

## ESTIMATIVA DE ATRIBUTOS DOS SOLOS USANDO DADOS ESPECTRAIS OBTIDOS POR SENSORES EM LABORATÓRIO E EM SATÉLITES

PETERSON RICARDO FIORIO<sup>1</sup>  
JOSÉ ALEXANDRE M. DEMATTÊ<sup>2</sup>  
ANTÔNIO ROBERTO FORMAGGIO<sup>1</sup>  
MARCOS RAFAEL NANNI<sup>3</sup>

<sup>1</sup> INPE – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais  
Caixa Postal 515 – 12227-010 – São José dos Campos – SP, Brasil  
peterson@ltid.inpe.br

<sup>2</sup>ESALQ – Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz  
Caixa Postal 09 - 13418-900 – Piracicaba – SP, Brasil  
jamdemat@esalq.usp.br

<sup>3</sup>UEM – Universidade Estadual de Maringá  
mrnanni@uem.br

**Abstract.** The objective of the present work was to generate multiple linear equations for estimating soil attributes using data from laboratory and orbital sensors. The study area was a 473 ha bare soil field located in the region of Barra Bonita, SP. A sampling grid was established (100 m x 100 m) and soil samples were collected in two depths (0-20 cm and 80-100cm) for laboratory pedological analyses. The grid points were georeferenced using TM-Landsat-5 data. Reflectance data were obtained with the laboratory spectroradiometer (450 to 2500 nm) and with TM-Landsat-5 images. Multiple linear equations were generated relating seven soil attributes and reflectance data, with high  $r^2$  coefficients for  $Fe_2O_3$ ,  $Al_2O_3$ ,  $Al_2O_3/Fe_2O_3$ , and  $TiO_2$ .  
Keywords: linear multiple regression, reflectance, remote sensing, soil attributes prediction.

### Introdução

A estimativa de atributos de solos é uma importante meta dos pesquisadores da área de sensoriamento remoto.

O sistema denominado NIRA (Near-Infrared Analysis) foi desenvolvido tendo como base as informações contidas na radiação eletromagnética do infravermelho próximo, em laboratório, com o objetivo de estimar aspectos químicos de materiais (Stark et al., 1986). Essa metodologia foi desenvolvida há três décadas visando análises rápidas da umidade de grãos (Ben-Gera & Norris, 1968). Atualmente os métodos do NIRA são bem aceitos e aplicados em várias áreas (Norris, 1988), sendo que este método é valorizado por permitir a análise de vários constituintes de um material em cada medição (Stark et al., 1986). Em adição ao NIRA, Coleman et al. (1991) utilizaram desde o visível até o infravermelho para avaliação de propriedades do material solo, obtendo bons resultados na estimativa de matéria orgânica, argila e ferro. Estes métodos de estimativa baseiam-se em equações lineares múltiplas, que são constantemente calibradas em função da região de estudo e da porção do espectro eletromagnético usada. As feições espectrais de amostras de solos no visível e no infravermelho (450-2500 nm) estão associadas a vibrações moleculares de grupos específicos presentes nestas amostras. Essas feições vibracionais são o fundamento dos estudos em faixas (ou bandas) espectrais definidas (Ben-Dor & Banin, 1995 a,b). Em geral, os minerais dos solos apresentam distintas “impressões digitais espectrais” nesta faixa de comprimentos de onda em função de absorções em bandas específicas ou combinadas (Hunt & Salisbury, 1970).

Esses métodos assumem que a concentração de um dado constituinte manifesta-se numa combinação linear de várias feições de absorção. A reflectância espectral de uma dada superfície é extremamente complexa, sendo afetada pelo número e pelos tipos de materiais

presentes, sua concentração, tamanho, número, peso e geometria de visada (Clark & Roush, 1984). Por outro lado, todos os atributos dos solos são importantes, porém, em diferentes graus. De acordo com Embrapa (1999), os teores de  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  auxiliam na determinação dos grandes grupos e famílias da classificação dos solos, base para os levantamentos de solos. Porém, a análise do ataque sulfúrico, realizada para determinação do conteúdo de  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  nos solos, é cara e demorada, o que limita o número de amostras a serem enviadas aos laboratórios – consequentemente dificultando os levantamentos de solos, que são ainda insuficientes no Brasil e nos países em desenvolvimento. Desta forma, evidencia-se a forte necessidade do desenvolvimento de metodologias que venham a auxiliar na determinação de informações que agilizem e propiciem aumentos dos levantamentos pedológicos nestes países. Neste contexto, o presente trabalho teve por objetivo gerar equações lineares de regressão múltipla para os resultados das análises de  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{Fe}_2\text{O}_3$ ,  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{TiO}_2$ ,  $\text{K}$ ,  $\text{Ca}$  e argila, usando dados de reflectância obtidos por sensores instalados em laboratório e em satélite.

