

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

**Sensoriamento remoto e sistema de informações geográficas na caracterização
de solos e quantificação de seus atributos**

José Geraldo de Abreu Sousa Junior

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

**Piracicaba
2005**

Livros Grátis

<http://www.livrosgratis.com.br>

Milhares de livros grátis para download.

José Geraldo de Abreu Sousa Junior
Engenheiro Agrônomo
Bacharel em Ciência da Computação

**Sensoriamento remoto e sistema de informações geográficas na caracterização de solos e
quantificação de seus atributos**

Orientador:
Prof. Dr. JOSÉ ALEXANDRE MELO DEMATTÊ

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

Piracicaba
2005

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

Sousa Junior, José Geraldo de Abreu

Sensoriamento remoto e sistema de informações geográficas na caracterização de solos e quantificação de seus atributos / José Geraldo de Abreu Sousa Junior. - - Piracicaba, 2005.

141 p. : il.

Dissertação (Mestrado) - - Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, 2005.

1. Levantamento do solo 2. Sensoriamento remoto 3. Sistema de informação geográfica
4. Solos 5. Variabilidade espacial I. Título

CDD 631.47

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

A Deus, pela vida, pela saúde e pela família com que me presenteou.

OFEREÇO

À minha mãe, Regina, que além de me conceder a maior das dádivas, a própria existência, presenteia-me com a benção de seu amor irrestrito e me acompanha tão próxima quanto possível em todos os instantes.

À minha irmã, Raquel, pelo carinho e atenção de sempre, cuja inteligência inerente, personalidade forte, exemplo de determinação e sucesso me servem de inspiração para continuar a buscar meus objetivos.

Ao meu irmão, Thiago, pela sua alegria contagiante, pela amizade e companheirismo, sempre me incentivando a seguir em frente, dando ajuda incondicional e apoio.

À querida Conceição, pelo carinho e apoio constante, durante toda minha vida.

Em especial, a um homem honesto, íntegro e trabalhador que será meu eterno exemplo de vida e que me orgulho em chamá-lo de Pai.

DEDICO.

AGRADECIMENTOS

Aos meus pais, de quem recebi o dom mais precioso – a vida. Não contentes em presentear-me apenas com ela, revestiram minha experiência com amor, carinho e dedicação, cultivaram na criança todos os valores que a transformaram em um adulto responsável e consciente. Abriram as portas do meu futuro iluminando o meu caminho com a luz mais brilhante que puderam encontrar, o estudo. Obrigado por tudo.

Ao meu orientador, José Alexandre Melo Demattê, pela amizade, pelo apoio e forma amiga de orientar, sempre me permitindo caminhar com as próprias pernas, porém sem faltar com o amparo e a orientação nos momentos de dúvida e dificuldades.

Ao Dr. Ivan Ribeiro e principalmente a Dra. Maria Amélia, pelo exemplo de determinação, humildade e pessoa forte que é, agradeço pelo entusiasmo, amizade e incentivos.

A Larissa, pelo companheirismo e pelo seu carinho nos momentos em que estivemos juntos.

Às minhas avós, Geraldo e Mariana, pelo enorme carinho e apoio.

À minha grande amiga, Aline Genú, pela amizade com que me brindou desde o início do curso, por partilhar sua experiência comigo e que muitas vezes deixou seus afazeres para me ajudar.

Ao amigo, Caio Fortes, pela amizade, incentivo, conselhos e companheirismo em todos os momentos.

Aos professores do curso de Pós-Graduação em Solos e Nutrição de Plantas, pelos ensinamentos transmitidos. Em especial ao professor Jorge de Castro Kiehl, pela ajuda e confiança a mim depositada.

À Comissão de Pós-Graduação do curso de Solos e Nutrição de Plantas da ESALQ/USP, pela oportunidade concedida, Prof. Dr. Álvaro Pires da Silva, Prof. Dr. Luís Reynaldo Ferracciú Alleoni e Prof. Dr. Pablo Vidal-Torrado.

Aos estagiários do laboratório de Sensoriamento Remoto, Matheus, Karen, Rodnei e Marco pela amizade e auxílio em várias etapas do meu trabalho.

A “turminha do corredor”, Adilson, Graziela, Gean, Camila e Dani, parceiros para todos os momentos e sempre dispostos em ir ao Marrom Glacê ou no Botequim. Agradeço pelos momentos de alegria, amizade e convivência.

Aos amigos do curso de pós-graduação, Cindy, Raquel, Angélica, Fernanda, Gilmar, Susian, Marcelo, Laércio (“Miserável”), Eros, Silvio Ferraz, Fernando Zambrosi, Karina e Carlos Eduardo, que contribuíram de uma forma ou de outra para concretização desse trabalho.

Aos alunos de graduação, Roberta, Cíntia e Rafael, pela amizade e companheirismo.

Aos amigos de Brasília, Sayão, Jáder e Mauro, que apesar da distância estiveram sempre me apoiando.

Aos Funcionários do Departamento de Solos da Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Jakeline, Karina, Flávia, Hudson, Anderson, João, Martinha, Sérgio, Nancy, Luís Silva, Dorival, Juruna e todos os outros, que de uma forma ou de outra sempre auxiliaram na condução do meu trabalho.

À Fundação de Amparo e Pesquisa do Estado de São Paulo – FAPESP, pelo auxílio financeiro através da concessão da bolsa.

Ao Grupo COSAN (Indústria e Comércio – Filial Serra), pela possibilidade de execução deste trabalho.

Ao Prof. Dr. Carlos Roberto de Souza Filho, do Instituto de Geociências da UNICAMP, pela imagem ASTER e auxílio no seu processamento.

Ao Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais – INPE, pela utilização do sensor FieldSpec, parte importante deste trabalho.

Agradeço sinceramente a todos e compartilho a realização e o mérito desta obra.

"Se um dia tiver que escolher entre o mundo e o amor... Lembre-se: se escolher o mundo ficará sem o amor, mas se escolher o amor, com ele conquistará o mundo."

Albert Einstein

SUMÁRIO

RESUMO	12
ABSTRACT	13
1 INTRODUÇÃO.....	14
Referências	16
2 COMPORTAMENTO ESPECTRAL DOS SOLOS NA PAISAGEM NOS NÍVEIS TERRESTRE (FIELDSPEC) E ORBITAL (ASTER).....	17
Resumo	17
Abstract.....	18
2.1 Introdução.....	19
2.2 Desenvolvimento	21
2.2.1 Revisão de literatura	21
2.2.1.1 Sensoriamento Remoto.....	21
2.2.1.2 Resolução espacial e espectral.....	22
2.2.1.3 Níveis de aquisição dos dados espectrais do solo.....	23
2.2.1.4 Comportamento Espectral do Solo	24
2.2.1.5 Principais Fatores que Influenciam os Dados Espectrais dos Solos.....	24
2.2.2 Materiais e Métodos	28
2.2.2.1 Descrição da área de estudo.....	28
2.2.2.2 Seqüência de trabalho – Procedimentos metodológicos	29
2.2.3 Resultados e Discussão.....	35
2.2.3.1 Caracterização química e granulométrica dos solos.....	35
2.2.3.2 Atributos do Solo vs Reflectância Terrestre (FieldSpec) e Orbital (ASTER).....	37
2.2.3.3 Classes de Solo vs Reflectância Terrestre e Orbital	40
2.2.3.4 Variação espectral em profundidade	41
2.2.3.5 Variação espectral ao longo de diferentes toposseqüências	42
2.3 Conclusões.....	44

3 MODELOS ESPECTRAIS TERRESTRES E ORBITAIS NA DETERMINAÇÃO DE TEORES DE ATRIBUTOS DOS SOLOS.....	66
Resumo	66
Abstract.....	67
3.1 Introdução.....	68
3.2 Desenvolvimento	70
3.2.1 Revisão de literatura	70
3.2.2 Materiais e Métodos	72
3.2.2.1 Descrição da área de estudo.....	72
3.2.2.2 Seqüência de trabalho – Procedimentos metodológicos	73
3.2.3 Resultados e Discussão.....	79
3.2.3.1 Características analíticas.....	79
3.2.3.2 Correlação entre os atributos do solo e reflectância obtidas por sensor terrestre (FieldSpec)	80
3.2.3.3 Correlação entre os atributos do solo e reflectância obtidas por sensor orbital (ASTER).....	81
3.2.3.4 Quantificação de solos por modelos espectrais obtidos por sensor de laboratório	83
3.2.3.5 Quantificação de solos por modelos espectrais obtidos por sensor de orbital.....	85
3.2.3.6 Análise de custo de análises de terra por meio do método convencional e espectroradiométrico	86
3.3 Conclusões.....	87
Referências	97
4 GEOPROCESSAMENTO NA CARACTERIZAÇÃO DE SOLOS DESENVOLVIDOS DE BASALTO E MATERIAL ARENÍTICO	103
Resumo	103
Abstract.....	104
4.1 Introdução.....	105
4.2 Desenvolvimento	106
4.2.1 Revisão de literatura	106
4.2.2 Materiais e Métodos	109
4.2.2.1 Descrição da área de estudo.....	109
4.2.2.2 Seqüência de trabalho – Procedimentos metodológicos	110

4.2.3 Resultados e Discussão.....	113
4.2.3.1 Distribuição dos Solos da Região.....	113
4.2.3.2 Relevo vs Classes de Solos.....	114
4.2.3.3 Declividade vs Classes de Solos.....	115
4.2.3.4 Classes de Solos vs Elevação	118
4.3 Conclusões.....	120
Referências	131
ANEXOS.....	135

RESUMO

SENSORIAMENTO REMOTO E SISTEMA DE INFORMAÇÕES GEOGRÁFICAS NA CARACTERIZAÇÃO DE SOLOS E QUANTIFICAÇÃO DE SEUS ATRIBUTOS

Com a crescente adoção da agricultura de precisão, há uma busca por informações mais detalhadas da variabilidade espacial dos solos em escalas que viabilizem um manejo diferenciado da área de produção. Entretanto, o custo das análises de solo é sem dúvida um dos principais entraves para obtenção dessas informações. A adoção do geoprocessamento, utilizando-se o sensoriamento remoto, GPS e sistemas de informações geográficas para caracterização de solos e quantificação de seus atributos, é um desafio que vem sendo buscado por vários pesquisadores por ser uma tecnologia alternativa de avaliação do solo, podendo ser mais barata, rápida e com menor impacto ambiental. Contudo, como qualquer tecnologia de ponta, ela deve ser devidamente testada e ajustada para os mais diversos tipos de solos e regiões. Para tanto, foram escolhidas áreas localizadas na região de São Carlos e Ibaté, São Paulo, tendo os seguintes objetivos: (i) caracterizar o comportamento espectral de solos por sensores terrestre (FieldSpec) e orbital (ASTER); (ii) determinar alterações no comportamento espectral dos solos ao longo de diferentes toposseqüências; (iii) gerar modelos de quantificação de atributos químicos e granulométricos dos solos a partir de sua radiação eletromagnética e (iv) caracterizar os solos da região conforme a altitude e declividade do terreno utilizando-se técnicas de sistema de informações geográficas. Para isso foram coletadas amostras no campo e realizado o mapeamento da área. As amostras foram avaliadas por diferentes sensores e correlacionou-se seus atributos com a reflectância. Desta forma, modelos espectrais de atributos dos solos foram elaborados. O mapa de solos elaborado foi cruzado com informações de declive e altitude para sua caracterização. Verificou-se que os atributos granulométricos e a matéria orgânica possuem uma grande influência no comportamento espectral dos solos. Verificou-se também, que solos localizados em cotas mais elevadas do relevo apresentam maior intensidade de reflectância do que os situados em posições inferiores, devido à variação do material de origem da referida região. As correlações entre os atributos e os dados espectrais do solo indicam uma tendência de aumentar o coeficiente de correlação em maiores comprimentos de onda. Os modelos elaborados para quantificação dos atributos granulométricos resultaram em valores estimados muito próximos dos determinados pelas análises convencionais (argila: $R^2 = 0,69$). Em escalas regionais há uma tendência de ocorrência de determinadas classes de solo em altitudes e declividades similares. Na área estudada, por exemplo, o Latossolo Amarelo foi encontrado predominantemente nas cotas mais altas (815-835 m) e em relevo plano (1-3 %). Conclui-se que a partir de informações de declividade e elevação da área, a extrapolação pedológica em locais sem apoio de campo deve ser feita com cautela.

Palavras-chave: Sensores; Modelo digital do terreno; Imagens de satélite; Mapeamento de solos

ABSTRACT

REMOTE SENSING AND GEOGRAPHIC INFORMATION SYSTEM FOR SOIL CHARACTERIZATION AND QUANTIFICATION OF IT ATTRIBUTES

With the increasing in adoption of precision agriculture, there is a need more detailed information about soil spatial variability in order to make possible a better management of crop fields. However, the cost of soil chemical analysis is the most important obstacle to obtain this information. The use of geoprocessing techniques, such as remote sensing, GPS and geographic information system, for soil characterization and quantification of their attributes is a challenge pursued for several researchers because it is an alternative technology for soil evaluation that can be cheaper, faster, and with lower environmental impact. Nevertheless, like any new technology, it must be tested and adjusted with different soil types located in different areas. For this research, two areas were chosen: São Carlos and Ibaté, São Paulo region, with the following objectives: (i) characterize the soil spectral response using terrestrial (FieldSpec) and orbital (ASTER) sensors; (ii) determine the changes on soil spectral response across different toposequences; (iii) generated models to quantify soil chemical and granulometric attributes based on its electromagnetic radiation and (iv) characterize the soil in conformity with altitude and slope using geographic information system techniques. Soil samples were collected and a soil map was developed. Soil samples were analyzed by both sensors and their attributes was correlated with spectral reflectance. Then spectral models were developed to quantify soil attributes. Soil map was crossed with declivity and elevation information for characterization. It was verified that the granulometric and organic matter attributes have a great influence on soil spectral response. It was verified that soils located in higher altitudes presented higher reflectance intensity than those located in lower positions due to the variation on parent material. The correlations between soil attributes and spectral data showed a tendency to increase the correlation coefficient at higher wavelengths. The models elaborated to quantify the granulometric attributes resulted in estimated values very close to the determined by conventional laboratory analysis (clay content: $R^2 = 0.69$). In regional scale there is a tendency of some soil classes occur at similar altitudes and slope. For example, the Typic Haplustox was found predominant at higher altitudes (815-835 m) and plan relief (1-3%). It was possible to conclude that based on information about slope and altitudes for this area, the pedologic extrapolation in new areas without field work should be done with caution.

Key words: Sensors; Digital elevation model; Satellite images; Soil mapping

1 INTRODUÇÃO

Um dos principais fatores a ser considerado em relação à sustentabilidade agro - ecológica é o solo. Ele é a base para a produção de alimentos e sua utilização vem aumentando gradativamente. Por outro lado, trata-se de um recurso natural não renovável a curto prazo e que encontra-se disponível em quantidade limitada, sendo necessários esforços para sua preservação. Para tanto, o conhecimento do solo na paisagem só é possível através de levantamentos pedológicos em escalas compatíveis com os objetivos.

A maioria dos estados brasileiros possui levantamentos de baixa expressão cartográfica, como os de reconhecimento de alta intensidade. Poucas áreas possuem levantamentos nos níveis detalhado ou semi-detalhado, os quais podem ser utilizados para projetos agropecuários mais específicos. Segundo Larach; Souza e Silveira (1981), os levantamentos de solos nos níveis semi-detalhado e detalhado correspondem a aproximadamente 0,25 % da área do País, no nível de reconhecimento 17,1 % e no exploratório 75,6 %.

Inúmeros fatores dificultam a realização dos mapeamentos dos solos, como aspectos políticos, econômicos e mão de obra especializada. A realização dos mapas pedológicos tem várias etapas, sendo uma das principais a análise de amostras de terra. Entretanto, o custo destas análises é sem dúvida um dos principais entraves. Estima-se que no Brasil o número de análises químicas de terra tenha atingido 1 milhão de amostras no ano de 2001, resultando em uma grande quantidade de reagentes gastos e resíduos produzidos (RAIJ et al., 2001), além da destinação inadequada deste material, alto custo e o tempo para obter os resultados.

