	0,00	0,00	0,12	1,11	0,01	0,00	0,54	1,82	0,00
	Média arenosa	5,21	4,02	0,59	2,03	0,00	0,00	5,49	0,25	0,04	1,07	2,36	0,50	0,07	0,81	2,31	0,00
	Média argilosa	3,42	0,22	0,33	0,16	0,00	0,00	1,64	0,58	0,57	1,12	0,00	1,60	0,98	0,00	0,00	0,20
	Argilosa	1,45	0,00	1,03	0,00	1,20	7,83	0,79	2,01	4,79	4,97	0,00	8,42	3,65	0,00	0,00	6,72
	Muito argilosa	0,00	0,00	0,00	0,00	0,35	1,08	0,00	0,00	0,14	0,45	0,00	0,00	0,45	0,00	0,00	0,29
Fe ₂ O ₃ ¹	Hipoférrico	9,12	14,89	0,99	3,61	0,00	0,00	10,62	1,74	0,21	3,03	3,47	1,47	0,39	1,35	4,13	0,00
	Mesoférrico	1,44	0,01	0,95	0,00	0,17	1,66	0,01	1,04	4,34	4,60	0,00	8,75	1,69	0,00	0,00	2,00
	Férrico	0,00	0,00	0,00	0,00	1,37	7,23	0,00	0,05	0,99	0,10	0,00	0,31	3,08	0,00	0,00	5,20
MO ²	Baixo	5,79	14,91	1,02	3,84	0,00	0,00	9,96	0,86	0,00	2,84	3,25	2,79	0,40	0,96	3,35	0,00
	Médio	4,29	0,28	0,98	0,08	0,40	1,97	0,54	1,62	2,49	4,23	0,16	4,72	0,13	0,36	0,42	1,96
	Alto	0,08	0,00	0,00	0,00	1,22	7,19	0,00	0,39	2,74	0,55	0,00	3,00	4,81	0,00	0,00	5,43
CTC ³	Muito baixa	0,00	1,54	0,00	0,00	0,00	0,00	0,17	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	Baixa	0,63	11,02	0,21	2,02	0,00	0,00	4,39	0,00	0,00	0,80	1,93	0,51	0,00	0,44	1,64	0,00
	Média	6,29	2,79	1,81	2,04	0,00	0,00	4,58	0,21	0,03	3,05	1,42	4,78	0,01	0,58	2,02	0,00
	Alta	3,14	0,00	0,00	0,00	0,97	4,97	1,21	2,27	0,50	3,22	0,00	3,04	0,88	0,27	0,00	0,15
	Muito alta	0,00	0,00	0,00	0,00	0,67	4,34	0,01	0,41	4,56	0,46	0,00	2,14	4,54	0,00	0,00	7,33

¹ Ferro total ² Matéria orgânica ³ Capacidade de troca catiônica ⁴ Valores apresentados em % da área

⁵ Solos: ARGISSOLO VERMELHO-AMARELO Eutrófico típico (PVAe), ARGISSOLO VERMELHO-AMARELO Distrófico típico (PVAd), ARGISSOLO VERMELHO-AMARELO Eutrófico abrupto (PVAeab), ARGISSOLO VERMELHO-AMARELO Distrófico abrupto (PVAdab), NITOSSOLO VERMELHO Eutrófico latossólico (NVefl), NITOSSOLO VERMELHO Eutrófico típico (NVef), CAMBISSOLO HÁPLICO Tb Distrófico típico (CXbd), CAMBISSOLO HÁPLICO Tb Eutrófico típico (CXbe), CAMBISSOLO HÁPLICO Ta Eutrófico típico (CXve), LATOSSOLO VERMELHO-AMARELO Eutrófico típico (LVAe), LATOSSOLO VERMELHO-AMARELO Distrófico típico (LVAd), LATOSSOLO VERMELHO Eutrófico típico (LVe), LATOSSOLO VERMELHO Distrófico típico (LVd), NEOSSOLO LITÓLICO Eutrófico típico (RLe), NEOSSOLO FLÚVICO Psamítico típico (RUq), NEOSSOLO FLÚVICO Tb Eutrófico típico (RUbe), CHERNOSSOLO ARGILÚVICO férrico típico (MTf).