### Material e Métodos

**Área de estudo:** localiza-se a sudoeste do Estado de São Paulo, na região de Barra Bonita, sendo delimitada pelas coordenadas geográficas  $22^\circ 26' 2,37''$  -  $22^\circ 23' 16,53''$  latitude sul e  $48^\circ 31' 24,22''$  -  $48^\circ 27' 51,77''$  longitude oeste, com extensão de 473 há e apresentando clima mesotérmico do tipo Cwa (Sentelhas et al., 1998). A litologia é representada principalmente pela ocorrência da Formação Serra Geral e da Formação Itaqueri do grupo Bauru (IPT, 1981). **Amostragem:** inicialmente foi estabelecida uma grade (100 m x 100 m) totalizando 473 pontos para toda a área. Estes pontos foram georreferenciados usando a imagem órbita 222, ponto 076 adquirida pelo sensor TM do Landsat-5 em 27/08/1997. Amostras de terra foram coletadas nas profundidades de 0-20 cm (camada A; referente ao horizonte A) e de 80-100 cm (camada B; referente ao horizonte B), totalizando 946 amostras de solos. A cor do solo foi obtida na forma úmida com o equipamento Minolta CR 300 com chip para cor de Munsell (Post et al., 1994; Campos, 2002). Para o ataque sulfúrico, foi utilizada a metodologia preconizada por Camargo et al. (1987), selecionando-se das 473 amostras da área apenas 103 pontos representativos dos solos, totalizando para as duas camadas 206 amostras de solos. Para estas 206 amostras, foram determinados os seguintes atributos: óxido de alumínio ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ), óxido de ferro ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ), relação  $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{Fe}_2\text{O}_3$ , óxido de silício ( $\text{SiO}_2$ ) e óxido de titânio ( $\text{TiO}_2$ ).

**Obtenção dos dados espectrais:** para o nível de dados de satélite, foi utilizada uma cena TM-Landsat-5 nas bandas 1, 2, 3, 4, 5 e 7. Após definida a área de estudo, foi realizado um corte na imagem usando o programa SPRING (INPE, 1999), sendo em seguida os dados de níveis de cinza transformados em reflectância. Segundo Ben-Dor (2002), os valores de níveis de cinza obtidos das cenas do sensor TM-Landsat devem ser devidamente ajustados aos efeitos atmosféricos para que, posteriormente, os números digitais possam ser convertidos em valores de reflectância real. Para tanto, foi utilizado o modelo 5S (Simulação do Sinal do Satélite dentro do Espectro Solar) (Tanré et al., 1992; Zullo Jr., 1994). Após o processo de correção e conversão, o nível de cinza zero presente na imagem passou a corresponder à reflectância 0 % e o nível de cinza 255 à reflectância 100 %. Para adequar o posicionamento da imagem com a verdade de campo, a correção geométrica se fez necessária. Dessa forma, foram utilizadas cartas planialtimétricas e pontos obtidos no campo com equipamento GPS (Global Positioning System) com erro submétrico. Objetivando manter o valor do pixel o mais semelhante possível ao seu valor original, utilizou-se o método de interpolação denominado vizinho mais próximo, que corrige apenas as distorções de escala, deslocamento ou rotação existentes entre a imagem e a projeção terrestre (Crósta, 1992). Uma vez