Com o objetivo de reverter este quadro, pesquisadores têm optado em estudar técnicas não destrutivas de análises de solo, dentre elas, o sensoriamento remoto. Os sensores podem ser utilizados em diferentes posições como em terra ou em órbita, cada qual com suas vantagens e desvantagens. A utilização de imagens orbitais e/ou dados de sensores em geral, para o estudo de solos, é um desafio que vem sendo buscado por ser uma tecnologia alternativa para avaliação dos atributos do solo e que resulta em um menor impacto ambiental.

Atualmente, pesquisadores (DEMATTÊ, 2002; IPPOLITI et al., 2005; LACERDA et al., 2005) vêm estudando imagens de satélite e técnicas de geoprocessamento como uma ferramenta auxiliar no levantamento, classificação de solos e quantificação de seus atributos, principalmente imagens do sensor LANDSAT, que, no entanto, possui baixa resolução espectral (7 bandas).

Sensores mais novos como o ASTER (Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer), com quatorze bandas distribuídas nas faixas do visível, infravermelho próximo e infravermelho termal e os hiperespectrais, como o AVIRIS (Airborne Visible/Infrared Imaging Spectrometer) com 224 bandas podem trazer dados mais precisos. Portanto, é imprescindível maiores estudos que visem o desenvolvimento e aperfeiçoamento de metodologias para melhor utilização destes novos sensores.

Além das imagens de satélite outras informações vêm sendo utilizadas para auxiliar no mapeamento de solos na tentativa de tornar mais automático este processo. Dentre estes recursos, destacam-se os modelos digitais de elevação (MDE) e os mapas de declividade. O método de classificação das formas da paisagem baseado na geração de um MDE e no cálculo dos atributos do relevo (elevação, declividade e curvatura) mostra-se uma alternativa rápida e econômica em comparação ao delineamento manual a partir da utilização de análise estereoscópica de fotografias aéreas (IPPOLITI et al., 2005).

Algumas questões foram levantadas para o desenvolvimento deste trabalho:

- Teria o sensoriamento remoto, utilizando-se de dados de reflectância obtidos nos níveis laboratorial e orbital, condições de discriminar solos ao longo de uma encosta e quantificar seus atributos, auxiliando desta forma, os procedimentos adotados em levantamentos pedológicos?

- Um mesmo solo pode ocorrer em diferentes altitudes em uma mesma região?

As hipóteses testadas foram:

- A partir da energia eletromagnética refletida pelo solo pode-se identificar e estimar seus atributos, uma vez que cada solo, como indivíduo, apresenta atributos diferenciadores, quando interagem com a energia incidente.

- Classes de solos iguais podem ser encontradas em diferentes posições do relevo, porém, informações extraídas de um modelo digital de elevação aliadas as técnicas de sensoriamento remoto podem ajudar na identificação de diferentes solos numa paisagem.

Para tanto, o presente trabalho foi conduzido em uma área agrícola no estado de São Paulo, para avaliação espectral de solos, tendo como principais objetivos:

- Caracterização do comportamento espectral de solos por sensores terrestre (FieldSpec) e orbital (ASTER);
- Determinar alterações do comportamento espectral dos solos ao longo de diferentes toposseqüências;
- Elaborar modelos de quantificação dos atributos granulométricos e químicos dos solos utilizando-se dados espectrais obtidos por sensores terrestre (FieldSpec) e orbital (ASTER);
- Caracterizar os solos da região conforme a sua posição e declividade do terreno utilizando-se técnicas de sistema de informações geográficas.

Referências

- 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.
- IPPOLITI, R.G.A.; COSTA, L.M.; SHAEFER, C.E.G.R.; FERNANDES FILHO, E.I.; GAGGERO, M.R. Análise digital do terreno: ferramenta na identificação de pedoformas em microbacia na região de “Mar de Morros” (MG). **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 29, n. 2, p. 269-276, maio/abr. 2005.
- 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.
- LARACH, J.O.I.; SOUZA, J.L.R.; SILVEIRA, C.O. Levantamentos pedológicos no Brasil executados pelo SNLS – EMBRAPA. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SOLOS TROPICAIS EM ENGENHARIA, 1., 1981, Rio de Janeiro. **Anais...Rio de Janeiro: COPPE/UFRJ**, 1981, p. 13-29.
- RAIJ, B.van.; ANDRADE, J.C.; CANTARELLA, H.; QUAGGIO, J. A. **Análise química para avaliação da fertilidade de solos tropicais**. Campinas: Instituto Agrônomo, 2001. 285 p.

2 COMPORTAMENTO ESPECTRAL DOS SOLOS NA PAISAGEM NOS NÍVEIS TERRESTRE (FIELDSPEC) E ORBITAL (ASTER)

Resumo

Os índices de produção têm demonstrado para os agricultores que parte da sua variabilidade está associada, dentre outros fatores, com as características do solo e da paisagem. Desta forma, práticas de manejo, como a adubação, devem levar em consideração a variabilidade espacial do solo, tratando-o de maneira diferenciada ao longo da paisagem. Como os solos apresentam diferentes atributos e os mesmos podem ser identificados e em certos casos quantificados pela análise de sua resposta espectral, o sensoriamento remoto é uma tecnologia que pode fornecer de maneira rápida informações para o manejo da variabilidade da fertilidade e das classes de solos. Para poder quantificar os atributos do solo a partir de sua resposta espectral é necessário ter um bom entendimento das relações existentes entre seus componentes e sua radiação eletromagnética. Assim, este trabalho teve como objetivo avaliar o comportamento espectral de diferentes classes de solos ao longo de toposseqüências ocorrentes na região de São Carlos e Ibaté, São Paulo, conforme o teor de seus atributos e em diferentes níveis de aquisição dos dados (terrestre e orbital). Amostras de terra foram coletadas no campo e georreferenciadas em diferentes toposseqüências. As amostras foram analisadas quimicamente e granulométricamente. Leituras espectrais foram realizadas utilizando espectrorradiômetro em laboratório com sensor FieldSpec (450 – 2.500 nm). Os mesmos locais no campo foram avaliados em imagem de satélite (sensor ASTER), na qual foi feita correção atmosférica e transformada para reflectância. A partir dos resultados obtidos pode-se concluir que, (i) os atributos, areia grossa, argila, matéria orgânica e a cor obtiveram relação clara com a variação de reflectância dos solos; (ii) o aumento da concentração de matéria orgânica e argila no solo resultam na diminuição da intensidade de reflectância do solo e o aumento da concentração de areia no aumento de sua intensidade de reflectância (iii) o Neossolo Quartzarênico foi o solo que melhor diferenciou das outras classes pelo seu comportamento espectral, para ambos os sensores; (iv) ao longo de uma vertente ocorre variação nos dados espectrais dos solos; (v) o comportamento espectral de um solo em profundidade no perfil está relacionada, principalmente com o teor de matéria orgânica e a mudança textural ao longo do perfil e (vi) solos localizados em cotas mais elevadas do relevo apresentam maior intensidade de reflectância do que os situados em posições inferiores, devido ao aumento do teor de argila nas cotas mais baixas e variação do material de origem. As informações espectrais podem auxiliar futuros mapeamentos de solos.

Palavras Chaves: Variabilidade espacial do solo; Comportamento espectral; Sensores; Mapa de solos

SOIL SPECTRAL RESPONSE IN THE LANDSCAPE AT TERRESTRIAL (FIELDSPEC) AND ORBITAL (ASTER) LEVELS

Abstract

The crop production parameters are showing to farmers that part of field variability is associated with soil and landscape characteristics. Field practices, such as fertilizer application, should take into account the soil spatial variability, treating the soil in a different way across the landscape. The soils present different attributes that can be identified, and in some cases, quantified through its spectral response. Remote sensing is a technology that can provide in a faster way information to manage soil fertility and soil classes variability. Thus, the understanding of the relationship between soil attributes and their electromagnetic radiation is necessary. The objective of this work was to evaluate the spectral response of different soils across toposequences that occur in the region of São Carlos, São Paulo and Ibaté, SP, according to their attributes and the different levels of data acquisition (terrestrial and orbital). Soil samples were collected and georeferenced in different toposequences and had their chemical and granulometric attributes analyzed. Spectral responses were obtained using a spectroradiometer in laboratory FieldSpec (450-2500 nm). The same location was evaluated with satellite image, (ASTER sensor), in which was done an atmospheric correction and transformed to reflectance. Conclusions are: (i) coarse sand, clay, organic matter, and color showed strong correlation with soil reflectance; (ii) organic matter and clay content increased resulted in a reflectance decrease and the sand content increase in a reflectance increase; (iii) the Typic Quartzipsamment was the soil with better differentiation among the other soil classes based on its spectral response, for both sensors; (iv) variation in the soil spectral data occur across the toposequences; (v) the soil spectral response within the soil profile was related with organic matter content and texture alteration; and (vi) soils located in higher altitudes showed higher reflectance than those at lower positions due to the clay content increase at this altitude. Spectral data can assist future soil mapping activities.

Key words: Soil spatial variability; Spectral response; Sensors; Soil mapping

2.1 Introdução

Os índices de produção têm demonstrado para os agricultores que parte da sua variabilidade está associada, dentre outros fatores, com as características do solo e da paisagem. As alterações do solo ao longo da paisagem juntamente com o manejo empregado conduzem a mudanças nas suas propriedades e características que, por sua vez, resultam em variações na produtividade agrícola. Algumas dessas alterações influenciam na redução da retenção da água, no aumento da densidade do solo, nas variações dos teores de matéria orgânica, do pH, dos níveis de fertilidade e na profundidade do solo. Estes atributos são complexos e variam temporal e espacialmente dentro dos campos de produção.

O uso de fertilizantes é, sem dúvida, um dos maiores custos na produção agrícola. Devido a isso, a determinação da melhor relação custo-benefício na utilização dos insumos é de grande importância (BULLOCK; BRISCO; HIROSE, 2000). Paralelamente à crescente adoção da agricultura de precisão (AP) pelos produtores, ocorreu o surgimento de novas tecnologias de aplicação de insumos à taxa variada, gerando a necessidade de quantificar estas variações com boa resolução espacial. Interpolações estatísticas entre os pontos de amostragem sobre um *grid* foram utilizadas no passado, no entanto, esta aplicação não é sempre possível devido ao tempo e custo associado às amostragens (BARNES et al., 2003).

Com o objetivo de acelerar o processo de caracterização do solo pode-se utilizar o sensoriamento remoto. Neste caso é avaliado o seu comportamento ou assinatura espectral, que depende diretamente de sua composição química, física, biológica e mineralógica, sendo que os principais constituintes que afetam seu comportamento espectral são a matéria orgânica (DALMOLIN, 2002; DEMATTÊ; EIPHANIO; FORMAGGIO, 2003) e os óxidos de ferro (DEMATTÊ; EIPHANIO; FORMAGGIO, 2003; MADEIRA NETTO, 1991; STONER; DERKSEN; MACEDO, 1991). Fatores como a mineralogia da fração argila (CHABRILLAT et al., 2002; DRURY, 2001; HOUSSA; PION; YESOU, 1996), o tamanho da partícula (COLEMAN et al., 1991; DRURY, 2001; MENESES; MADEIRA NETTO, 2001; STONER, 1979), a rugosidade e a umidade do solo (HUMMEL; SUDDUTH; HOLLINGER, 2001; MULLER; DÉCAMPS, 2001; STONER; BAUMGARDNER, 1981) também são importantes.

Neste sentido, o sensoriamento remoto fornece valiosas informações para o manejo da variabilidade da fertilidade e das classes de solos, como base na implantação da agricultura de precisão (DALMOLIN et al., 2005).

Informações espectrais do solo e outros alvos podem ser obtidas em três níveis: (i) terrestre, utilizando sensores no campo ou em laboratório; (ii) aéreas, utilizando sensores a bordo de aeronaves e (iii) orbital, que utiliza sensores a bordo de satélites. A utilização de um sensor ou de outro, em determinado nível de coleta de informações espectrais, depende sobretudo de fatores relacionados ao objetivo da pesquisa, tamanho da área imageada, disponibilidade do equipamento, custo e precisão desejada (BEN-DOR; IRONS; EPEMA, 1999; MOREIRA, 2003). Os sensores de laboratório geralmente apresentam alta resolução espectral podendo ser muito mais detalhados do que os colocados em órbita. A aquisição de dados espectrais do solo em laboratório é realizada sob condições controladas, não sofrendo interferências atmosféricas e alterações de iluminação. Os dados de laboratório permitem compreender os princípios físicos e químicos da reflectância do solo e são os principais responsáveis pela obtenção dos padrões espectrais “puros” dos solos, para posterior validação por sensores orbitais (BEN-DOR; IRONS; EPEMA, 1999).

Segundo Galvão (1994), a base de dados espectrorradiométricos obtidos em laboratório torna-se mais importante quando os mesmos são utilizados para análise de imagens de satélite de alta resolução espectral, que são capazes de amostrar o espectro eletromagnético em bandas estreitas e contínuas.

Para poder quantificar os atributos do solo a partir de sua resposta espectral é necessário ter um bom entendimento das relações existentes entre seus componentes e sua radiação eletromagnética. Desta forma, vários trabalhos vêm sendo desenvolvidos nesta linha de pesquisa, porém, como o solo é um corpo complexo que apresenta uma grande variabilidade de seus constituintes, é preciso mais informações que elucidem cada vez com mais exatidão sua interação com a radiação eletromagnética. Espera-se que partir da energia eletromagnética refletida possa-se diferenciar as classes de solo, uma vez que cada uma delas, como indivíduo, apresenta atributos diferenciadores, que por sua vez, podem alterar a energia eletromagnética refletida. Portanto, o presente trabalho teve como objetivo avaliar o comportamento espectral de diferentes classes de solos da região de São Carlos e Ibaté, SP, conforme a posição na paisagem e o teor de

seus atributos em diferentes níveis de aquisição dos dados, terrestre (sensor FieldSpec) e orbital (ASTER).

2.2 Desenvolvimento

2.2.1 Revisão de literatura

2.2.1.1 Sensoriamento Remoto

O Sensoriamento Remoto pode ser definido como a técnica baseada na obtenção de dados sobre um objeto sem que haja contato físico direto entre o sensor e o alvo. Para que tal fenômeno ocorra é necessário que a energia seja transmitida sob a forma de radiação eletromagnética (REM) (SABINS, 2000).

A quantidade de energia refletida por um objeto, no caso o solo, é função de três fatores: (i) a energia eletromagnética incidente, que pode ser proveniente do sol ou uma lâmpada; (ii) a quantidade de energia absorvida e (iii) a quantidade de energia transmitida (STONER; BAUMGARDNER, 1986). Esta relação pode ser expressa como $R\lambda = I\lambda - (A\lambda + T\lambda)$, onde R é a reflectância em um determinado comprimento de onda (λ), I é a energia incidente, A é a energia absorvida e T é a energia transmitida. A quantidade de radiação refletida (radiância) comparada com a quantidade incidente (irradiância) sobre o solo fornece a medida de reflectância captada por sensores, denominados radiômetros ou espectrorradiômetros.

Estes sensores decompõem a radiação incidente em diferentes comprimentos de onda (os espectrorradiômetros diferem dos radiômetros por operarem em faixas espectrais estreitas) sendo que a intensidade relativa de energia refletida pelo objeto pode ser medida de uma maneira contínua ao longo do espectro eletromagnético (NOVO, 1992), fornecendo um conjunto de dados numéricos ou gráficos conhecidos como curvas ou assinaturas espectrais.

Os sistemas de sensoriamento remoto detectam e convertem a energia eletromagnética proveniente dos objetos da superfície terrestre em um comprimento de onda característico e particular. Em decorrência das condições de terreno, ocorrem variações na intensidade de radiação eletromagnética que são comumente manifestadas pela variação de brilho e luminância sobre as imagens (SABINS, 2000).

O espectro eletromagnético é a distribuição da radiação em um contínuo, que se estende desde os raios gama (curto comprimento de onda, menor que 0,03 nm) até as ondas de rádio (longo comprimento de onda, maior que 100 cm) (Figura 1).