5.3.4 Correlação entre classes de solos, geologia e relevo

O mapa de solos foi comparado com os mapas de geologia, declividade e elevação. Na relação entre o mapa de solos e o de geologia, verifica-se que a maior parte dos solos está sobre área de arenito (Figuras 4 e 5).

Os Neossolos Flúvicos encontram-se, principalmente, nas áreas de material aluvial e de arenito (Tabela 7), o que explica a textura arenosa a média arenosa, baixa CTC, ferro e matéria orgânica. O Neossolo Litólico, por sua vez, está na área de influência do diabásio, com 4,44 % (Tabela 7), concordando com a textura argilosa, teor de ferro entre mesoférrico e férrico, alta matéria orgânica e CTC muito alta (Tabela 6) que este solo apresenta.

O Chernossolo, assim como o RLe, está em área de diabásio com 5,35 % da área (Tabela 7) e também tem textura argilosa a muito argilosa, alto ferro, matéria orgânica e CTC (Tabela 6).

Os Latossolos eutróficos (LVAe e LVe), na comparação com o mapa de geologia, demonstra que o material de origem é o folhelho, enquanto que o LVAd tem o arenito (Tabela 7), o que explica a diferenciação da textura mais arenosa, menor ferro total e matéria orgânica e baixa CTC deste último (Tabela 6).

Os Argilossos estão todos sobre material arenítico, o que concorda com a baixa CTC, teor de ferro e matéria orgânica e textura mais arenosa (Tabela 7). Contudo, partes da área desta classe de solo também são verificadas em locais de folhelho, o que explica as porcentagens destes solos com textura argilosa e alta CTC (Tabela 6).

Os Cambissolos de atividade baixa (CXb) estão em sua maioria em área de arenito (Tabela 7), o que concorda com os atributos do CXbd, de textura média arenosa, hipoférrico, baixa matéria orgânica e baixa CTC (Tabela 6). O CXbe, apesar do baixo ferro, do médio teor de matéria orgânica, apresenta alta CTC e textura argilosa, o que não condiz com a geologia (Tabela 6). Já o CXve, que tem como geologia o diabásio, e é argiloso, com alta matéria orgânica e CTC muito alta, possui teor de ferro entre 80 a 180 g kg⁻¹. Essas discordâncias entre a geologia e atributos podem estar relacionadas ao retrabalhamento dos outros materiais de origem nas áreas de ocorrência destes solos.

Os Nitossolos, estão em sua maioria sobre área de arenito (NVefl) ou folhelho (NVef) e não de diabásio como era de se esperar (Tabela 7). Apesar disso, eles possuem alto teor de ferro, alta CTC, textura argilosa a muito argilosa e alta matéria orgânica (Tabela 6). Isso pode ser resultado do problema de escala entre o mapa de solos e o de geologia. Como a área de ocorrência do Nitossolo é, de acordo com os mapas de geologia (Figura 4) e solos (Figura 5), ao lado da área do diabásio, pode ser que na realidade a ocorrência do diabásio na área se estenda sobre o local do Nitossolo.

Tabela 7 – Tabulação cruzada entre o mapa de geologia e de solos

Classes de solo ¹	Geologia			
	Aluvial	Arenito	Diabásio	Folhelho
PVAe	0,64	8,20	0,73	1,24
PVAd	1,59	12,20	0,59	0,01
PVAeab	0,00	1,11	0,00	0,74
PVAdab	0,00	3,58	0,00	0,37
NVefl	0,00	0,88	0,11	0,54
NVef	0,00	0,00	1,35	7,44
CXbd	0,65	8,62	1,31	0,31
CXbe	0,00	1,59	0,41	0,74
CXve	0,00	0,00	4,80	1,42
LVAe	0,00	2,22	0,65	4,50
LVAd	0,53	2,95	0,00	0,00
LVe	0,00	0,84	0,52	9,05
RLe	0,00	0,33	4,44	0,47
RUq	1,12	0,13	0,00	0,00
RUbe	3,48	0,69	0,00	0,00
MTf	0,00	0,00	5,35	1,56