registrada, a cena foi visualizada em composição colorida R/G/B, nas bandas 1/2/3 e 4/5/7. Sobre os planos de informação “imagens”, foram sobrepostos os pontos de amostragem da grade. Em cada ponto de amostragem, foram determinados os dados espectrais das referidas bandas TM-Landsat-5. Para a obtenção dos dados espectrais de laboratório, foi utilizado o sensor Infra-Red Intelligent Spectroradiometer, IRIS (Geophysical & Environmental Research Corporation, 1996), que recobre a faixa espectral entre 450 e 2.500 nm. Todas as amostras foram previamente secas em estufa a 45°C por 24 horas, moídas e peneiradas (malha de 2 mm), para homogeneização dos efeitos da umidade e rugosidade (Epiphany et al., 1992). Posteriormente, as amostras foram acondicionadas em placas de petri e iluminadas por uma lâmpada halógena de 650 W. A energia alimentadora da lâmpada foi estabilizada com uma fonte de potência de 1 %, a fim de evitar variações. Utilizou-se uma placa padrão branca de spectralon, com 100 % de reflectância, calibrada pela Labsphere (1996). A geometria utilizada foi: 61 cm lâmpada-alvo e alvo-sensor: 27 cm; inclinação da lâmpada 20° em relação ao nadir (Baumgardner et al., 1985). Posteriormente, os dados foram passados por um software (Conviris), que regularizou os dados da placa de referência e realizou uma filtragem destes, para minimizar ruídos e facilitar a interpretação dos dados obtidos. A relação entre a energia refletida pelo alvo e a energia refletida pela placa de referência gerou o fator de reflectância bidirecional (Nicodemus et al., 1977). Foram realizadas três leituras em cada amostra, sendo então utilizada a curva espectral média.

**Análise estatística e comparação dos resultados:** Para os dados orbitais, foram obtidos os dados de reflectância apenas da camada superficial dos solos, nas bandas do TM-Landsat-5, sendo : B1: 450-520 nm, B2: 520-600 nm, B3: 630-690 nm, B4: 760-900 nm, B5: 1150-1750 nm, B7: 2080-2350 nm. Os dados espectrais obtidos com o IRIS em laboratório, permitem uma maior resolução radiométrica, podendo-se estabelecer um maior número de bandas para as regressões a serem obtidas. Foram selecionadas 22 bandas (B) e 13 alturas, diferença entre os valores de reflectância da crista e do vale da inflexão, (H), seguindo metodologia de Nanni & Demattê (2001b), sendo elas : B1: 450-481 nm, B2: 481 nm, B3: 481-596 nm, B4: 596-710 nm, B5: 710-814 nm, B6: 814-975 nm, B7: 975-1350 nm, B8: 1350-1417 nm, B9: 1417 nm, B10: 1417-1449 nm, B11: 1449-1793 nm, B12: 1793-1831 nm, B13: 1865-1927 nm, B14: 1927 nm, B15: 1927-2102 nm, B16: 2101-2139 nm, B17: 2139-2206 nm, B18: 2206 nm, B19: 2206-2258 nm, B20: 2258 nm, B21: 2258-2389 nm, B22: 2389-2498 nm, H1: 469-532 nm, H2: 532-768 nm, H3: 768-876 nm, H4: 876-1353 nm, H5: 1353-1411 nm, H6: 1411-1439 nm, H7: 1439-1783 nm, H8: 1860-1923 nm, H9: 1923-2120 nm, H10: 2120-2206 nm, H11: 2206-2258 nm, H12: 2258-2389 nm, H13: 2389-2498 nm. Essa seleção baseia-se em observações empíricas, considerando também as indicações feitas na literatura sobre estudos espectrais de solos. Posteriormente é utilizado um sistema automatizado estatístico (o SAS, 1999) para determinação das melhores bandas. Todas as amostras com resultados de ataque sulfúrico (206 amostras) foram submetidas às análises de correlação e regressão usando o Sistema de Análise Estatístico SAS (SAS, 1999). Para o desenvolvimento do presente trabalho, foram geradas equações lineares de regressão múltipla, tendo-se seguido os seguintes passos: (a) foram realizadas as seleções das variáveis preditoras (bandas e alturas “chave”, acima destacadas) para os dados de laboratório; para os dados orbitais foram usadas as reflectâncias; esses procedimentos realizados pelo Sistema de Análise Estatístico SAS (SAS, 1999) verificam quais variáveis apresentam maior ou menor potencial para o desenvolvimento dos modelos; (b) foi realizada uma avaliação de colinearidade das variáveis, para que não houvesse duas ou mais variáveis que pudessem estar sobrepondo-se; e (c) para cada atributo do solo foram estabelecidas equações lineares de regressão múltipla, para dados radiométricos orbitais e para os de laboratório.