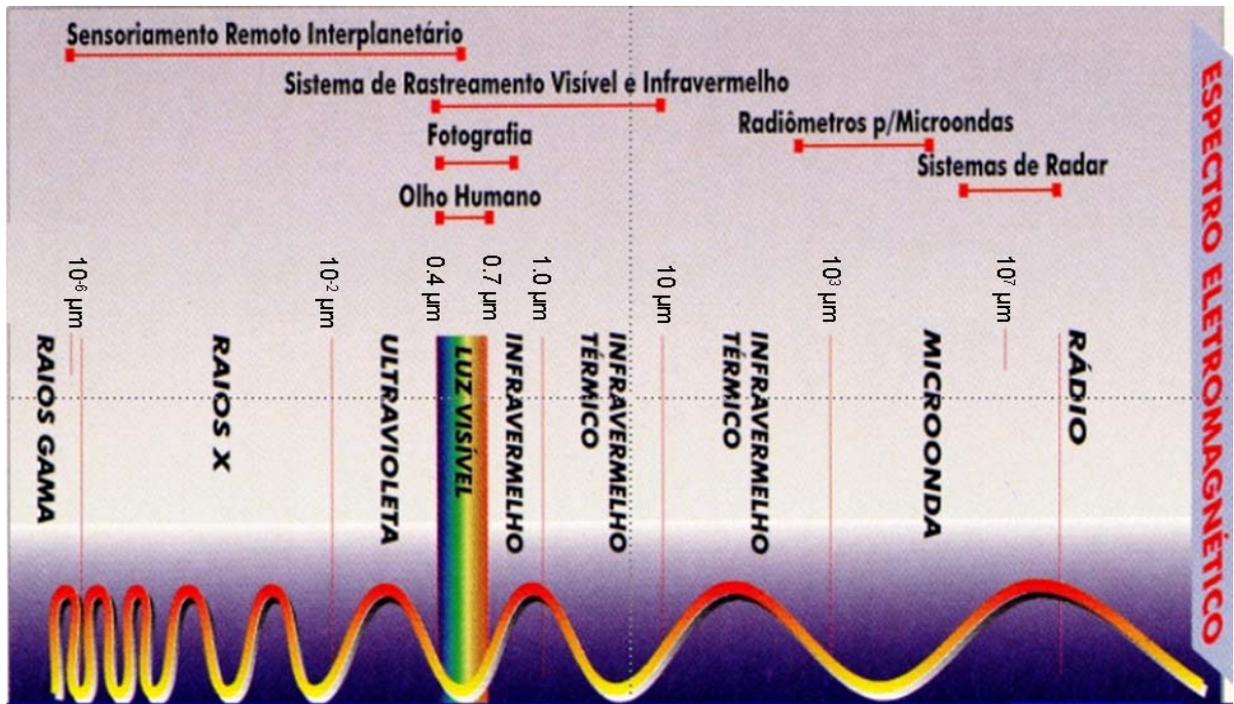


Figura 1 - Espectro eletromagnético
 Fonte: adaptado de Meneses e Madeira Netto (2001)

2.2.1.2 Resolução espacial e espectral

Resolução é uma medida da habilidade que um sistema sensor possui de distinguir entre respostas que são semelhantes espectralmente ou próximas espacialmente. Resolução espectral é a quantidade e a largura dos intervalos de comprimentos de onda do espectro eletromagnético medida pelo sistema sensor. Os sensores são sensíveis a determinados intervalos de comprimentos de onda ou bandas do espectro eletromagnético (SABINS, 2000). Quanto maior o número de canais e mais estreitos os intervalos de comprimento de onda, melhor será a resolução espectral e mais precisas e completas serão as informações obtidas.

Segundo Sabins (2000), cada sensor é projetado para fornecer dados a um determinado nível de detalhes espaciais. Quanto menor o objeto possível de ser identificado, maior o poder de resolução espacial. A resolução espacial pode ser definida como a habilidade que um sensor possui de distinguir objetos que são próximos espacialmente.

Os satélites atualmente utilizados para os estudos urbanos apresentam resolução espacial que variam de valores de 30 m, no modo multiespectral do LANDSAT ETM +, a 0,61 m modo pancromático da plataforma Quickbird.

O satélite TERRA foi lançado em 18 de dezembro de 1999 como parte do programa Earth Observing System (EOS), da NASA. A bordo deste satélite estão os sensores MODIS, ASTER, CERES, MISR e MOPITT (NASA, 2005).

O sensor ASTER tem como principal vantagem sua alta resolução espacial (15 m no visível). (ABRAMS; HOOK; RAMACHANDRAN, 2002). Este sensor cobre uma ampla região espectral, com 14 faixas, que vai do visível até o infravermelho termal (Tabela 1), sendo que a resolução espacial varia com o comprimento de onda, 15 m no visível e infravermelho próximo (VNIR), 30 m no infravermelho de ondas curtas (SWIR) e 90 m no infravermelho termal (TIR) (HOOK et al., 2001). Está a uma altitude de cerca de 705 km e cada cena obtida cobre uma área de 60 x 60 km. É utilizado principalmente no monitoramento ambiental e suas imagens apresentam uma série de aplicações em relação ao uso e ocupação da terra (ZHU; BLUMBERG, 2002).

Tabela 1 - Resolução espectral e espacial das oito primeiras bandas do sensor ASTER

Banda	Comprimento de onda (μm)	Resolução. Espacial (m x m)
Banda 1 (visível)	0,52 - 0,60	15
Banda 2 (visível)	0,63 - 0,69	15
Banda 3 (NIR)	0,76 - 0,86	15
Banda 4 (SWIR)	1,60 - 1,70	30
Banda 5 (SWIR)	2,14 - 2,18	30
Banda 6 (SWIR)	2,18 - 2,22	30
Banda 7 (SWIR)	2,23 - 2,28	30
Banda 8 (SWIR)	2,29 - 2,36	30
Banda 9 (SWIR)	2,36 - 2,43	30

Fonte: NASA (2005)

2.2.1.3 Níveis de aquisição dos dados espectrais do solo

Informações espectrais do solo e outros alvos podem ser obtidas em três níveis: (i) terrestre, utilizando sensores no campo ou em laboratório; (ii) aéreas, utilizando sensores a bordo de aeronaves e (iii) orbital, que utiliza sensores a bordo de satélites. Os sensores de laboratório

apresentam alta resolução espectral podendo ser muito mais detalhados do que os colocados em órbita. Os sensores terrestres são os principais responsáveis pela obtenção dos padrões espectrais “puros” dos solos, para posterior validação por sensores orbitais (HUETE; ESCADAFAL, 1991).

Segundo Galvão (1994), a base de dados espectrorradiométricos obtidos em laboratório torna-se mais importante quando os mesmos são utilizados para análise de imagens de satélite de alta resolução espectral, que são capazes de amostrar o espectro eletromagnético em bandas estreitas e contínuas.

2.2.1.4 Comportamento Espectral do Solo

A medida dos valores de reflectância de um corpo ou alvo ao longo do espectro eletromagnético é definida como o seu comportamento espectral e diferentes alvos apresentam respostas espectrais características, podendo ser identificados na natureza (SABINS, 2000).

Segundo Stoner e Baumgardner (1981), a reflectância do solo é uma propriedade cumulativa derivada do comportamento espectral inerente da combinação heterogênea de seus componentes, tais como, tamanho de partícula, estrutura do solo, rugosidade superficial, umidade, porcentagem de matéria orgânica, quantidade de minerais carbonatados, presença ou não de quartzo e óxidos de ferro.

De acordo com Epiphany et al. (1992), o comportamento espectral do solo é afetado por diversos fatores dentre os quais destacam-se: a cor, as classes dos solos, o teor de matéria orgânica, o teor de óxidos de ferro, a composição mineralógica, o teor de umidade e a granulometria. O aspecto mais complexo no estudo e compreensão do comportamento espectral do solo é que em laboratório nós podemos isolar esses componentes e estudar seu efeito sobre a resposta espectral do mesmo. Mas na natureza esses componentes encontram-se fortemente relacionados, uma vez reforçando o efeito de um sobre o outro, outra vez anulando.

2.2.1.5 Principais Fatores que Influenciam os Dados Espectrais dos Solos

Os dados obtidos pelos sensores podem ser expressos na forma de curvas de reflectância espectral. Geralmente estas curvas abrangem a região do espectro eletromagnético, isto é, de 400 a 2.500 nm. Estas curvas retratam feições típicas ou bandas de absorção, devido à interação dos

átomos ou moléculas dos diferentes constituintes do solo com a radiação eletromagnética em comprimentos de ondas específicos (DALMOLIN et al., 2005). Como cada solo apresenta uma diferente constituição a respectiva curva espectral terá diferentes bandas de absorção, efeito da resposta espectral dos fatores supracitados.

Matéria Orgânica

A matéria orgânica influencia na forma e no albedo da curva espectral ao longo de todo o espectro eletromagnético sendo que, na literatura, diferentes intervalos espectrais são utilizados em algoritmos para prever seu teor no solo. Bowers e Hanks (1965) demonstraram que, ao longo de todo espectro, a reflectância foi superior nas amostras onde a matéria orgânica foi eliminada previamente com peróxido de hidrogênio (H_2O_2). O mesmo comportamento foi observado por Al-Abbas; Swain e Baumgardner (1972), Dalmolin (2002) e Demattê e Garcia (1999), que observaram aumento na resposta espectral dos solos quando houve decréscimo no teor de matéria orgânica. A matéria orgânica pode ainda exercer efeito de máscara diminuindo as feições de absorção de outros constituintes do solo. Teores superiores a 17 g kg^{-1} de matéria orgânica no solo obliteram o efeito dos óxidos de ferro na reflectância e na cor, sendo mais forte este efeito na região do visível. O decréscimo no conteúdo de matéria orgânica acentua as fortes relações entre a reflectância e o ferro total, favorecendo o aparecimento de uma banda de absorção bem definida ao redor de 900 nm (BAUMGARDNER et al., 1970; DEMATTÊ; GARCIA, 1999; GALVÃO; VITORELLO, 1998). A seleção das bandas do espectro óptico para predição da matéria orgânica no solo é muito variável, podendo ser fixadas de acordo com o conjunto de bandas disponíveis para cada sensor em particular (HENDERSON et al., 1989).

Krishman et al. (1980), ao estudarem a reflectância espectral de solos para identificar comprimentos de onda mais adequados para prever o conteúdo de matéria orgânica do solo, concluíram que a região do visível (623 e 564 nm) proporcionou as melhores informações. Por outro lado, Coleman e Montgomery (1987), usando um radiômetro portátil de campo constataram que com o aumento da umidade e dos teores de matéria orgânica no solo ocorreu um decréscimo na reflectância espectral em todos comprimentos de onda estudados, sendo a região de 760 a 900 nm a mais importante para prever o conteúdo de matéria orgânica no solo. Posteriormente, Coleman et al. (1991), também com um radiômetro de campo, coletaram dados de reflectância em oito comprimentos de onda coincidentes com as bandas do sensor Thematic Mapper (TM) do

satélite LANDSAT. Estes autores concluíram que o conteúdo de matéria orgânica do solo foi melhor estimado usando as bandas 2 (520 a 600 nm - verde), 5 e 7 (1.550 a 1.750 e 2.080 a 2.350 nm - infravermelho médio) e 6 (10.400 a 12.500 nm - infravermelho termal). Stoner (1979), baseado em resultados estatísticos e na avaliação quantitativa da reflectância do solo e características de absorção, observou que a faixa de 520 a 620 nm foi a que teve maior correlação com o teor de matéria orgânica do solo.

Além do teor, os componentes da matéria orgânica também afetam o comportamento espectral dos solos. Solos orgânicos com material sáprico, altamente decomposto, têm baixa reflectância na região de 500 a 2.300 nm se comparado com material hêmico, moderadamente decomposto. Já o material fibrico, ligeiramente decomposto, apresenta reflectância elevada, principalmente na região do infravermelho próximo (STONER, 1979), (Figura 2).

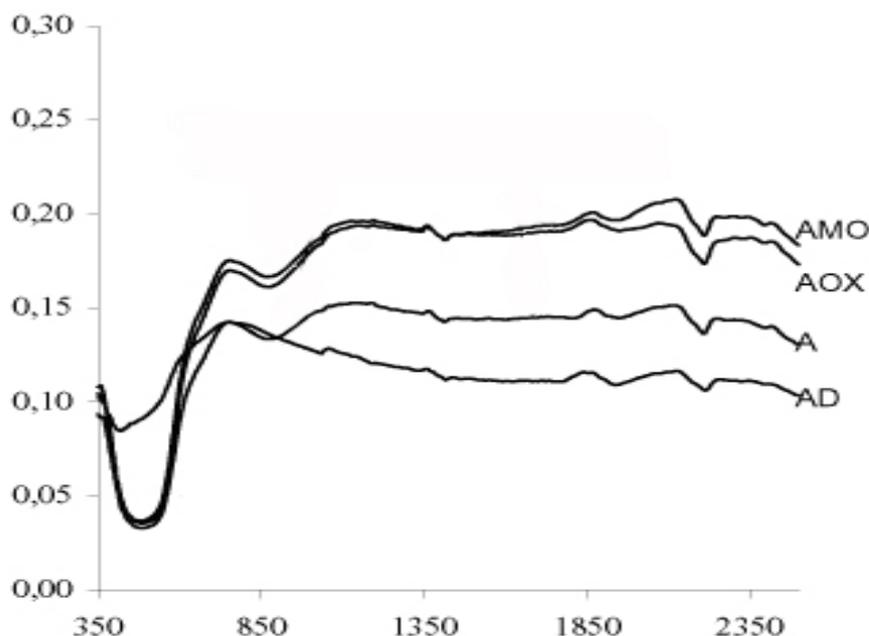


Figura 2 - Comportamento espectral de solos com remoção: da matéria orgânica (AMO); do ferro cristalino e amorfo (AD); do ferro amorfo (AOX). E a testemunha Latossolo Vermelho eutroférico (A). Fonte: Demattê; Epiphanyo; Formaggio (2003)

Óxidos de Ferro

As diferentes cores dos óxidos de ferro são devidas à absorção seletiva da luz na região do visível, causada pela transição dos elétrons nas camadas orbitais. Desta forma, a presença de óxidos de ferro nos solos influencia seu comportamento espectral. Várias feições na curva espectral são atribuídas à presença de ferro, sendo que os minerais hematita e goethita mostram transições eletrônicas no espectro em 530 nm e 480 nm respectivamente (SHERMAN; WAITE,

1985). A goethita apresenta maior reflectância que a hematita (KOSMAS et al., 1984; VITORELLO; GALVÃO, 1996), sendo que a presença destes óxidos de ferro no solo influencia o comportamento da curva espectral principalmente na região do visível e infravermelho próximo (DEMATTE; GARCIA, 1999; MONTGOMERY, 1976), no infravermelho médio (STONER, 1979) diminuindo o albedo conforme aumenta seu teor no solo. Os óxidos de ferro também apresentam feições típicas, principalmente na região de 900 nm, que são mais intensas quanto maiores forem seus teores no solo (Figura 2).

Avaliando duas classes de Latossolos, Stoner; Derksen e Macedo (1991) observaram bandas de absorção atribuídas aos óxidos de ferro em diferentes comprimentos de onda do espectro óptico, principalmente nas regiões de 400 a 550 nm, 650 nm e 850 nm. A maior diferença nos espectros destes solos ocorreu na faixa inferior a 550 nm, devido ao predomínio de hematita no solo deixando-o opaco, ou seja, com elevado poder de absorção de luz. Os óxidos de ferro também podem ter efeito de máscara sobre outros constituintes do solo. Stoner e Baumgardner (1981) relatam que teores de óxidos de ferro maiores que 40 g kg^{-1} podem mascarar o efeito da matéria orgânica.

Argilominerais

O conhecimento da composição mineralógica é essencial para avaliar o comportamento espectral dos solos, devido às várias feições de absorção e a influência no albedo que os mesmos conferem as curvas espectrais. Conforme Mathews; Cunningham e Petersen (1973), o tipo de argilomineral presente na amostra influencia a reflectância na faixa de 500 a 2.500 nm. As bandas de absorção em 1.400 e 1.900 nm são atribuídas à vibração molecular dos grupos OH^- da água adsorvida aos argilominerais (HUNT, 1979; LINDBERG; SNYDER, 1972), e a absorção no comprimento de onda de 2265 nm é devido a presença da gibbsita (HUNT; SALISBURY; LENHOFF, 1971). Na curva espectral da caulinita, a forte absorção ocorrida na região de 2.200 nm é indicativa da influência da hidroxila estrutural. A illita mostrou baixa reflectância para comprimentos de onda menores que 1.700 nm, além de baixa intensidade de absorção nas bandas de água e hidroxila, quando comparadas com as amostras de caulinita e nontronita.