¹ Solos: ARGISSOLO VERMELHO-AMARELO Eutrófico típico (PVAe), ARGISSOLO VERMELHO-AMARELO Distrófico típico (PVAd), ARGISSOLO VERMELHO-AMARELO Eutrófico abrupto (PVAeab), ARGISSOLO VERMELHO-AMARELO Distrófico abrupto (PVAdab), NITOSSOLO VERMELHO Eutroférico latossólico (NVefl), NITOSSOLO VERMELHO Eutroférico típico (NVef), CAMBISSOLO HÁPLICO Tb Distrófico típico (CXbd), CAMBISSOLO HÁPLICO Tb Eutrófico típico (CXbe), CAMBISSOLO HÁPLICO Ta Eutrófico típico (CXve), LATOSSOLO VERMELHO-AMARELO Eutrófico típico (LVAe), LATOSSOLO VERMELHO-AMARELO Distrófico típico (LVAd), LATOSSOLO VERMELHO Eutrófico típico (LVe), LATOSSOLO VERMELHO Distrófico típico (LVd), NEOSSOLO LÍTOLICO Eutrófico típico (RLe), NEOSSOLO FLÚVICO Psamítico típico (RUq), NEOSSOLO FLÚVICO Tb Eutrófico típico (RUbe), CHERNOSSOLO ARGILÚVICO férrico típico (MTf).

A relação entre solos e relevo foi verificada pelo cruzamento dos mapas de declividade e elevação com o de solos. Inicialmente, observa-se que a maior parte da área tem relevo ondulado, logo grande parte das classes de solos ocorrem na declividade de 8 a 20 % (Figura 3a, 3b e 5).

Os RU ocorrem, em sua maior porcentagem, em relevo plano a suave ondulado e de baixa altitude (Tabela 8). O RL ocorre em relevo ondulado, com altitudes variando de 500 a 527 m (Tabela 8). O Chernossolo está em relevo ondulado a forte ondulado com altitudes variando entre 528 e 554 m (Tabela 8).

Os Latossolos eutróficos ocorrem, principalmente, em áreas suave ondulado a ondulado, porém em diferentes altitudes, o LVAe está em cotas mais baixa, de 486 a 513 m, enquanto o LVe entre 514 e 527 m. Já o LVAd está presente em menores declividades, plano a suave ondulado e nas mesmas altitudes que o LVAe (Tabela 8). Sousa Junior (2005), observou para solos da região de Ibaté, que os Latossolos ocorrem em declividades inferiores à 16% enquanto Lacerda et al. (2005), para solos de Cerrado, verificaram a presença dos Latossolos em declives de até 10%.

Os Cambissolos estão presentes nas declividades entre 3 a 20 % (suave a ondulado) e com altitudes variando de 486 a 554 em todas as três classes encontradas na área (Tabela 8), concordando com Sousa Junior (2005) que obteve resultados semelhante para esta classe de solo.

O NVef está, principalmente, em relevo ondulado e é o único que está em maior porcentagem em maiores altitudes, 555 a 565 m (Tabela 8). O NVefl também ocorre em áreas ondulado, porém em menores altitudes, de 500 a 513 m (Tabela 8).

Os PVA abruptos ocorrem em relevo ondulado e altitudes entre 500 e 527 m, principalmente; o PVAe encontra-se em áreas suave ondulado a ondulado e variando em altitude entre 475 e 499, em sua maior parte. O PVAd, assim como o PVAe, ocorre em relevo suave ondulado a ondulado e, em particularmente, todas as altitudes, porém com maior porcentagem entre 486 e 499 m.

Sousa Junior (2005), verificou que o comportamento dos solos com relação ao declive é variável, podendo um mesmo solo ocorrer em diferentes declividades.