## Resultados e Discussão

Para as equações lineares de regressão múltipla com dados orbitais (EO), foram utilizadas apenas as amostras da camada A, totalizando 103 amostras para ataque sulfúrico e 236 amostras de argila. Com os dados radiométricos de laboratório, foram geradas equações lineares de regressão múltipla dos dados de laboratório (EL), para ambas as profundidades de coleta, totalizando 206 amostras com dados de ataque sulfúrico e 473 amostras para argila. Assim, foram obtidas equações de regressão múltipla independentemente das camadas (A ou B), diferindo neste ponto em relação ao trabalho de Nanni (2000), que considerou as duas camadas separadamente. As EL para o ataque sulfúrico podem ser observadas na **Tabela 1a**. Das 22 bandas e 13 alturas (perfazendo um total de 35 variáveis), a equação do  $\text{Al}_2\text{O}_3$  apresentou-se com o maior número de variáveis (9), entre bandas e alturas. A menor equação foi a do  $\text{SiO}_2$ , com 4 variáveis. Para o  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  foram destacadas 5 variáveis, sendo estas constituídas só de alturas (**Tabela 1a**). Desta forma, pode-se notar que a estatística usada promoveu a escolha das bandas e alturas mais representativas para cada atributo do solo; ou seja, aquelas que caracterizam melhor cada atributo, concordando com Huete & Escadafal (1991), Demattê & Garcia (1999) e Nanni (2000). Dos 7 atributos estudados, as variáveis  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{Fe}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  e  $\text{TiO}_2$  apresentaram altos coeficientes de determinação ( $r^2$ ), com valores maiores que 0,8 (**Tabela 1a**); estes coeficientes foram mais elevados que os obtidos por Demattê & Garcia (1999) (que obtiveram  $r^2$  de 0,64 para  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ , por exemplo). Coeficientes semelhantes aos aqui determinados foram obtidos por Nanni & Demattê (2001), que obtiveram valores de  $r^2$  maiores que 0,90 para  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ,  $\text{TiO}_2$  e  $\text{SiO}_2$ , para solos da região de Piracicaba (SP); sendo que o  $r^2$  para  $\text{SiO}_2$  (0,72), considerado alto no presente trabalho, foi menor que os encontrados pelos autores acima citados. Os presentes resultados para esses atributos vêm corroborar resultados de Ben-Dor & Banin (1990), que relataram  $r^2$  entre 0,60 e 0,92 para as formas de ferro (total, cristalino e amorfo). Para o atributo Kr, o resultado de 0,67 também foi considerado satisfatório. O menor resultado encontrado foi para o Ki, com  $r^2$  de 0,42, sendo então a utilização dessa equação (**Tabela 1a**) considerada pouco confiável. Valores razoáveis de Ki foram também observados por Demattê & Garcia (1999) que trabalharam com solos originados do basalto ( $r^2$  de 0,69 para Ki), tendo sido estabelecida uma relação entre nível de intemperismo e reflectância espectral. A estimativa do teor de argila apresentou alto coeficiente de determinação, com valores superiores a 0,8 (**Tabela 1a**), concordando com Nanni & Demattê (2001 b), que obtiveram  $r^2$  de 0,91 para argila na superfície. Coleman et al. (1991) consideraram alto um coeficiente de determinação 0,68 para argila. Os altos coeficientes de significância obtidos para os trabalhos citados, posteriores a Coleman et al. (1991), indicam a importância de se empregar um número significativo de bandas nos modelos. Por outro lado, concordando com Stark et al. (1986), Demattê & Garcia (1999) e Ben-Dor (2002), deve-se tomar cuidado para evitar os efeitos de sobreposição de bandas nos modelos através de cuidados estatísticos prévios. Nanni & Demattê (2001a) testaram modelos pré-estabelecidos (para uma região do Paraná) por Demattê & Garcia (1999) na estimativa de  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  e verificaram a validade em amostras desconhecidas, advindas de outra região. Os resultados foram positivos, indicando que os modelos estimaram de maneira significativa os teores desses atributos. As variações de  $r^2$  são devidas a uma série de fatores, entre eles, a variabilidade dos solos observados, a representatividade das amostras, o número e a especificidade das bandas selecionadas, a geometria de aquisição e o equipamento utilizado, entre outros. Ponto fundamental refere-se às amostras que devem ser utilizadas para a elaboração dos modelos. Sabe-se que os comportamentos espectrais de amostras de terra coletadas em diferentes camadas é diferente, basicamente em função das variações em profundidade de concentrações da matéria orgânica (Coleman & Montgomery, 1987; Galvão et al., 1997). Então surge a questão sobre a necessidade (ou não) de elaborar modelos