Umidade

Em relação à umidade, os solos se tornam mais escuros quanto maior for a umidade, ocasionando uma diminuição na reflectância do mesmo ao longo do espectro eletromagnético (HUMMEL; SUDDUTH; HOLLINGER, 2001; MULLER; DÉCAMPS, 2001; STONER; BAUMGARDNER, 1981). De maneira geral, não ocorrem alterações significativas na forma das curvas espectrais em função da alteração da umidade, com exceção das bandas típicas de absorção de água nas regiões de 1.400 e 1.900 nm.

Assim, as bandas de absorção que ocorrem ao longo do espectro eletromagnético constituem feições diagnósticas que podem ser usadas para identificar diferentes minerais do solo como óxidos de ferro (MENESES; MADEIRA NETTO, 2001) e argilominerais (CHABRILLAT et al., 2002; DRURY, 2001; HOUSSA; PION; YESOU, 1996).

2.2.2 Materiais e Métodos

2.2.2.1 Descrição da área de estudo

A área localiza-se no Estado de São Paulo, nos municípios de Ibaté e São Carlos. É delimitada pelas coordenadas geográficas 21°46' 55'' S / 48° 09' 42'' W e 22° 10' 08'' S / 47° 48' 33'' W (Anexos). Apresenta aproximadamente 16.000 ha cultivados com cana-de-açúcar em altitudes variando de 500 a 950 m do nível médio do mar. O clima da região, segundo Köppen, é do tipo Cwb (temperado com inverno seco), precipitação e temperatura média anual de 1000 a 1.800 mm e 20° C, respectivamente (ICMC, 2005).

A litologia é representada principalmente pelas formações Serra Geral, Botucatu e Pirambóia (Grupo São Bento) e Cobertura da Serra de Santana e Similares (Grupo Taubaté). As rochas da Formação Serra Geral são vulcânicas de derrames basálticos; a Formação Botucatu são arenitos eólicos; Formação Pirambóia constituídos de arenitos oriundos de depósitos fluviais e de planícies de inundação (BISTRICHI et al., 1981) (Anexos). A vegetação primitiva está representada predominantemente por Cerrados e Cerradões, e por matas nas áreas onde os solos são argilosos e mais férteis.

Os principais solos que ocorrem na região são o Latossolo Vermelho e Vermelho Amarelo, Nitossolo Vermelho, Argissolo Vermelho e Neossolo Litólico (OLIVEIRA, 1981a, b, 1982; OLIVEIRA et al., 1999) (Anexos) conforme classificação da Embrapa (1999).

2.2.2.2 Seqüência de trabalho – Procedimentos metodológicos

A seqüência de trabalho é a seguir descrita.

Fase 1. Desenvolvimento da base de campo e do banco de dados

(a) Para ter uma representatividade dos solos da região foi elaborado um mapa pedológico semi-detalhado de acordo com Embrapa (1995). Além disso, para melhor detalhamento, foram compiladas informações de mapas pré-existentes como as cartas semi-detalhadas de Descalvado (OLIVEIRA, 1982), Brotas (OLIVEIRA, 1981a) e São Carlos (OLIVEIRA, 1981b) escala de publicação 1:100.000, mapa de reconhecimento de solos do Estado de São Paulo (OLIVEIRA et al., 1999) escala de publicação 1:500.000, carta planialtimétrica da região, com curvas de nível intercaladas de 5 em 5 metros (Anexos), e o mapa geológico de São Paulo (BISTRICHI et al., 1981) escala de publicação 1:500.000.

(b) Foi realizada fotointerpretação em fotografias aéreas escala 1:25.000, para visualização da rede de drenagem como auxílio na delimitação das paisagens. Foram alocados pontos para observação no campo pelo método da transeção (topossequências), tendo por objetivo identificar os limites de solos. Foram amostrados 319 pontos com trado em três profundidades 0-20, 40-60 e 80-100 cm, designadas de Camadas A, B e C, respectivamente (Anexos).

(c) As amostras foram analisadas quimicamente para determinar: pH (CaCl_2 , H_2O e KCl), teor de matéria orgânica, fósforo, potássio, magnésio, cálcio, alumínio e hidrogênio mais alumínio, segundo metodologia descrita em Raij et al. (2001) e, granulométricamente para determinar os teores de areia (grossa e fina), silte e argila (CAMARGO; KLANT; KAUFFMAN, 1987). De posse destes resultados foram estabelecidos os limites reais entre as unidades de solos ao longo das topossequências. A classificação dos solos foi realizada seguindo os critérios estipulados pelo Sistema Brasileiro de Classificação de Solos (EMBRAPA, 1999). A cor do solo foi obtida úmida com colorímetro Minolta CR 300 para cor de Munsell, assim como em Campos; Demattê e Quartaroli (2003). Na determinação das cores pelo colorímetro temos matizes com valores

decimais e contínuos, por isso foram determinados matizes intermediários para classificação dos solos, onde matizes mais amarelas que 6.2YR foram consideradas amarelas, matizes mais vermelhas que 6.2YR e mais amarela que 3.7YR foram consideradas vermelho-amarelas e por fim, matizes mais vermelhas que 3.7YR considerou-se vermelha.

(d) Foi montado um banco de dados com informações do local como os limites dos solos de acordo com cartas semi-detalhadas e de reconhecimento de solos, hidrografia, imagem de satélite, pontos de amostragens, rios, curvas de nível, estradas e geologia. Associados aos pontos de tradagens foram incluídos os resultados das análises de terra em ambiente de Sistema de Informações Geográficas, SIG (ESRI, 2000).

(e) A partir dos resultados das análises dos solos, das observações de campo e todo conjunto de informações da região, foram demarcados 12 perfis, nos quais foram realizadas a descrição morfológica de acordo com Lemos e Santos (1996) e definidas as unidades taxonômicas para finalmente elaborar o mapa semi-detalhado pelo método convencional, e servir de base para este estudo.

Fase 2. Coleta de dados espectrais níveis, orbital (ASTER) e terrestre (FieldSpec)

(a) A coleta de dados espectrais foi feita em dois níveis, sensor terrestre FieldSpec (HATCHELL, 1999) e sensor orbital ASTER (Anexos).

(b) No nível orbital, foi utilizada uma cena do sensor ASTER (satélite TERRA), data de aquisição 05/09/2003 (ID: ASTL1B.003:2005566405) utilizando-se as bandas de 1 a 8, sendo (em nm): B1: 520-600, B2: 630-690, B3: 760-860, B4: 1.600-1.700, B5: 2.145-2.185, B6: 2.185-2.225, B7: 2.235-2.285 e B8: 2.295-2.365.

Conforme descrito por Epiphanyo e Formaggio (1988), a análise quantitativa de imagens digitais sobre o comportamento espectral de alvos deve ser feita com os dados em reflectância, por ser uma grandeza física intrínseca dos alvos, ao passo que os números digitais são valores transformados para a obtenção das imagens orbitais. Os valores de níveis de cinza devem ser

transformados em reflectância e devidamente ajustados aos efeitos atmosféricos e posteriormente os números digitais convertidos em valores de reflectância real. Para tanto, foi utilizado o programa Atmospheric Correction Now - ACORN (AIG, 2001). Após o processo de conversão e correção, o nível de cinza zero presente na imagem passou a corresponder à reflectância 0 % e o nível de cinza 10.000, à reflectância 100 %.

Para adequar o posicionamento da imagem com a verdade de campo, a correção geométrica se faz necessária. Dessa forma, foram coletados pontos de controle na região de abrangência da área de estudo com um GPS Trimble PRO-XR, submétrico e pós-processado, de acordo com procedimentos descritos por Crósta (1992). Objetivando manter o valor do pixel o mais semelhante possível ao seu original, utilizou-se o método de interpolação do vizinho mais próximo, corrigindo apenas as distorções de escala, deslocamento ou rotação existentes entre a imagem e a projeção terrestre (CRÓSTA, 1992). A correção geométrica foi realizada no programa Environment for Visualizing Images – ENVI (RSI, 2004). O sistema de projeção e o Datum utilizados para localização e georreferenciamento foram UTM e SAD-1969, respectivamente.

Em locais de solo exposto nas imagens de satélite, foram extraídos os valores de reflectância de cada pixel ao longo das toposequências pré-estabelecidas. Nos pontos de amostragem locados foram avaliadas suas informações espectrais orbital (imagem). O procedimento de coleta espectral seguiu metodologia descrita por Demattê et al. (2000).

(c) Para obtenção dos dados espectrais de laboratório, foi utilizado o sensor hiperespectral, FieldSpec Spectroradiometer (HATCHELL, 1999), que recobre a faixa espectral entre 450 e 2.500 nm com resolução espectral de 1 nm. As amostras da Camada A foram secas em estufa a 45 °C por 24 horas, moídas e peneiradas (malha de 2 mm), para homogeneização dos efeitos da umidade e rugosidade (EPIPHANIO et al., 1992). Depois deste processo as amostras foram acondicionadas em placas de petri de 13,5 cm de diâmetro para serem feitas as leituras pelo sensor. Utilizou-se a placa padrão branca com 100 % de reflectância. Na geometria utilizada a amostra foi posicionada a 80 cm da fonte de iluminação (lâmpada halógena de 650 W) e 11 cm do alvo-sensor. Foi realizada a leitura espectral das amostras de terra retiradas dos mesmos pontos locados no campo e também avaliados pelo sensor orbital para comparação. A relação

entre a energia refletida pelo alvo e a energia refletida pela placa de referência gerou o fator de reflectância bidirecional.

Fase 3. Critérios para avaliação dos atributos do solo

(a) Foram relacionadas as informações espectrais das amostras de terra (orbital e terrestre) com os atributos do solo. Para isto foram estabelecidos parâmetros para cada um destes atributos. Para o K, Ca, Mg, Al e matéria orgânica foram determinados intervalos (ex.: alto, médio, baixo) de acordo com boletim técnico nº 100 (RAIJ et al., 1997). Os solos foram classificados quanto à saturação por bases como eutróficos ou distróficos. Em relação à granulometria foram usadas 5 classes texturais que melhor discriminassem os solos, conforme sugeridas por Demattê et al. (2005). Estas tiveram as seguintes faixas do teor de argila (g kg^{-1}): (1) arenosa: ≤ 150 ; (2) média-arenosa > 150 e ≤ 250 ; (3) média-argilosa: > 250 e ≤ 350 ; (4) argilosa: > 350 e ≤ 600 e (5) muito argilosa: > 600 . No caso específico do Neossolo Quartzarênico, foram estabelecidas apenas duas classes granulométricas (g kg^{-1}): (1) < 150 e > 100 e (2) ≤ 100 . Para a fração areia grossa (AG) foram estabelecidos 3 intervalos (g kg^{-1}): (1) ≤ 150 de AG; (2) > 150 e ≤ 450 de AG e (3) > 450 de AG. No caso das cores foram estabelecidas 4 classes, de acordo com as matizes do solo: (1) 10YR – 7.5YR; (2) 7.4YR-5.0YR; (3) 4.9YR-2.5YR e (4) 2.4YR-10R.

Dessa forma, as análises de terra foram agrupadas sempre de acordo com estes parâmetros e determinadas as médias das curvas espectrais (FieldSpec e ASTER), em função desses parâmetros para fins comparativos. Similarmente, as amostras de terra foram agrupadas de acordo com a classificação do solo (EMBRAPA, 1999). E determinadas as médias das curvas espectrais (FieldSpec e ASTER).

(b) Para verificação das diferenças entre as curvas espectrais foi realizado o teste de médias entre elas, utilizando-se o programa Statistical Analysis System (SAS, 1999), em diferentes faixas de comprimento de onda. No caso do sensor terrestre, devido ao grande número de bandas, foram simuladas as bandas do sensor ASTER, tirando-se as médias da reflectância correspondente a cada uma das bandas.

(c) Utilizando-se as curvas de nível foi gerado um modelo digital de elevação do terreno (MDE). Na geração deste modelo foi utilizado a Rede Irregular de Triangulações (*Irregular Triangulated Networks* – TIN) que reproduz elevações ao plotar pontos em vértices de triângulos. O TIN é um conjunto de triângulos adjacentes, não sobrepostos, computados através de pontos irregulares espaçados na superfície do terreno, a partir dos pares de coordenadas x, y e dos valores de z (elevação). Foi utilizado o software ArcMap 8.3 (ESRI, 2000) módulo 3D Analyst. Segundo alguns autores (CÂMARA; MEDEIROS, 1998; FELGUEIRAS; CÂMARA, 2005), a grade triangular, permite maior precisão na análise quantitativa dos dados do que a grade retangular, e também são considerados melhores para representar as feições do relevo, pois capturam sua complexidade sem a necessidade de grande quantidade de dados. A partir do MDE, foram geradas 22 toposseqüências utilizando a extensão Z-Profile do software ArcMap 8.3 (ESRI, 2000). Para as toposseqüências mais completas e com presença de solo exposto na imagem foram elaborados desenhos esquemáticos para representá-las na paisagem (Figuras 4 a 7).

Elaboradas estas toposseqüências, foram escolhidas as 4 mais representativas da área, isto é, com a maior variabilidade de solos. Nestas toposseqüências escolhidas foram inseridas as curvas espectrais obtidas pelo sensor terrestre (FieldSpec) nas três profundidades de amostragem, avaliando-se o comportamento espectral dos solos em profundidade e ao longo do relevo. Para estes mesmos pontos, foram elaboradas as curvas espectrais da camada superficial a partir dos dados do sensor FieldSpec e do sensor ASTER, comparando-se os sensores entre si.

Para melhor compreensão da metodologia descrita, foi elaborado um fluxograma com as principais etapas desenvolvidas (Figura 3).