Tabela 8 – Comparação entre os mapas de solo, declividade e elevação

Classes de solo ¹	Declividade				Elevação						
	Plano	Suave Ondulado	Ondulado	Forte Ondulado	475-485	486-499	500-513	514-527	528-541	542-554	555-565
PVAe	0,47 ²	4,33	4,89	0,96	2,27	3,62	1,14	1,59	1,56	0,49	0,00
PVAd	2,26	6,25	5,67	0,33	2,53	4,13	0,08	2,43	2,80	2,54	0,00
PVAeab	0,08	0,43	1,33	0,01	0,00	0,00	1,11	0,03	0,71	0,00	0,00
PVAdab	0,40	1,02	2,37	0,09	0,29	1,08	1,01	1,50	0,00	0,00	0,00
NVefl	0,00	0,30	1,19	0,04	0,00	0,08	0,91	0,00	0,00	0,10	0,43
NVef	1,36	2,27	4,86	0,32	0,00	0,00	0,00	0,46	0,72	1,91	5,71
CXbd	2,16	4,55	3,92	0,25	0,79	3,90	0,55	0,80	2,63	2,22	0,00
CXbe	0,00	1,10	1,60	0,04	0,00	0,59	0,74	0,42	0,06	0,94	0,00
CXve	0,04	0,76	4,11	1,28	0,00	0,75	1,81	3,14	0,48	0,00	0,00
LVAe	0,27	2,38	4,61	0,18	0,00	2,07	2,04	0,50	1,46	1,02	0,35
LVAd	1,22	1,14	0,92	0,23	0,37	2,01	1,12	0,00	0,00	0,00	0,00
LVe	0,30	3,81	6,19	0,15	0,00	0,62	2,48	5,65	0,89	0,62	0,18
RLe	0,00	0,64	4,05	0,52	0,00	0,08	1,43	2,60	0,59	0,22	0,30
RUq	0,35	0,47	0,28	0,14	1,24	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
RUbe	1,53	1,88	0,69	0,07	2,86	0,80	0,51	0,00	0,00	0,00	0,00
MTf	0,00	0,03	5,22	1,68	0,00	0,00	0,05	0,80	3,06	2,61	0,40

¹ Solos: ARGISSOLO VERMELHO-AMARELO Eutrófico típico (PVAe), ARGISSOLO VERMELHO-AMARELO Distrófico típico (PVAd), ARGISSOLO VERMELHO-AMARELO Eutrófico abrupto (PVAeab), ARGISSOLO VERMELHO-AMARELO Distrófico abrupto (PVAdab), NITOSSOLO VERMELHO Eutrófico latossólico (NVefl), NITOSSOLO VERMELHO Eutrófico típico (NVef), CAMBISSOLO HÁPLICO Tb Distrófico típico (CXbd), CAMBISSOLO HÁPLICO Tb Eutrófico típico (CXbe), CAMBISSOLO HÁPLICO Ta Eutrófico típico (CXve), LATOSSOLO VERMELHO-AMARELO Eutrófico típico (LVAe), LATOSSOLO VERMELHO-AMARELO Distrófico típico (LVAd), LATOSSOLO VERMELHO Eutrófico típico (LVe), LATOSSOLO VERMELHO Distrófico típico (LVd), NEOSSOLO LITÓLICO Eutrófico típico (RLe), NEOSSOLO FLÚVICO Psamítico típico (RUq), NEOSSOLO FLÚVICO Tb Eutrófico típico (RUbe), CHERNOSSOLO ARGILÚVICO férrico típico (MTf).

² Valores apresentados em % da área

5.4 Conclusões

1. Os atributos ferro total, CTC, argila e matéria orgânica apresentaram-se semelhantes e com alta correlação;
2. O mapa geológico apresentou estreita correlação com os atributos argila, matéria orgânica, CTC e ferro total;
3. O mapa de solos mostrou maior relação com os mapas de argila e ferro total e, dentre as variáveis ambientais, a geologia foi a que melhor se associou às classes de solo;
4. A avaliação espacial dos atributos do solo e da geologia mostraram que os mesmos podem ser utilizados como auxílio na delimitação preliminar de classes de solos.

Referências

ALLEONI, L.R.F.; CAMARGO, O.A. Óxidos de ferro e de alumínio e a mineralogia da fração argila deferrificada de latossolos ácricos. **Scientia Agricola**, Piracicaba, v. 52, n. 3, p. 416-421, set./dez. 1995.

BRADY, N.C.; WEIL, R.R. **The nature and properties of soils**. 13th ed. New Jersey: Prentice Hall, 2002. 960 p.

BRUBAKER, S.C.; JONES, A.J.; LEWIS, D.T.; FRANK, K. Soil properties associated with landscape position. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 57, n. 1, p. 235-239, Jan./Feb. 1993.

CAMARGO, A.O. de; MONIZ, A.C.; JORGE, J.A.; VALADARES, J.M. **Métodos de análise química, mineralógica e física de solos do IAC**. Campinas: IAC, 1986. 94 p. (IAC. Boletim Técnico, 106).

CENTRO NACIONAL DE ENSINO E PESQUISA AGRONÔMICA. **Levantamento de reconhecimento de solos do Estado de São Paulo**. Rio de Janeiro: Ministério da Agricultura, 1960. 637 p. (SNPA. Boletim 12).