utilizando amostras das camadas superficial subsuperficial, separadamente. Nos primeiros trabalhos foram utilizadas principalmente amostras de terra da camada superficial na elaboração de modelos, como realizado por Coleman et al. (1991) e Demattê & Garcia (1999). Nanni (2000) estabeleceu modelos da camada superficial e subsuperficial separadamente, obtendo altos coeficientes; posteriormente, validou os modelos da camada superficial, com amostras desconhecidas da subsuperficial e vice-versa, também obtendo altos coeficientes. No presente trabalho, não foi feita a separação das amostras para gerar modelos ou validar as equações, e também foram obtidos altos coeficientes (**Tabela 1**). Os resultados indicam, portanto, que não é necessário elaborar modelos independentes para cada profundidade de amostragem de terra; entretanto, ressalta-se a importância de se ter amostras representativas de toda a área de estudo. Para as EO, foram usadas 6 variáveis iniciais (TM 1, 2, 3, 4, 5 e 7); com exceção do  $\text{SiO}_2$  e  $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{Fe}_2\text{O}_3$  com duas variáveis, o restante das equações apresentaram 3 variáveis preditoras (**Tabela 1b**). A banda TM 7, com exceção da relação  $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{Fe}_2\text{O}_3$ , foi selecionada para todas as outras equações. A Banda TM 4 aparece em 5 das 8 equações, sendo que sempre junto com a banda TM 7. Nanni (2000) verificou a presença da banda TM 7 para  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  e  $\text{TiO}_2$ , porém não foi selecionada a banda TM 4, o que difere dos resultados obtidos no presente trabalho. Para  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ , Coleman et. al. (1993) observaram a presença das bandas TM 7 e 4. A seleção da banda TM 7 deve estar associada à influência de solos mais jovens, com  $K_i > 2$ , solos mais argilosos, motivo pelo qual a água é mais retida, influenciando juntamente com a caulinita na maior absorção da banda TM 7, a qual apresenta-se em quase todas as equações dos atributos estudados (**Tabela 1b**). A participação ou não de determinada banda, entretanto, está diretamente ligada às características específicas dos solos de uma região, o que explica as variações entre os trabalhos. O maior coeficiente de determinação observado foi o do  $\text{TiO}_2$  com 0,72 (**Tabela 1b**), concordando com os resultados obtidos por Nanni (2000), e confirmado por Ben-Dor & Banin (1990) e Nanni & Demattê (2001b). Para  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  e  $\text{SiO}_2$ , os valores do  $r^2$  foram de 0,678; 0,672 e 0,65 respectivamente. O resultado obtido para  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  na presente pesquisa, considerado bom, foi um pouco inferior aos resultados obtidos por Nanni & Demattê (2001b) e Nanni (2000), cujo  $r^2$  foi 0,72; contudo, no presente trabalho foi muito superior ao apresentado por Coleman et. al. (1993), os quais obtiveram um  $r^2$  de 0,288 para  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ . Para o  $\text{SiO}_2$  os resultados obtidos foram superiores aos encontrados por Nanni & Demattê (2001b), com  $r^2$  de 0,59 (**Tabela 1b**).