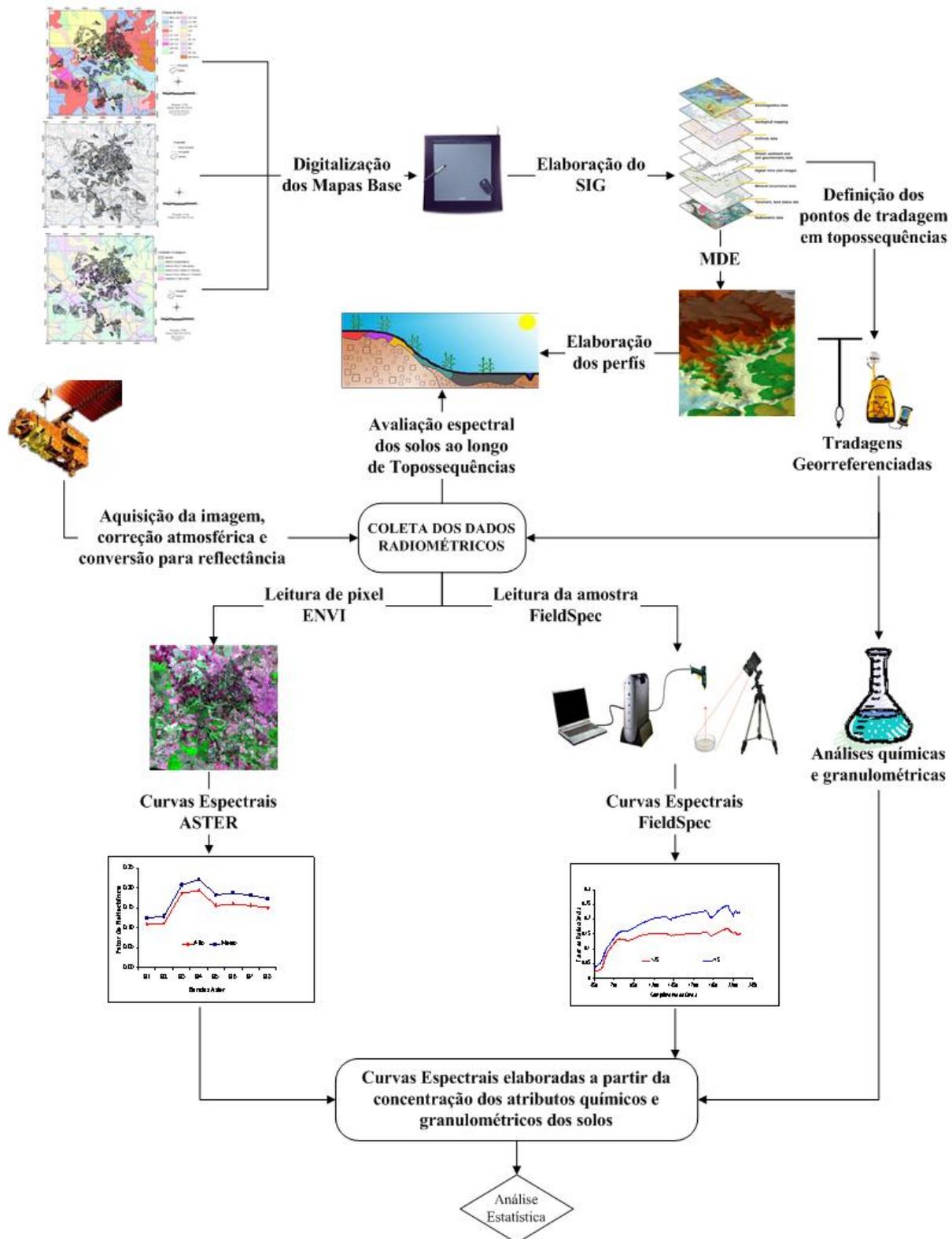


Figura 3 - Fluxograma representativo da metodologia utilizada para obtenção das curvas espectrais de acordo com a concentração dos atributos no solo, nos níveis orbital e laboratório

2.2.3 Resultados e Discussão

2.2.3.1 Caracterização química e granulométrica dos solos

Os solos foram caracterizados em perfis representativos. Na camada superficial (A), todos os Latossolos com textura mais argilosa apresentaram maiores teores de matéria orgânica (MO) do que os solos pertencentes à mesma classe, porém, com diferentes texturas. Foi o caso do Latossolo Vermelho-Amarelo textura argilosa (LVA2), que apresentou 22 g kg⁻¹ de MO, enquanto que o mesmo solo, no entanto, de textura média-argilosa (LVA3) e média-arenosa (LVA4) apresentaram teores de 20 e 12 g kg⁻¹ de MO, respectivamente (Tabela 2). O mesmo comportamento foi observado para a maioria dos outros solos, exceto para os Nitossolos (NV) e Neossolos Quartzarênicos (RQ), onde os solos de textura mais arenosa apresentaram maior teor de MO na superfície. A saturação por bases apresentou maiores valores na camada superficial do solo, principalmente por sofrer grande influência das práticas de manejo, como calagem e gessagem.

Analisando-se os resultados de granulometria (Tabela 2), os Latossolos apresentaram uma homogeneidade ao longo das camadas em relação ao teor de argila e os maiores valores deste atributo foram encontrados para os Nitossolos e os Latossolos férricos. Os Argissolos, devido a presença do horizonte B textural (B_t) apresentaram um maior teor de argila em subsuperfície. Dentre as classes analisadas os Neossolos Quartzarênicos foram os mais arenosos (Tabela 2).

A topossequência 1 (Figura 4), caracteriza-se por altitudes que variam de 680 a 820 m, com extensão de 3.100 m e contribuição de dois materiais de origem, os arenitos conglomeráticos do Grupo Taubaté e diabásios da formação Serra Geral, grupo São Bento. O Latossolo Vermelho Distrófico, textura média-arenosa (LVd4), possui com baixa saturação por bases (Tabela 2), com ocorrência desses solos em relevo plano a suave ondulado. Seguindo a topossequência verifica-se a presença do Argissolo Vermelho Amarelo Eutrófico, com textura argilosa (PVAe2), estrutura em blocos e cerosidade presente no B_t. Este solo apresentou alta fertilidade (Tabela 2), se caracteriza pelo gradiente textural entre os horizontes e encontra-se em cotas de 760 m. Concordando com Prado (1995) os PVA's geralmente são encontrados em sua grande maioria em declives mais acentuados que os LV's. Nas cotas mais baixas da topossequência têm-se o Nitossolo Vermelho Eutrófico textura muito argilosa – NVe1 (740 m) e Nitossolo Vermelho Eutrófico textura argilosa – NVe2 (730 m). Estes solos apresentaram alta fertilidade, estrutura em

blocos e cerosidade. São solos de coloração bem avermelhada, com matiz 2.5YR, devido a grande concentração de óxidos de ferro (EMBRAPA, 1999), oriundo de seu material de origem, o diabásio.

A topossequência 2 (Figura 5), caracteriza-se pela influência dos arenitos conglomeráticos do Grupo Taubaté e do diabásio da Formação Serra Geral. Algumas classes de solos presentes são similares às encontradas na topossequência 1, sendo elas, LVd4 e o NVe2. No entanto, na parte mais alta desta topossequência (770 m), verifica-se presença do Latossolo Amarelo distrófico textura média-argilosa (LAd3), apresentando baixa saturação por bases, matiz 7.5YR, estrutura fraca com pouca diferenciação entre horizontes. Nas cotas de 730 m, tem-se a presença do Argissolo Vermelho Distrófico latossólico textura média-arenosa (PVdL2). Este solo apresenta um horizonte B textural (B_t) e logo abaixo observa-se a presença de um horizonte B latossólico (B_w), verificando a transição de diferentes classes de solos ao longo da vertente. Seguindo na topossequência 2 (Figura 5) nota-se o Latossolo Vermelho Distroférico textura argilosa (LVdf2), solo com alta concentração de ferro, devido a influência do material de origem, o diabásio. Logo em seguida na vertente, temos a presença do Nitossolo Vermelho Eutrófico latossólico, textura argilosa (NVeL1). Trata-se de um solo intermediário ou de transição entre o LVd4 que se encontra na parte mais alta e o próprio NVe2 que está situado em cotas menores (680 m). A hipótese mais aceita para esta variação lateral na topossequência 2 é a de que acontece uma circulação lateral da solução do solo em uma vertente, ou seja, no topo acontece uma circulação preferencialmente vertical, mas quando começa a ocorrer uma declividade, o fluxo vertical diminui e o fluxo lateral tem início, sendo então, de maior expressão em toda a encosta até o sopé. Este fluxo, junto com ciclos de umedecimento e secagem do solo, favorece a iluviação lateral de argilas por processos de dispersão e floculação deste material, o que provoca o desenvolvimento de um horizonte B_n a partir de um horizonte B_w (LEPSCH; BUOL, 1974; MONIZ; BUOL, 1982; VIDAL-TORRADO; LEPSCH, 1993).

Na topossequência 3 (Figura 6), verifica-se a mudança de material de origem em relação às duas anteriores. Os arenitos finos a médios da formação Botucatu originam as classes de solos situadas nas partes mais altas do relevo, como foi o caso do LVAe3. Na posição inferior da vertente encontra-se o solo formado a partir do diabásio da formação Serra Geral, NVe2 com coloração 2.5YR.

A topossequência 4 (Figura 7), caracteriza-se por altitudes que variam de 600 a 700 m, com extensão de 2.550 m. Os arenitos finos a médios da formação Botucatu originou o Neossolo Quartzarênico Distrófico, que caracteriza-se por apresentar textura $\leq 150 \text{ g kg}^{-1}$ de argila. Devido sua constituição essencialmente de quartzo, este solo geralmente é pobre em nutrientes, com uma baixa saturação por bases e apresenta um horizonte A fraco seguido por um horizonte C solto e pouco diferenciado. Na posição inferior da vertente encontra-se o solo formado a partir do diabásio da formação Serra Geral, NVdL2 com coloração 2.5YR.

2.2.3.2 Atributos do Solo vs Reflectância Terrestre (FieldSpec) e Orbital (ASTER)

A distribuição do tamanho das partículas do solo e a presença de diferentes argilominerais influenciam na sua resposta espectral (MENESES; MADEIRA NETTO, 2001). De uma maneira geral, solos de textura arenosa tendem a ter maior intensidade de reflectância, devido sua constituição mineralógica (geralmente rica em quartzo) (RESENDE et al., 2005), aos baixos teores de matéria orgânica e óxidos de ferro. As curvas espectrais médias das amostras de terra com maiores concentrações de argila resultaram em menor intensidade de reflectância tanto pelo sensor terrestre quanto orbital (Figura 8a). Estes dados corroboram os resultados obtidos por Barnes e Baker (2000), que obtiveram elevadas correlações positivas entre a reflectância do solo e o aumento da fração areia, e elevadas correlações negativas com o aumento da fração argila. As bandas 6 e 7 simuladas do sensor orbital (ASTER) a partir dos dados espectrais obtidos pelo sensor terrestre (FieldSpec), discriminaram significativamente a classe de teor de argila $\leq 150 \text{ g kg}^{-1}$ das demais (Tabela 3).

Para os dados espectrais do sensor ASTER, as bandas 3, 4, 5 e 7 geraram os melhores resultados, onde os dados espectrais com teores de argila $\leq 150 \text{ g kg}^{-1}$ diferiram dos com concentração de 350 a 600 g kg^{-1} e $> 600 \text{ g kg}^{-1}$ (Tabela 4). A explicação para este comportamento, segundo Meneses e Madeira Netto (2001), é que os materiais com partículas menores apresentam superfície mais uniforme, com menor número de poros para reter a luz incidente, enquanto a maior granulometria cria superfícies mais irregulares, com sombreamentos e maior retroespalhamento interno da luz.

Houve um aumento da intensidade de reflectância do solo conforme os teores de areia grossa foram aumentando e proporcionalmente uma diminuição dos teores de areia fina (Figura

8b). Este comportamento foi encontrado tanto para as curvas do FieldSpec quanto do ASTER. As curvas diferiram significativamente umas das outras nas bandas 4, 5, 6 e 7 para o sensor FieldSpec (Tabela 3) e 1, 3, 6, 7 e 8 para o sensor ASTER (Tabela 4). Concordando com Stoner (1979), que verificou em solos de textura média um aumento da intensidade reflectância com o aumento no tamanho da partícula (da fração areia) e a diminuição da proporção de areia fina a muito fina.

A matéria orgânica é um constituinte primário da coloração, apresentando portanto, uma estreita relação com a reflectância do solo. Assim como Dalmolin (2002), foi observado um aumento na resposta espectral dos solos quando houve decréscimo de matéria orgânica (Figura 8c). Demattê; Epiphânio e Formaggio (2003) observaram que a remoção da matéria orgânica do solo promove aumento da intensidade de reflectância em todo o espectro analisado, para diversas classes de solo avaliadas. As respostas espectrais do solo para a matéria orgânica foram as mesmas para os dois sensores utilizados. O sensor ASTER conseguiu diferenciar estas curvas principalmente nas bandas 5, 6, 7 e 8 (Tabela 4).

A cor é uma propriedade largamente utilizada para classificar e fazer interpretações sobre os solos. As características matéria orgânica e os óxidos de ferro estão intimamente relacionados a tal propriedade. O Sistema Brasileiro de Classificação de Solos (EMBRAPA, 1999) utiliza os limites de matiz de cor (com base na proporção de hematita e goethita) para diferenciar classes de solo. Para fins de uniformização e maior objetividade na identificação das cores, usam-se escalas de padrões comparativos, sendo a mais empregada a Escala Munsell para Solos. Ela é constituída segundo três variáveis: o matiz (hue), o valor (value) ou claridade relativa e o croma (chroma) ou intensidade da cor (OLIVEIRA; JACOMINE; CAMARGO, 1992). Sendo a matiz a gama de cor do espectro solar, que traduz o comprimento de onda dominante da luz refletida por determinado corpo, analisou-se o comportamento espectral dos solos conforme a variação apenas de sua matiz.

Observou-se que amostras de terra com matizes mais vermelhas apresentam uma menor intensidade de energia eletromagnética refletida e as com matizes mais amarelas uma maior intensidade (Figura 8d). O sensor FieldSpec separou as curvas em um maior número de bandas (1, 2 e 3) do que o sensor ASTER (banda 4) (Tabelas 3 e 4). A curva média das matizes que variam de 2.5YR -10R apresentaram em todo o espectro uma baixa intensidade de reflectância, podendo ser resultado da presença de minerais opacos, tais como a magnetita e a ilmenita que devem ter contribuído para este comportamento, concordando com os resultados obtidos por

Fontes e Carvalho Júnior (2005). Fontes et al. (2000) afirmam que solos derivados de rochas máficas, como é o caso de boa parte destes solos (Anexos), podem apresentar magnetita e ilmenita inclusive na fração areia e silte. A concavidade menos acentuada em 450 nm e maiores intensidades de reflectância em 900 nm representada pelos solos com matiz mais amarela, indicam a predominância de goethita sobre a hematita, concordando com Fontes e Carvalho Júnior (2005). Estes mesmos autores concluíram que as matizes dos solos apresentam uma estreita relação com o conteúdo e a relação Hematita/Goethita.

Analisando os atributos químicos do solo, cálcio, magnésio e a saturação por bases, observou-se uma tendência de quanto maior a presença desses elementos no solo menor será sua reflectância (Figuras 9a, 9b e 9c), tanto para o sensor FieldSpec quanto orbital. Estes resultados discordam dos obtidos por Demattê et al. (2003), que chegaram a resultados indicando que quanto maior a concentração das bases e maior a saturação por bases, maior será a intensidade de reflectância dos solos. Os cátions avaliados, não mostraram grandes diferenças estatísticas entre as curvas (Tabelas 3 e 4). Apenas o magnésio, que na banda 7 do sensor FieldSpec, demonstrou uma diferença entre as bandas conforme a variação do seu teor. A saturação por bases, diferiu significativamente em todas as bandas e nos dois sensores, possivelmente por ter apenas duas classes sendo avaliadas (eutróficos e distróficos), sendo bem contrastante a diferença entre uma e a outra.

O caráter químico, principalmente em relação as bases trocáveis tem baixa influência no dado espectral. De fato, a granulometria tem um efeito bem mais importante. Ao determinar médias de amostras de terra com diferentes saturações por bases, a relação causa e efeito fica extremamente prejudicada. Em contrapartida, ensaios de aumento de cálcio numa mesma amostra de terra, permitem sobressair o efeito na reflectância, explicando a divergência observada em relação a este elemento.

As bandas com maior comprimento de onda (6, 7 e 8) foram as que mais separaram as curvas espectrais para quase todos os atributos, exceto para a cor do solo, onde as bandas 1, 2 e 3, separaram melhor (Tabela 4). Este comportamento pode ser em função de que as bandas 1, 2 e 3 são da região do visível, mais relacionadas a cor e as bandas 6, 7 e 8 relacionadas aos minerais presentes no solo.

2.2.3.3 Classes de Solo vs Reflectância Terrestre e Orbital

A reflectância do solo, não somente da luz visível, mas também de todos os outros comprimentos da faixa do espectro óptico, é uma propriedade cumulativa que deriva do comportamento espectral dos constituintes minerais orgânicos e fluídos que, combinados, compõem o solo (MENESES; MADEIRA NETTO, 2001).

O Neossolo Quartzarênico por definição é um solo de textura arenosa, baixos teores de matéria orgânica e óxidos de ferro com mineralogia na fração areia constituída predominantemente por quartzo (RESENDE et al., 2005), resultando numa elevada intensidade de reflectância (Figuras 10b e 10d). Esta classe de solo foi a que mais se diferenciou estatisticamente das outras, tanto no nível terrestre quanto orbital (Tabelas 5 e 6), concordando com os dados obtidos por Demattê (2002).

Os Argissolos apresentaram um comportamento espectral diferente, conforme a classe textural e suas variações, apesar de não ter havido diferenças significativas entre as bandas para a maioria dos solos desta ordem, verifica-se que os PVL's e os PVAL's foram os que apresentaram uma menor intensidade da REM refletida ao longo do espectro eletromagnético. Exceto o PVAL5, que devido a sua grande quantidade de areia em sua constituição, favoreceu a alta intensidade de REM refletida, sobrepondo outros atributos interferentes na reflectância desta classe de solo (Figuras 10b e 10c). Desta forma, diferiu significativamente dos outros Argissolos nas bandas 4, 5, 6 e 7 do FieldSpec, enquanto que no sensor ASTER, não houve diferenças (Tabelas 5 e 6).