CORÁ, J.E. **The potential for site-specific management of soil and yield variability induced by tillage**. 1997. 104 p. Thesis (PhD in Crop and Soil Science) – Michigan State University, East Lansing, 1997.

CRESSIE, N.A.C. **Statistics for spatial data**. New York: John Wiley, 1991. 900 p.

DEMATTE, J.A.M.; MORETTI, D.; VASCONCELOS, A.C.F.; GENÚ, A.M. Uso de imagens de satélite na discriminação de solos desenvolvidos de basalto e arenito na região de Paraguaçu Paulista. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 40, n. 7, p. 697-706, jul. 2005.

EMBRAPA. **Sistema brasileiro de classificação de solos**. Brasília: Serviço de Produção de Informação, 1999. 412 p.

ENVIRONMENTAL SYSTEMS RESEARCH INSTITUTE. **ArcGIS 9.0**. Redlands, 2005. 3 CD-ROM.

GOOVAERTS, P. **Geostatistics for natural resources evaluation**. New York: Oxford University Press, 1997, 496 p.

HAVLIN, J.L.; BEATON, J.D.; TISDALE, S.L.; NELSON, W.L. **Soil fertility and fertilizer**: an introduction to nutrient management. 6th ed. New Jersey: Prentice Hall, 1999. 499 p.

INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS. Divisão de Minas e Geologia Aplicada. **Mapa geológico de Estado de São Paulo**. São Paulo, 1981. Escala 1:1000.000.

LACERDA, M.P.C.; BARBOSA, I.O.; MENESES, P.R.; ROSA, J.W.C.; ROIG, H.L. Aplicação de geotecnologias em correlações entre solos, geomorfologia, geologia e vegetação nativa no Distrito Federal, DF. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 12., 2005, Goiânia. **Anais...**Goiânia:INPE, 2005, p. 2211-2218. 1 CD-ROM.

MATWORKS INC. **Matlab 7.0**. Gouda, 2005. 1 CD-ROM.

MZUKU, M.; KHOSLA, R.; REICH, R.; INMAN, D.; SMITH, F.; MacDONALD, L. Spatial variability of measured soil properties across Site-Specific Management Zones. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 69, p. 1572-1579, 2005.

NANNI, M.R. **Dados radiométricos obtidos em laboratório e no nível orbital na caracterização e mapeamento de solos**. 2000. 366 p. Tese (Doutorado em Solos e Nutrição de Plantas) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2000.

PORTA CASANELLAS, J.; LOPÉZ-ACEVEDO REGUERÍN, M.; ROQUERO DE LABURU, C. **Edafología**: para la agricultura y el medio ambiente. Bilbao: Mundi-Prensa, 1999. 849 p.

RAIJ, B. van; QUAGGIO, J.A. **Métodos de análise de solo para fins de fertilidade**. Campinas: IAC, 1989. 40 p. (IAC. Boletim Técnico 8).

SCULL, P.; FRANKLIN, J.; CHADWICK, O.A.; McARTHUR, D. Predictive soil mapping: a review. **Progress in Physical Geography**, London, v. 27, n. 2, p. 171-197, June 2003.

SIX, J.; ELLIOTT, E.T.; PAUSTIAN, K. Soil structure and soil organic matter: II. A normalized stability index and the effect of mineralogy. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 64, n. 3, p. 1042-1049, May/June 2000.

SOUSA JUNIOR, J.G. **Sensoriamento remoto e sistema de informações geográficas na caracterização de solos e quantificação de seus atributos**. 2005. 141 p. Dissertação (Mestrado em Solos e Nutrição de Plantas) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2005.

SOUZA, Z.M.; MARQUES JUNIOR, J.; PEREIRA, G.T.; BARBIERI, D.M. Small relief shape variations influence spatial variability of soil chemical attributes. **Scientia Agricola**, Piracicaba, v. 63, n. 2, p. 161-168, mar./abr. 2006.

STATISTICAL ANALYSIS SYSTEM. **SAS 8.02**. Cary, 1999. 5 CD-ROM.

TOMÉ JUNIOR., J.B. **Manual para interpretação de análises de solo**. Guaíba:Agropecuária, 1997. 247 p.