O atributo com menor  $r^2$  foi o  $K_i$ , com 0,31, seguido pela relação  $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{Fe}_2\text{O}_3$  com 0,479. Os valores de  $r^2$  observados para esses atributos restringem o uso dessas equações, as quais podem vir a apresentar resultados pouco confiáveis. Apesar de apresentar um  $r^2$  de 0,54, o  $K_r$  é considerado como um bom resultado para este trabalho (**Tabela 1b**). Coleman et al. (1993) apresentaram dados com  $r^2$  entre 0,1 e 0,4 para areia, silte, argila, ferro e MO. Assim, considerando os valores obtidos na presente pesquisa (**Tabela 1**), há indicações de que é possível quantificar atributos de solos através de dados obtidos por sensores. As variações das significâncias dos modelos, entre os dados de literatura, estão intimamente associadas às metodologias usadas, principalmente no caso da avaliação de dados orbitais. Os dados extraídos de imagens obtidas por satélites posicionados a centenas de quilômetros de altitude podem apresentar uma quantidade muito grande de fatores interferentes, como variações geométricas e atmosféricas, rugosidade da superfície, ângulo e intensidade de iluminação, resíduos na superfície, presença de vegetação, equipamento sensor utilizado, entre outras (Guyot et al., 1996). Apesar disso, observa-se que tomando-se os devidos cuidados, conforme proposto na metodologia usada na presente pesquisa, é possível estimar os teores de alguns atributos dos solos usando dados espectrais.

## Conclusões

É possível estimar os teores de  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , relação  $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{Fe}_2\text{O}_3$ ,  $\text{SiO}_2$  e  $\text{TiO}_2$  por meio de modelos de regressão linear múltipla, desenvolvidos a partir da energia eletromagnética refletida por amostras de terra e adquiridas por sensores instalados em laboratório e satélite. Não é necessário elaborar modelos independentes para cada profundidade de amostragem de terra; entretanto, ressalta-se a importância de se ter amostras representativas de toda a área de estudo. Evidentemente, maior número de estudos são necessários, a fim de confirmar a validade dos modelos propostos para várias outras condições de toposequência e de pedogênese.

## Agradecimentos

À Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo, pela aquisição do espectroradiômetro IRIS, (proc. n° 95/6259-6), pela bolsa de Doutorado do primeiro autor, através do (proc. n° 99/04325-2); ao CNPq pela bolsa de pesquisador ao segundo autor (proc. n.° 300371/96-9).

## Referências

- BAUMGARDNER, M.F.; SILVA, L.F.; BIEHL, L.L.; STONER, E.R. Reflectance properties of soils. *Advances in Agronomy*, v.38, p.1-44, 1985.
- BEN-DOR, E. Quantitative remote sensing of soil properties. *Advances in Agronomy*, v.75, p.173-243, 2002.
- BEN-DOR, E.; BANIN, A. Near-Infrared analysis as a rapid method to simultaneously evaluate several soil properties. *Soil Science Society of America Journal*, v. 59, p.364-372, 1995a.
- BEN-DOR, E.; BANIN, A. Near-Infrared analysis as a simultaneously method to evaluate spectral featureless constituents in soils. *Soil Science*, 159, 259-269. 1995 b.
- BEN-GERA, I. & NORRIS, K. Determination of moisture content in soybeans by direct spectrophotometry. *Israeli Journal Agr. Res.*, 18, 124-132, 1968.
- CAMPOS, R. C. Determinação da cor do solo e sua utilização na estimativa dos teores de hematita. Piracicaba, 2002. p. Dissertação (M.S.) - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Universidade de São Paulo.
- CAMARGO, M. N.; KLANT, E.; KAUFFMAN, J. H. Classificação de solos usada em levantamentos pedológicos no Brasil. Campinas. *Boletim Informativo da Sociedade Brasileira de Ciência do Solo*, v.12. n.1, p.11-13, jan./abr., 1987.
- CLARK, R.N.; ROUSH, T.L. Reflectance spectroscopy: Quantitative analysis techniques for remote sensing applications. *Journal Geophysics Res.*, 89, 6329-6340, 1984.
- COLEMAN, T.L., O.L. MONTGOMERY. Soil moisture, organic matter, and iron content effect on the spectral characteristics of selected Vertisols and Alfisols in Alabama. *Photogram. Eng. Remote Sens.*, 53: 1659-1663, 1987.
- COLEMAN, T. L.; AGBU, P. A.; MONTGOMERY, O. L. Spectral differentiation of soils and soil properties: is it possible from space platforms?. *Soil Science*, v.155, p.283-293, 1993.
- COLEMAN, T. L.; AGBU, P. A.; MONTGOMERY, O. L.; GAO, T.; PRASAD, S. Spectral band selection for quantifying selected properties in highly weathered soils. *Soil Science*, v.151, n.5, p.355-361, 1991.
- CRÓSTA, A. P. *Processamento digital de imagens de sensoriamento remoto*. Campinas : UNICAMP, 1992. 170 p.
- DEMATTÊ, J. A. M.; GARCIA, G. J. Alteration of soil properties through a weathering sequence as evaluated by spectral reflectance. *Soil Science Society of America Journal*, v.63, n2, p.327-342, 1999.
- EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. Centro Nacional de Pesquisa de Solos. *Sistema brasileiro de classificação de solos*. Brasília: Serviço de Produção. 1999. 412 p.