Comparando-se os Latossolos com suas diferentes classes granulométricas, observa-se que os LVA's e os LA's tenderam a apresentar maior intensidade de reflectância, enquanto que os LV's tenderam a absorver uma maior quantidade de REM em nível terrestre e orbital (Figuras 10a e 10c). As diferenças encontradas nas respostas espectrais dos Latossolos estão relacionadas ao teor de argila que aumenta do LA (média para a Camada A = 290 g kg⁻¹) para o LVA (média para a Camada A = 304 g kg⁻¹) e para o LV (média para a Camada A = 314 g kg⁻¹). Outro fator importante relacionado a baixa intensidade de reflectância dos LV's, é a presença de minerais opacos como a magnetita que absorve energia em todo o espectro eletromagnético conforme verificado por Demattê et al. (2001). Por outro lado, ambos os solos apresentam bandas de

absorção pouco intensas em 1400 e 1900 nm e mais altas em 2200 nm demonstrando a mineralogia caunilítica destes solos, concordando com os resultados obtidos por Fiorio (2002).

Dentre as classes de solo mais argilosas, os Nitossolos foram os que se destacaram na absorção da REM, possivelmente pela grande quantidade de argila e óxidos de ferro. Especificamente no caso orbital (Figuras 10a e 10c) a umidade pode ter tido maior influência, pois este parâmetro não foi controlado. A maior capacidade de reter umidade faz com que aumente ainda mais as feições de absorção e um rebaixamento das curvas desses solos (HUMMEL; SUDDUTH; HOLLINGER, 2001).

2.2.3.4 Variação espectral em profundidade

A caracterização de solos num levantamento tradicional pressupõe a avaliação das amostras em profundidade. Portanto, para caracterização dos solos, também foram analisadas as curvas espectrais de amostras em diferentes profundidades (Figuras 4 a 7). É possível realizar a caracterização com amostras coletadas no campo e ao nível de sensor em laboratório. Verifica-se que no LAd3 (Figura 5) as camadas da subsuperfície (40-60 e 80-100 cm) apresentaram intensidades de reflectância mais elevadas em relação à camada de superfície em parte do espectro eletromagnético. Isto ocorre devido ao fato do teor de MO diminuir em profundidade. Demattê (1999) e Coleman e Montgomery (1987) verificaram que em solos muito argilosos ocorre diminuição da reflectância em superfície (com maior teor de matéria orgânica) em relação à segunda camada (com pouca matéria orgânica) na faixa entre 400 a 1.200 nm. O NVeL2 e NVe2 também apresentaram maior intensidade de reflectância na camada superficial, neste caso, o forte efeito da coloração da hematita, comum neste tipo de solo, pode ter sobreposto o efeito da MO, concordando com Fontes e Carvalho Júnior (2005).

Nos Argissolos, a diminuição da intensidade de reflectância nas camadas inferiores deve-se ao aumento do teor de argila em subsuperfície. Como os Argissolos apresentam um gradiente textural entre as camadas, a Camada A possui uma maior quantidade de areia resultando em uma maior intensidade de reflectância do que as camadas B e C (Figuras 4 a 6).

Os Neossolos Quartzarênicos, por não possuírem muita diferenciação entre horizontes, seu comportamento espectral em profundidade não varia com grande intensidade. Apenas na Camada A, onde há maior acúmulo de MO, tem-se uma menor intensidade de reflectância

(Figura 7). Verifica-se esta mesma classe de solo em posições diferentes no relevo (RQd1 e RQd1') apesar de terem a mesma classificação, apresentaram um comportamento espectral um pouco diferenciado quanto a intensidade da REM refletida. O RQ situado nas cotas mais baixas, apresenta alguns traços de influência do diabásio durante sua formação, resultando em uma cor um pouco mais avermelhada e um teor de argila um pouco maior, sem contudo, ser o suficiente para mudar de ordem, mas o suficiente para alterar seu comportamento espectral em relação ao RQ situado nas cotas mais altas da topossequência.

Os LV's que de maneira geral apresentam transição difusa entre os horizontes, boa drenagem interna, elevados teores de óxidos de ferro, foi observado uma pequena variação entre suas curvas espectrais em profundidade (Figuras 4 e 5). Nota-se inclusive (Figura 5), que as curvas espectrais das 3 camadas analisadas para o LVdf2, são praticamente iguais, por serem desenvolvidos de rochas máficas que podem resultar em quantidades significativas de minerais opacos como a magnetita e a ilmenita (MENESES; MADEIRA NETTO, 2001).

2.2.3.5 Variação espectral ao longo de diferentes topossequências

Para as curvas espectrais obtidas na primeira topossequência (Figura 4), pelo sensor FieldSpec, observa-se uma diminuição da intensidade da reflectância dos solos que se encontram nas cotas mais altas (LVd4) para os de cotas mais baixas. O aumento do teor de argila é um dos responsáveis por esta diminuição de intensidade na reflectância do LVd4 para o PVAe2. Nas classes, NVe1 e NVe2, houve uma diminuição da intensidade e das feições de absorção, também em função da mudança da textura dos solos e do material de origem, neste ponto sofrendo influência do diabásio, aumentando os teores de óxidos de ferro. Os solos ocorrentes nas cotas mais elevadas são geralmente os Latossolos, profundos, permeáveis, forte drenagem e baixa retenção de água. São solos intemperizados resultando em relevo plano a suave ondulado, apresentando um horizonte B latossólico com estrutura granular, pequena e fortemente desenvolvida, com difícil diferenciação de cores no perfil (difusa) e ausência de gradiente textural. Tais características geram curvas espectrais homogêneas em profundidade (Figura 4). Nesta área ocorre maior contribuição do material arenítico. Nas cotas mais baixas, há diminuição na relação infiltração/deflúvio com conseqüente alteração do relevo. Da mesma maneira que foram identificadas diferenças nas análises químicas e granulométricas de solo, as curvas

espectrais também acusam variações. Quanto mais se aproxima de cotas inferiores mais próximo estão os solos desenvolvidos de basalto. Com isso, ocorrem alterações significativas nas curvas espectrais principalmente na forma e intensidade.

Os sensores orbitais captam dados espectrais da superfície do terreno, portanto somente esta camada pôde ser analisada e comparada com o sensor FieldSpec. Analisando-se as curvas da camada A de todos os solos presentes na primeira topossequência (Figura 4), verifica-se que há um comportamento similar das curvas de NVe2 e NVe1 para os sensores FieldSpec e ASTER. Contudo, para as curvas do LVd4 e PV Ae2, os dados do sensor FieldSpec indicam uma posição contrária ao sensor ASTER em relação as suas curvas espectrais. A diferença entre os ambientes de coleta dos dados, sem controle (orbital) e controlado (laboratório) pode ter interferido nas respostas espectrais, onde a umidade do solo assume papel importante, pois interfere diretamente na intensidade da curva. Segundo Ben-Dor (2002), sem controle do meio, a interpretação dos dados é dificultada, pois a energia eletromagnética interage com a atmosfera (gases e partículas de aerossol) causando distorções da interpretação.

Na segunda topossequência (Figura 5), observa-se novamente a influência dos mesmos materiais de origem da primeira, arenitos conglomeráticos e diabásios. A intensidade da reflectância dos solos ao longo do relevo está sendo influenciada basicamente pela textura, destacando-se o LAd3 e o LVd4, situados na porção mais alta do relevo e com baixos teores de argila resultando em uma maior energia eletromagnética refletida. Nas posições mais baixas observa-se um aumento nos teores de argila e da presença de solos derivados do intemperismo do diabásio resultando em uma maior concentração de óxidos de ferro e conseqüentemente uma menor intensidade de reflectância. Quando comparada a intensidade de reflectância entre os dois sensores estudados, nota-se um comportamento similar entre as curvas, exceto para dois solos, LAd3 e LVd4.

A Topossequência 3 (Figura 6) representa bem os tipos de solos da região estudada, com Latossolos nas partes mais altas do relevo derivados de material mais arenoso depositado pelo intemperismo, Argissolos na meia encosta e Nitossolos nas cotas mais inferiores, onde há maior influência do diabásio no processo de formação destes solos.

A Topossequência 4 (Figura 7) mostra claramente a alteração espectral de solos em posições diferentes no relevo. Na parte mais alta da topossequência, verifica-se a presença do Neossolo Quartzarênico Distrófico (RQd1), com uma elevada intensidade de reflectância devido

a sua textura mais arenosa, são solos profundos e essencialmente arenosos. Os perfis são de extrema simplicidade, limitando-se a diferenciação à expressão do horizonte A e C. Na parte inferior do relevo, a presença do Nitossolo Vermelho Distrófico latossólico (NVdL2), denota a absorção da REM, pela maior presença de óxidos de ferro, inferida pela cor em 2.5YR (Tabela 2) e argila. O horizonte diagnóstico dos Nitossolos, apresenta textura argilosa a muito argilosa (Tabela 2), sem incremento de argila do horizonte A para o B ou pequeno incremento, porém não suficiente para caracterizar a relação textural. Apresenta estrutura em blocos ou prismática e transição gradual ou difusa entre horizontes.

Pela comparação entre a resposta espectral da Camada A desses solos obtidas pelo sensor FieldSpec, e pelo sensor ASTER, nota-se um comportamento similar. O sensor orbital porém, mostra um menor nível de detalhes ao longo da curva devido ao seu número limitado de bandas. Além disso, as curvas espectrais obtidas pelo sensor ASTER obtiveram uma maior intensidade de reflectância do que as curvas do sensor FieldSpec, causada pela interferência da atmosfera na REM. Devido a isso, os sensores terrestres permitem avaliar e diagnosticar variações na intensidade e feições relacionando com os atributos do solo inclusive em profundidade. Os resultados da imagem, apesar de só obter informações na camada superficial, demonstra ser viável na discriminação de solos.

2.3 Conclusões

1. Os atributos areia grossa, argila, matéria orgânica e a cor possuem relação clara com a variação de reflectância das amostras de terra;
2. O aumento da concentração de matéria orgânica e argila no solo resulta na diminuição da intensidade de reflectância. Em contrapartida, o aumento da concentração de areia eleva a magnitude de intensidade de reflectância;
3. O Neossolo Quartzarênico é o solo que melhor se diferenciou das outras classes estudadas pelo seu comportamento espectral, tanto para o sensor FieldSpec (Bandas 1, 2, 3, 4, 5, 6 e 7), quanto para o sensor ASTER (Banda 4);
4. Ao longo de uma vertente ocorre variação nos dados espectrais dos solos o que permite sua discriminação;

5. O comportamento espectral de um solo em profundidade no perfil está relacionada, principalmente com o teor de matéria orgânica e a mudança textural ao longo do perfil;
6. Solos localizados em cotas mais elevadas do relevo apresentam maior intensidade de reflectância do que os situados em posições inferiores, devido à variação do material de origem da referida região;
7. As informações espectrais de sensor em laboratório são mais detalhadas, permitindo inclusive avaliação de amostras de terra ao longo do perfil. As imagens de satélite, devido à menor resolução espectral, apresentam informações pouco detalhadas, bem como apenas da camada superficial, mas que permitem inferir importantes relações entre atributos do solo e intensidade de reflectância.

Tabela 2 - Média dos atributos das principais classes de solo estudadas

(continua)

Siglas ⁽¹⁾	Camada ⁽²⁾	Granulometria					Química				Cor		
		Areia			Silte	Argila	MO ⁽³⁾	Ca ⁺⁺	Mg ⁺⁺	V ⁽⁴⁾	Munsell		
		Grossa	Fina	Total							Matiz	Valor	Croma
Solos		g kg ⁻¹					- mmol _c kg ⁻¹ -						
LA2	A	330	300	630	10	360	21	28	7	55	8.4YR	3.4	1.8
	B	300	280	610	14	376	14	9	4	37	2.9YR	3.2	2.7
	C	290	280	570	63	367	12	7	3	19	2.5YR	3.1	2.5
LA3	A	453	243	695	31	274	14	13	5	38	7.5YR	3.4	1.8
	B	416	270	685	58	257	10	9	3	29	7YR	3.5	2.3
	C	416	230	647	66	287	9	7	4	27	6.2YR	3.6	2.5
LA4	A	444	307	751	12	237	13	8	4	29	7.6YR	3.3	1.6
	B	427	313	740	37	223	9	9	3	33	7.2YR	3.5	2.2
	C	413	293	707	68	225	7	7	2	29	7.5YR	3.7	2.6
LV2	A	152	268	420	133	447	20	20	7	45	3.4YR	3.2	2.1
	B	126	226	352	239	409	12	12	4	33	3.2YR	3.2	2.4
	C	146	226	372	161	468	9	12	3	36	2.9YR	3.2	2.5
LV3	A	240	340	580	161	259	14	19	6	56	3YR	3.3	2.2
	B	290	300	590	108	302	10	11	6	49	2.9YR	3.3	2.3
	C	230	330	560	127	313	8	9	3	38	3YR	3.4	2.4
LV4	A	302	404	706	60	235	14	13	3	38	4.5YR	3.2	1.8
	B	360	399	759	23	219	9	8	2	30	3.7YR	3.3	2.3
	C	316	432	748	32	220	7	5	1	21	3.4YR	3.3	2.4
LVA2	A	287	203	490	102	408	22	28	11	53	5.2YR	3.3	2.3
	B	243	200	443	143	414	14	9	4	30	4.9YR	3.4	2.5
	C	227	190	417	133	450	12	10	5	36	4.9YR	3.3	2.6
LVA3	A	395	250	645	33	322	20	19	7	43	6.4YR	3.3	1.7
	B	420	232	652	57	291	14	7	3	21	6YR	3.5	2.3
	C	403	205	608	77	316	11	7	3	20	5.9YR	3.5	2.5
LVA4	A	377	399	775	44	180	12	15	4	47	5.3YR	3.4	1.8
	B	396	384	780	26	194	8	8	2	32	5.3YR	3.5	2.2
	C	371	388	760	35	205	6	7	2	29	5.3YR	3.5	2.4
LVf2	A	120	243	363	166	471	20	18	10	42	2.2YR	3.2	2.0
	B	110	293	403	134	462	14	11	4	29	4.7YR	3.3	2.7
	C	117	277	393	133	474	11	11	3	32	4.6YR	3.3	2.7
NV1	A	20	117	137	366	497	23	44	16	58	2.8YR	3.1	2.5
	B	17	70	87	325	588	14	41	14	69	2.6YR	3.3	3.1
	C	17	73	90	280	630	10	39	16	71	2.8YR	3.2	2.9
NV2	A	100	190	290	229	481	25	33	13	59	2.6YR	3.1	2.1
	B	98	137	235	271	476	15	24	8	57	2.6YR	3.0	2.5
	C	98	155	253	258	489	12	24	7	62	2.4YR	3.1	2.5
NVL2	A	165	205	370	206	424	16	18	7	41	3.3YR	3.1	2.3
	B	140	195	335	267	399	11	14	5	40	2.8YR	3.1	2.3
	C	140	175	315	235	451	9	16	5	50	2.9YR	3.0	2.7

Tabela 2 - Média dos atributos das principais classes de solo estudadas

(conclusão)

Siglas ⁽¹⁾	Camada ⁽²⁾	Granulometria					Química				Cor		
		Areia			Silte	Argila	MO ⁽³⁾	Ca ⁺⁺	Mg ⁺⁺	V ⁽⁴⁾	Munsell		
Solos	Grossa	Fina	Total	Matiz							Valor	Croma	
		----- g kg ⁻¹ -----					----- mmol _c kg ⁻¹ - %						
PA4	A	532	300	832	9	159	7	6	4	34	8.2YR	3.2	1.9
	B	480	280	760	13	227	5	10	3	39	8YR	3.5	2.5
	C	419	280	699	43	258	4	11	2	38	7.8YR	3.8	2.6
PAL4	A	538	255	793	21	187	12	10	3	34	8.6YR	3.3	1.6
	B	487	285	772	82	146	8	7	2	28	7.8YR	3.6	2.5
	C	500	245	745	35	221	6	4	2	18	7.4YR	3.6	2.4
PVA2	A	175	260	435	138	343	23	32	9	56	4.5YR	3.0	2.0
	B	190	225	415	174	412	15	26	8	57	4.8YR	3.3	2.3
	C	200	215	415	135	450	12	22	6	60	4.7YR	3.2	2.6
PVA3	A	460	323	783	60	157	12	14	6	51	5YR	3.2	1.9
	B	380	333	713	70	217	9	10	3	36	4.5YR	3.3	2.8
	C	333	307	640	46	314	7	9	3	36	4.3YR	3.4	2.9
PVAL3	A	310	340	650	49	301	21	34	7	67	4.9YR	3.0	1.9
	B	430	300	730	49	221	11	22	3	59	4.1YR	3.1	2.2
	C	320	300	620	116	264	10	24	4	61	3.6YR	3.1	2.4
PVAL4	A	550	230	780	41	179	8	16	7	60	5.3YR	3.0	1.8
	B	500	190	690	40	270	6	15	3	45	4.3YR	3.1	2.3
	C	480	230	710	43	247	4	15	2	49	4.2YR	3.1	2.4
PVAL5	A	532	360	892	29	79	8	11	3	54	5.2YR	3.1	1.6
	B	472	419	891	4	105	4	6	1	29	4.9YR	3.1	2.2
	C	512	350	862	14	124	3	6	2	36	5.3YR	3.2	2.5
PVL2	A	295	250	544	107	349	21	27	9	50	3.3YR	3.0	2.3
	B	145	305	450	123	428	16	17	6	42	3YR	3.1	2.0
	C	130	290	420	131	449	13	15	4	35	3.1YR	3.0	2.2
PVL3	A	400	290	690	63	247	19	25	6	61	3.2YR	2.9	1.9
	B	300	280	580	108	312	8	11	2	30	2.6YR	2.9	2.1
	C	330	250	580	94	326	7	11	3	41	2.6YR	3.0	2.3
RQ1	A	529	340	870	17	114	10	9	2	38	4.8YR	3.1	1.6
	B	533	308	840	21	139	6	6	1	23	4.3YR	3.2	2.2
	C	491	342	833	24	143	5	4	1	20	4.2YR	3.3	2.4
RQ2	A	491	388	879	32	88	11	9	2	32	5.1YR	3.2	1.8
	B	465	415	880	22	98	7	4	1	16	5.4YR	3.2	1.7
	C	456	418	873	25	102	4	4	1	19	5YR	3.3	2.3

⁽¹⁾ Nomenclatura de acordo com Embrapa (1999). Os números que acompanham os nomes dos solos indicam as classes granulométricas

⁽²⁾ Camada A (0-20 cm); Camada B (40-60 cm); Camada C (80-100 cm)

⁽³⁾ Matéria Orgânica.

⁽⁴⁾ Saturação por Bases

Tabela 3 - Teste de média entre as bandas ASTER simuladas a partir dos dados obtidos em nível terrestre (FieldSpec) para alguns atributos do solo

Classes	Fator de Reflectância Médio							Valor médio do atributo	
	Banda 1 (560) ⁽¹⁾	Banda 2 (660)	Banda 3 (810)	Banda 4 (1.650)	Banda 5 (2.165)	Banda 6 (2.205)	Banda 7 (2.260)		
Argila (g kg⁻¹)								g kg⁻¹	
1	> 600	0,042B ⁽²⁾	0,099A	0,119B	0,126B	0,123B	0,117B	0,114B	745,00A
2	350 - 600	0,053AB	0,106A	0,130B	0,146B	0,150B	0,143B	0,142B	428,48B
3	250 - 350	0,065AB	0,110A	0,139AB	0,171B	0,174B	0,165B	0,161B	303,67C
4	150 - 250	0,072A	0,120A	0,153AB	0,196AB	0,206AB	0,196B	0,197B	194,68D
5	< 150	0,077A	0,013A	0,181A	0,278A	0,293A	0,282A	0,293A	109,86D
Areia Grossa (g kg⁻¹)									
1	> 450	0,073A	0,120A	0,159A	0,226A	0,239A	0,229A	0,234A	533,80A
2	150 - 450	0,067A	0,117AB	0,149A	0,187B	0,192B	0,183B	0,183B	341,67B
3	< 150	0,049B	0,105B	0,129B	0,146C	0,150C	0,143C	0,141C	70,00C
Matéria Orgânica (g kg⁻¹)									
1	> 25	0,048B	0,104B	0,131B	0,151B	0,160B	0,153B	0,149B	27,428A
2	15 - 25	0,061AB	0,111AB	0,138AB	0,163B	0,167B	0,158B	0,156B	19,204B
3	< 15	0,072A	0,122A	0,160A	0,220A	0,230A	0,220A	0,225A	10,736C
Cálcio (mmolc kg⁻¹)								mmolc kg⁻¹	
1	>40	0,051B	0,105A	0,132A	0,152A	0,155B	0,147B	0,146B	49,000A
2	20-40	0,055B	0,105A	0,131A	0,156A	0,161AB	0,154AB	0,153AB	27,700B
3	<20	0,071A	0,121A	0,157A	0,210A	0,219A	0,209A	0,212A	11,178C
Magnésio (mmolc kg⁻¹)									
1	> 8	0,051B	0,103B	0,127B	0,145B	0,149B	0,143B	0,142C	12,826A
2	4 - 8	0,068A	0,117A	0,149A	0,192A	0,197A	0,188A	0,187B	5,869B
3	< 4	0,072A	0,123A	0,162A	0,221A	0,233A	0,223A	0,228A	2,256C
Saturação por Bases (%)								%	
1	>50	0,060B	0,109B	0,138B	0,176B	0,183B	0,175B	0,175B	60,00A
2	<50	0,070A	0,121A	0,156A	0,204A	0,212A	0,202A	0,204A	36,67B
Cor⁽³⁾ Matiz								Matiz	
1	10YR-7.5YR	0,086A	0,129A	0,168A	0,227A	0,233A	0,219A	0,214A	10YR-7.5YR
2	7.4YR-5.0YR	0,076A	0,125AB	0,162AB	0,219A	0,229A	0,218A	0,220A	7.4YR-5.0YR
3	4.9YR-2.5YR	0,059B	0,111BC	0,142BC	0,181AB	0,187AB	0,179AB	0,182B	4.9YR-2.5YR
4	2.4YR-10R	0,046C	0,100C	0,121C	0,135B	0,146B	0,140B	0,141B	2.4YR-10R

⁽¹⁾ Comprimento de onda em nanômetros⁽²⁾ Médias seguidas de uma mesma letra na coluna não diferem significativamente a 5% pelo teste de Tukey⁽³⁾ Determinada por colorímetro

Tabela 4 - Teste de média entre as bandas ASTER para alguns atributos do solo

Classes	Fator de Reflectância Médio								Valor médio do atributo	
	Banda 1 (560) ⁽¹⁾	Banda 2 (660)	Banda 3 (810)	Banda 4 (1.650)	Banda 5 (2.165)	Banda 6 (2.205)	Banda 7 (2.260)	Banda 8 (2.330)		
Argila (g kg⁻¹)										
1	> 600	0,090B ⁽¹⁾	0,105B	0,162C	0,169C	0,149C	0,155B	0,149C	0,146B	745,00A
2	350 - 600	0,116AB	0,121AB	0,196BC	0,205BC	0,170BC	0,173B	0,169BC	0,162B	428,48B
3	250 - 350	0,134A	0,135AB	0,219AB	0,244AB	0,194ABC	0,200B	0,194ABC	0,185AB	303,67C
4	150 - 250	0,134A	0,138AB	0,225AB	0,245AB	0,198AB	0,204AB	0,201AB	0,194AB	194,68D
5	< 150	0,144A	0,151A	0,245A	0,284A	0,226A	0,237A	0,236A	0,229A	109,86D
Areia Grossa (g kg⁻¹)										
1	> 450	0,141A	0,144A	0,236A	0,265A	0,2113A	0,221A	0,218A	0,211A	533,80A
2	150 - 450	0,130B	0,136A	0,218B	0,240A	0,195A	0,200B	0,195B	0,188B	341,67B
3	< 150	0,111C	0,116B	0,189C	0,193B	0,162B	0,164C	0,161C	0,154C	70,00C
Matéria Orgânica (g kg⁻¹)										
1	> 25	0,109B	0,111B	0,187B	0,194B	0,156C	0,159C	0,156C	0,150C	27,428A
2	15 - 25	0,124A	0,128A	0,206B	0,222B	0,182B	0,186B	0,181B	0,173B	19,204B
3	< 15	0,138A	0,143A	0,233A	0,260A	0,208A	0,216A	0,214A	0,207A	10,736C
Cálcio (mmolc kg⁻¹)										
1	>40	0,136A	0,141A	0,229A	0,256A	0,205A	0,213A	0,209A	0,202A	49,000A
2	20-40	0,120AB	0,124AB	0,200B	0,210B	0,173B	0,175B	0,172B	0,166B	27,700B
3	<20	0,107B	0,109B	0,190B	0,188B	0,157B	0,158B	0,155B	0,149B	11,178C
Magnésio (mmolc kg⁻¹)										
1	> 8	0,115B	0,118A	0,196B	0,202B	0,166B	0,167B	0,165B	0,157B	12,826A
2	4 - 8	0,136A	0,140A	0,223A	0,247A	0,197A	0,204A	0,199A	0,191A	5,869B
3	< 4	0,133A	0,139A	0,227A	0,254A	0,207A	0,215A	0,213A	0,205A	2,256C
Saturação por Bases (%)										
1	>50	0,125B	0,130B	0,210B	0,222B	0,182B	0,185B	0,183B	0,1770B	60,00A
2	<50	0,134A	0,138A	0,225A	0,251A	0,202A	0,210A	0,205A	0,197A	36,67B
Cor⁽³⁾ Matiz										
1	10YR-7.5YR	0,149A	0,149A	0,235A	0,271A	0,211A	0,220A	0,213A	0,205A	10YR-7.5YR
2	7.4YR-5.0YR	0,144A	0,148A	0,236A	0,263AB	0,205A	0,213A	0,208A	0,200A	7.4YR-5.0YR
3	4.9YR-2.5YR	0,122B	0,128B	0,209B	0,227BC	0,190AB	0,194AB	0,192AB	0,185AB	4.9YR-2.5YR
4	2.4YR-10R	0,112B	0,117B	0,202B	0,201C	0,166B	0,171B	0,168B	0,163B	2.4YR-10R

⁽¹⁾ Comprimento de onda em nanômetros

⁽²⁾ Médias seguidas de uma mesma letra na coluna não diferem significativamente a 5% pelo teste de Tukey

⁽³⁾ Determinada por colorímetro

Tabela 5 - Teste de médias para diferentes classes de solos ao nível terrestre (FieldSpec)

Classes Solo ⁽¹⁾	Fator de Reflectância Médio						
	Banda 1 (560) ⁽²⁾	Banda 2 (660)	Banda 3 (810)	Banda 4 (1.650)	Banda 5 (2.165)	Banda 6 (2.205)	Banda 7 (2.260)
LA2	0,082ABC ⁽³⁾	0,123AB	0,156AB	0,218BCDE	0,230BCD	0,214BCD	0,212BCD
LA3	0,078ABC	0,121AB	0,155AB	0,200BCDE	0,200BCD	0,187BCD	0,181CD
LA4	0,075ABCD	0,115AB	0,145AB	0,189BCDE	0,197BCD	0,188BCD	0,186BCD
LV2	0,055ABCD	0,106AB	0,128B	0,142CDE	0,135D	0,128D	0,128D
LV3	0,040D	0,078B	0,098B	0,110E	0,120D	0,118D	0,122D
LV4	0,068ABCD	0,118AB	0,152AB	0,199BCDE	0,209BCD	0,199BCD	0,200BCD
LVA2	0,066ABCD	0,120AB	0,149AB	0,180BCDE	0,188BCD	0,175BCD	0,165CD
LVA3	0,076ABCD	0,120AB	0,155AB	0,201BCDE	0,200BCD	0,188BCD	0,185CD
LVA4	0,082AB	0,136AB	0,176AB	0,242ABCD	0,248ABCD	0,237BCD	0,239BCD
LVf2	0,051ABCD	0,110AB	0,130B	0,139CDE	0,143D	0,137D	0,137D
NV1	0,045BCD	0,097AB	0,119B	0,132DE	0,135D	0,129D	0,131D
NV2	0,045DC	0,102AB	0,125B	0,137CDE	0,143D	0,137D	0,133D
PVA2	0,058ABCD	0,115AB	0,145AB	0,178BCDE	0,179BCD	0,170CD	0,164CD
PVA3	0,065ABCD	0,111AB	0,140B	0,175BCDE	0,191BCD	0,185BCD	0,192BCD
PVAL3	0,055ABCD	0,095AB	0,111B	0,132DE	0,143D	0,139D	0,140D
PVAL4	0,056ABCD	0,095AB	0,116B	0,130DE	0,147CD	0,145CD	0,151D
PVAL5	0,072ABCD	0,126AB	0,171AB	0,269AB	0,302AB	0,296AB	0,311AB
PVL2	0,053ABCD	0,108AB	0,132B	0,160BCDE	0,165CD	0,158CD	0,158CD
PVL3	0,048ABCD	0,097AB	0,115B	0,121DE	0,132D	0,127D	0,124D
RQ1	0,074ABCD	0,126AB	0,173AB	0,261ABC	0,275ABC	0,265ABC	0,278ABC
RQ2	0,085A	0,153A	0,221A	0,366A	0,377A	0,361A	0,371A

⁽¹⁾ Nomenclatura de acordo com Embrapa (1999). Os números que acompanham os nomes dos solos indicam as classes granulométricas

⁽²⁾ Comprimento de onda em nanômetro

⁽³⁾ Médias seguidas de uma mesma letra na coluna não diferem significativamente a 5% pelo teste de Tukey

Tabela 6 - Teste de média para diferentes classes de solos ao nível orbital (ASTER)

Classes Solo ⁽¹⁾	Fator de Reflectância Médio							
	Banda 1 (560) ⁽²⁾	Banda 2 (660)	Banda 3 (810)	Banda 4 (1.650)	Banda 5 (2.165)	Banda 6 (2.205)	Banda 7 (2.260)	Banda 8 (2.330)
LA2	0,134A ⁽³⁾	0,134A	0,207AB	0,221ABC	0,187AB	0,192ABC	0,191ABC	0,186ABC
LA3	0,148A	0,147A	0,236AB	0,277ABC	0,212AB	0,220ABC	0,211ABC	0,201ABC
LA4	0,149A	0,151A	0,247AB	0,283ABC	0,216AB	0,226ABC	0,215ABC	0,206ABC
LV2	0,110A	0,117A	0,186B	0,200ABC	0,171AB	0,171ABC	0,170ABC	0,162ABC
LV3	0,112A	0,113A	0,191AB	0,197ABC	0,172AB	0,174ABC	0,176ABC	0,161ABC
LV4	0,123A	0,132A	0,221AB	0,238ABC	0,199AB	0,206ABC	0,205ABC	0,198ABC
LVA2	0,130A	0,136A	0,219AB	0,219ABC	0,176AB	0,177ABC	0,173ABC	0,166ABC
LVA3	0,147A	0,149A	0,240AB	0,272ABC	0,209AB	0,219ABC	0,212ABC	0,199ABC
LVA4	0,137A	0,142A	0,234AB	0,261ABC	0,213AB	0,220ABC	0,219ABC	0,212ABC
LVdf2	0,116A	0,127A	0,196AB	0,196BC	0,167AB	0,166ABC	0,164ABC	0,159BC
NV1	0,106A	0,105A	0,179B	0,177C	0,150B	0,152C	0,148C	0,143C
NV2	0,109A	0,113A	0,187AB	0,196ABC	0,160AB	0,160BC	0,157BC	0,149C
PVA2	0,115A	0,121A	0,198AB	0,217ABC	0,171AB	0,175ABC	0,174ABC	0,170ABC
PVA3	0,148A	0,149A	0,225AB	0,236ABC	0,190AB	0,196ABC	0,192ABC	0,185ABC
PVAL3	0,120A	0,118A	0,184B	0,201ABC	0,169AB	0,175ABC	0,176ABC	0,165ABC
PVAL4	0,113A	0,118A	0,185B	0,193BC	0,163AB	0,162ABC	0,159BC	0,157BC
PVAL5	0,145A	0,162A	0,263A	0,291AB	0,228A	0,241AB	0,248A	0,243A
PVL2	0,118A	0,124A	0,195AB	0,204ABC	0,177AB	0,180ABC	0,177ABC	0,171ABC
PVL3	0,106A	0,116A	0,191AB	0,185BC	0,169AB	0,164ABC	0,162ABC	0,158BC
RQ1	0,137A	0,148A	0,236AB	0,286AB	0,229A	0,242A	0,240AB	0,233AB
RQ2	0,147A	0,154A	0,251AB	0,304A	0,233A	0,243A	0,241AB	0,233AB