EIPHANIO, J. C. N.; FORMAGGIO, A. R.; VALERIANO, M.; OLIVEIRA, J. B. **Comportamento espectral de solos do Estado de São Paulo**. São José dos Campos: INPE, 1992.131p.

GALVÃO, L. S.; VITORELLO, I.; FORMAGGIO, A.R. Relationships of spectral reflectance and color among surface and subsurface horizons of tropical soil profiles. **Remote Sensing of Environment**, v.61, p.24-33, 1997.

GEOPHYSICAL ENVIRONMENTAL RESEARCH CORP, GER. **Mark V Dual Field of View IRIS Manual**. Version 1.3. Milbook, New York, 1996, 63 p.

GUYOT, G.; GU, X.F.; WEISS, M; BARET, F. Du signal satellitaire à la reflectance au sol: problèmes direct et inverse. *Photo Interpretation*, v.32, n.2, p.119-137, 1996.

HUETE, A. R.; ESCADAFAL, R. Assessment of biophysical soil properties through spectral decomposition techniques. **Remote Sensing of Environment**, v. 35, p. 149-159, 1991.

HUNT, G.R., J.W. SALISBURY. Visible and infrared spectra of minerals and rocks: II. Carbon. **Modern Geol.**, 2: 23-30. 1970.

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

INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS, INPE. **Tutorial Spring**: spring básico. São José dos Campos: Inpe. 1999. não paginado.

LABSPHERE, REFLECTANCE CALIBRATION LABORATORY. **Spectral reflectance target calibrated from 0.25-2.5 mm reported in 0.050 mm intervals**. Sutton, 1996. 5p.

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

NANNI, M. R.; DEMATTÊ, J. A. M. Quantification and discrimination of soils developed from basalt as evaluated by terrestrial, airborne and orbital sensors (compact disc). In: X SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, Foz do Iguaçu, abril 2001. **Anais**. São José dos Campos, INPE, 2001a.

NANNI, M. R.; DEMATTÊ, J. A. M. Is it possible estimate physical-chemical soil attributes by using laboratory and orbital sensors (compact disc). In: THIRD INTERNATIONAL CONFERENCE OF GEOSPATIAL INFORMATION IN AGRICULTURE AND FORESTRY, Denver, Colorado, 5-7 November, 2001. **Proceedings**, 2001b

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

NORRIS, K. H. History, present state, and future, prospects for near infrared spectroscopy. In: CREASER, C.S.; DAVISE, A.M.C. (Ed.) **Analytical application of spectroscopy**. London: Royal Society of Chemistry, 1988. p.3-8.

POST, D.F.; HORVATR E.H.; LUCAS, W.M.; VVJRTE, S.A.; EHASZ, M.J.; BATCFULY, A.K. Relationship between soil color and Landsat reflectance on semiarid Rangelands. **Soil Science Society of America Journal**, v.58, p.1809-1816, 1994.

SENTELHAS, P.C.; MARIN, F.R.; PEREIRA, R.; ANGELOCCI, L.R.; VILA NOVA, N.A.; BARBIERI, V. Análise de dados climáticos e do balanço hídrico climatológico de Piracicaba (1917-1997). Piracicaba: DFM/ESLQ/USP, 1998, 81p.

STATISTICAL ANALYSIS SYSTEM INSTITUTE. **SAS, software**: user's guide, version 8.2, Cary, 1999. 291p.

STARK, E.; LUCHTER, K; MARGOSHES, M. Near-Infrared Analysis (NIRA): A technology for quantitative and qualitative analysis. *Applied Spectroscopy reviews*, 22 (4), 335-399, 1986.

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

ZULLO Jr, J. Correção atmosférica de imagens de satélite e aplicações. Campinas, 1994. 191p. Tese (Doutorado), Universidade de Campinas.

**Tabela 1. Equações lineares de regressão múltipla para estimativa dos atributos dos solos da área de estudo.**

a		Equação múltipla (22 bandas e 13 alturas, Sensor IRIS) <sup>(1a)</sup>	$r^2$ <sup>(2)</sup>
Argila	376,23728+(4092,67466*H3)+(10972*H7)+(1409,95843*H2)+(-25070*B11)+(23006*B16)+(-23085*H11) +(30702*B10)+(-19095*B17)+(8651,36527*H12)+(-2273,14097*H1)+(-4697,25743*B15)+(-6041,71261*B8)	0,8570	
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	92,36208 + (1213,86097*H3) + (-7576,03710*H11) + (2610,00589*H10) + (3890,10521*H12) + (1619,05064*H7) + (3342,92742*B7) + (-2264,96298*B11) + (-888,77054*H8) + (-1251,32151*B6)	0,8728	
Al_Fe <sup>(3)</sup>	1,29518 + (-13,66498*H2) + (21,74558*B1) + (-9,07322*H4) + (25,97556*H10) + (46,14417*H12)	0,8835	
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> <sup>(4)</sup>	110,81409 + (-9368,27072*H11) + (757,29756*H2) + (-3338,68863*H13) + (9490,32024*H12) + (-1005,39436*H8)	0,8254	
ki <sup>(5)</sup>	1,59767 + (-20,91352*H4) + (11,99758*H8) + (7,42979*B18) + (-25,59849*B2) + (9,96940*B10) + (-12,12550*H2)	0,4259	
kr <sup>(6)</sup>	0,88979 + (21,01051*H8) + (50,16260*H11) + (27,06973*H1) + (-29,90358*H5) + (-33,11525*H12) + (-1,40514*B19)	0,6787	
SiO <sub>2</sub> <sup>(7)</sup>	126,44349 + (1547,67871*H3) + (278,76155*H2) + (342,13833*B12) + (-837,78410*B21)	0,7205	
TiO <sub>2</sub> <sup>(8)</sup>	35,82973 + (-541,11648*H11) + (345,09118*H3) + (-505,30168*B21) + (229,06336*B12) + (-855,81924*H13) + (-199,65289*B3) + (400,56645*B8)	0,8751	
b		Equação múltipla ( 6 bandas TM-Landsat) <sup>(1b)</sup>	$r^2$ <sup>(2)</sup>
Argila	699,99540+(-13,44352*TM7)+(-12,69294*TM5)+(13,03814*TM2)	0,6140	
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> <sup>(3)</sup>	189,27590 + (2,91733*TM_3) + (-3,97853*TM_4) + (-6,95007*TM_7)	0,6783	
Al_Fe <sup>(4)</sup>	-0,27048 + (-0,27805*TM_1) + (0,10476*TM_5)	0,4799	
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> <sup>(5)</sup>	290,71175 + (12,04310*TM_1) + (-5,54129*TM_4) + (-10,24985*TM_7)	0,6724	
ki <sup>(6)</sup>	1,13241 + (0,05412*TM_4) + (-0,05408*TM_5) + (0,08867*TM_7)	0,3169	
kr <sup>(7)</sup>	0,17683 + (-0,11305*TM_1) + (0,03486*TM_4) + (0,04700*TM_7)	0,5390	
SiO <sub>2</sub> <sup>(8)</sup>	189,49259 + (-3,18311*TM_4) + (-4,94352*TM_7)	0,6531	
TiO <sub>2</sub> <sup>(9)</sup>	76,88838 + (2,71784*TM_1) + (-1,54095*TM_5) + (-1,34536*TM_7)	0,7210	

<sup>(1a)</sup> B1...B22; H1...H13, bandas e alturas selecionadas <sup>(1b)</sup> TM1, TM2, TM3, TM4, TM5 e TM7, Bandas do TM- Landsat-5 selecionadas <sup>(2)</sup> Significante a 0,01 % de probabilidade <sup>(3)</sup> Óxido de Alumínio <sup>(4)</sup> Relação Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> <sup>(5)</sup> Óxido de Ferro <sup>(6)</sup> Indicativo de estágio de intemperismo (SiO<sub>2</sub>/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) <sup>(7)</sup> Índice de estágio de intemperismo (SiO<sub>2</sub>/(Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> + Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>)) <sup>(8)</sup> Óxido de Silício <sup>(9)</sup> Óxido de Titânio