⁽¹⁾ Nomenclatura de acordo com Embrapa (1999). Os números que acompanham os nomes dos solos indicam as classes granulométricas

⁽²⁾ Comprimento de onda em nanômetros

⁽³⁾ Médias seguidas de uma mesma letra na coluna não diferem significativamente a 5% pelo teste de Tukey

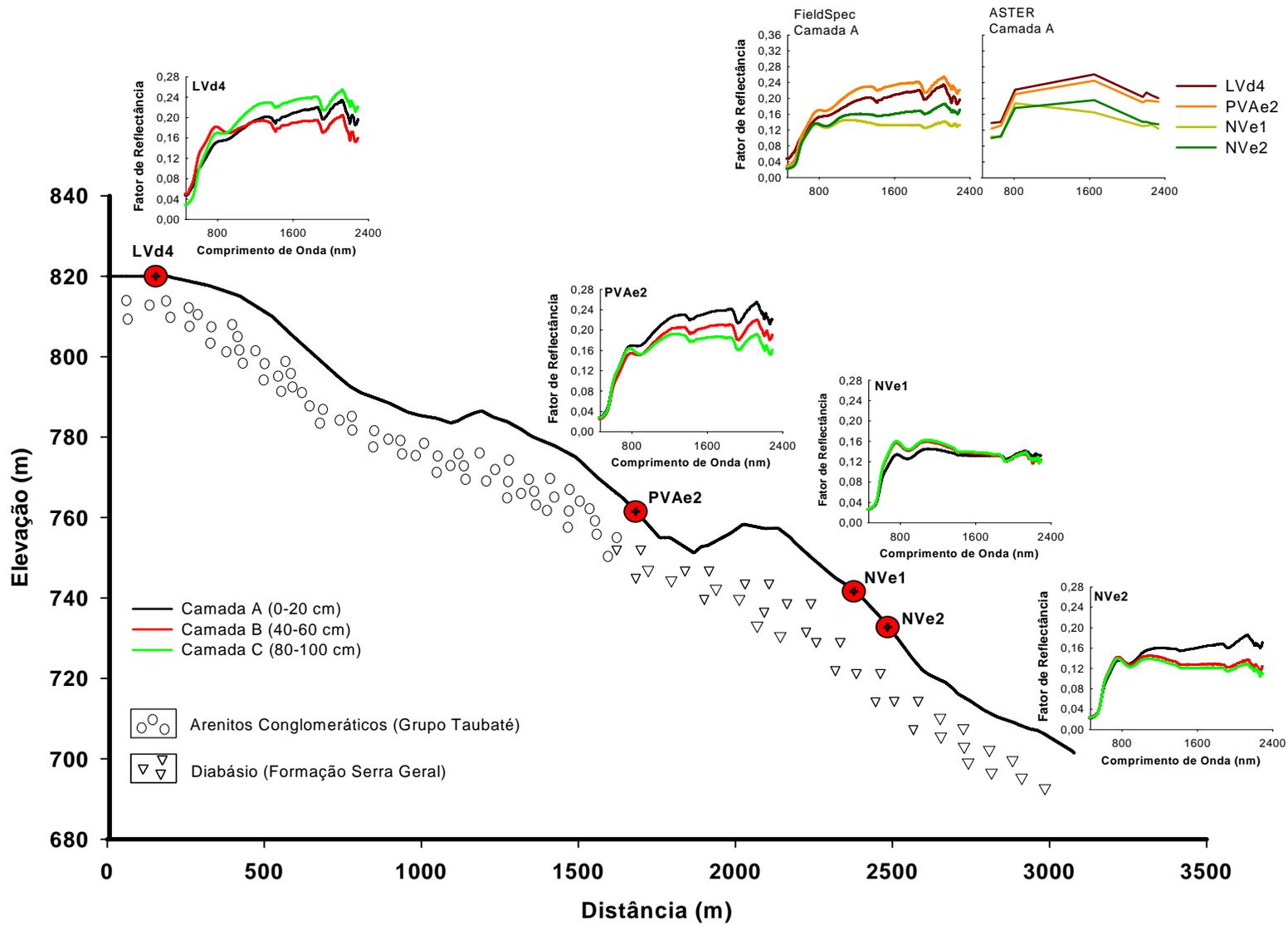


Figura 4 - Variabilidade espacial dos solos na Topossequência 1 da área de estudo

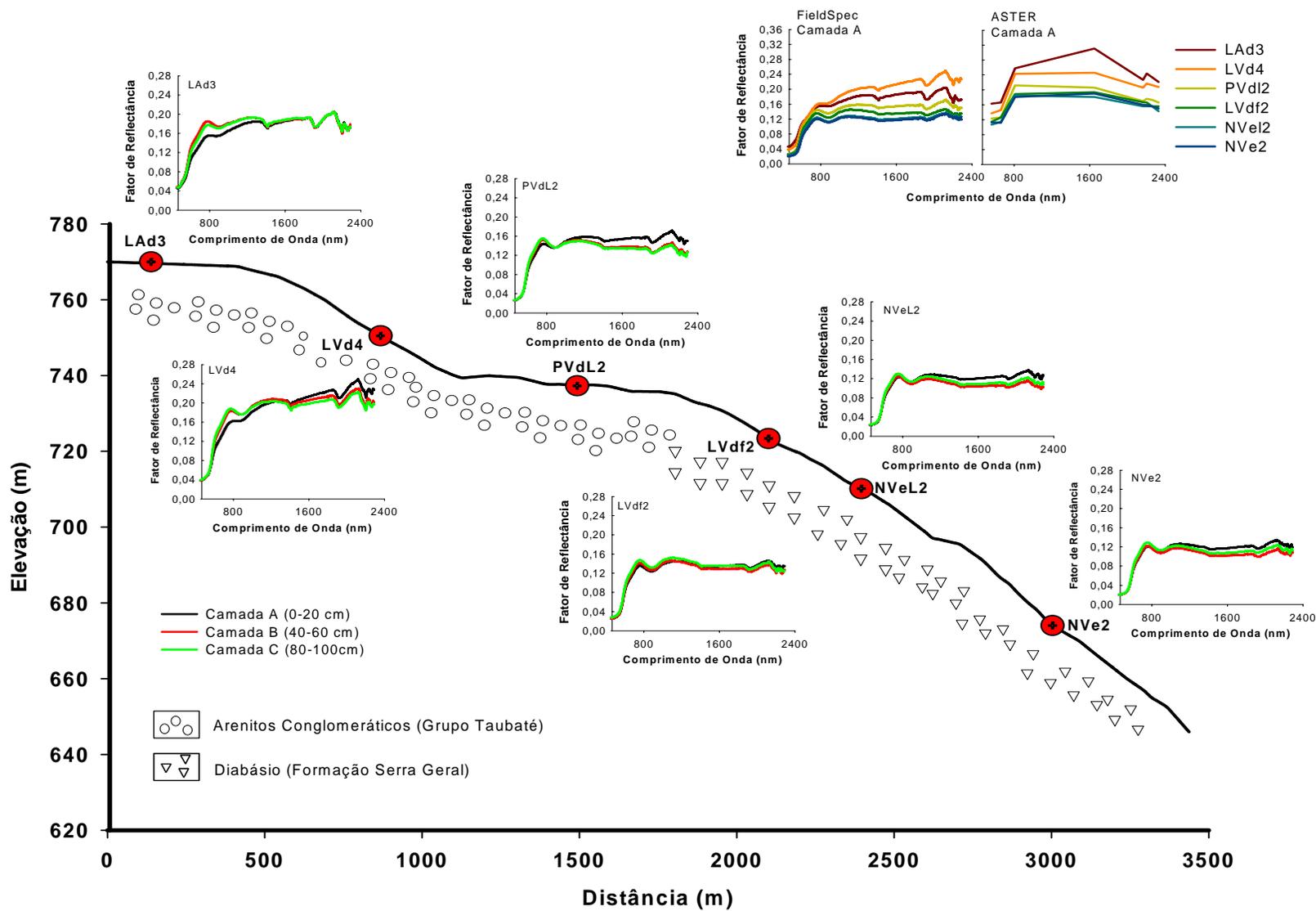
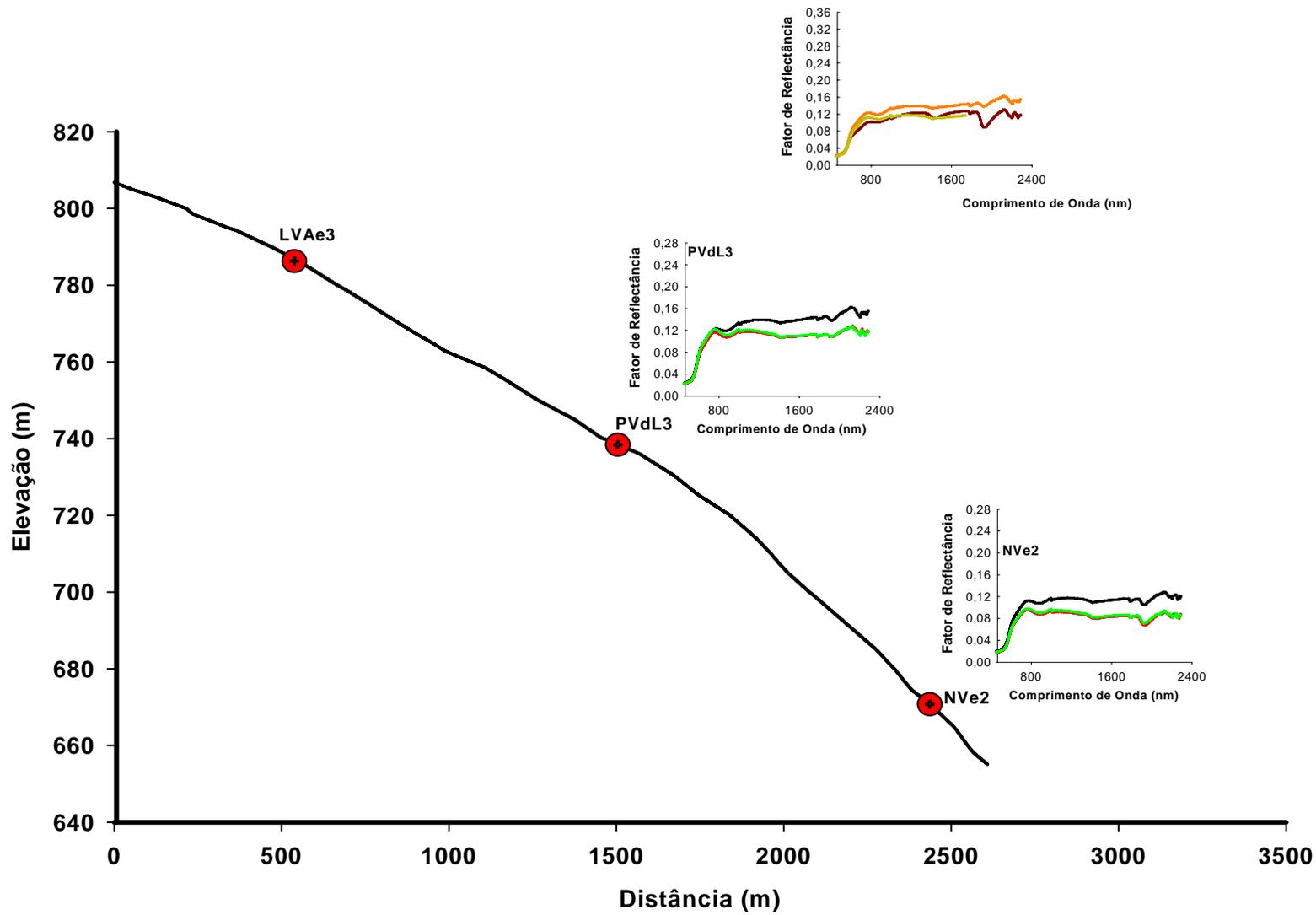


Figura 5 - Variabilidade espacial dos solos na Toposequência 2 da área de estudo



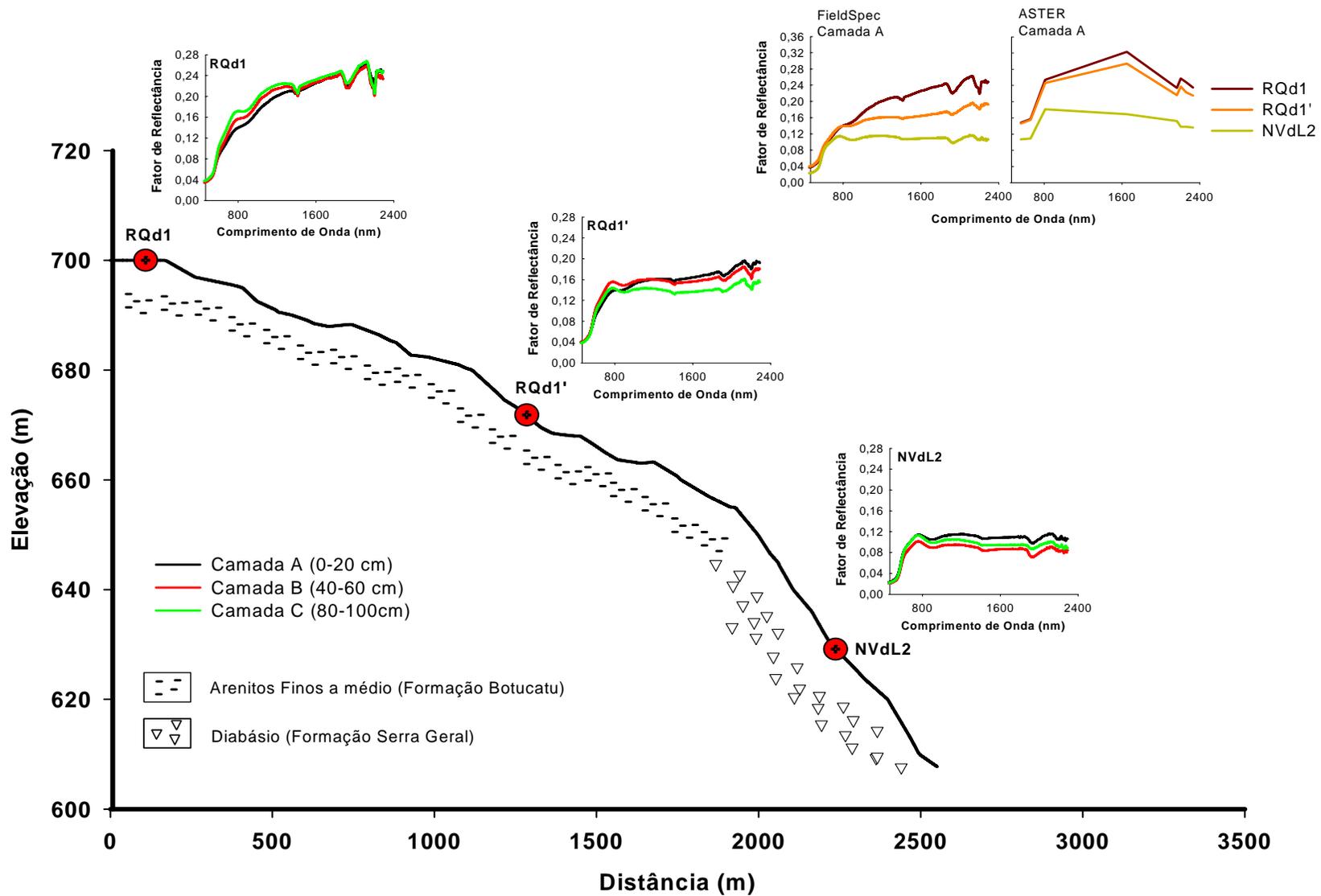


Figura 7 - Variabilidade espacial dos solos na Topossequência 4 da área de estudo

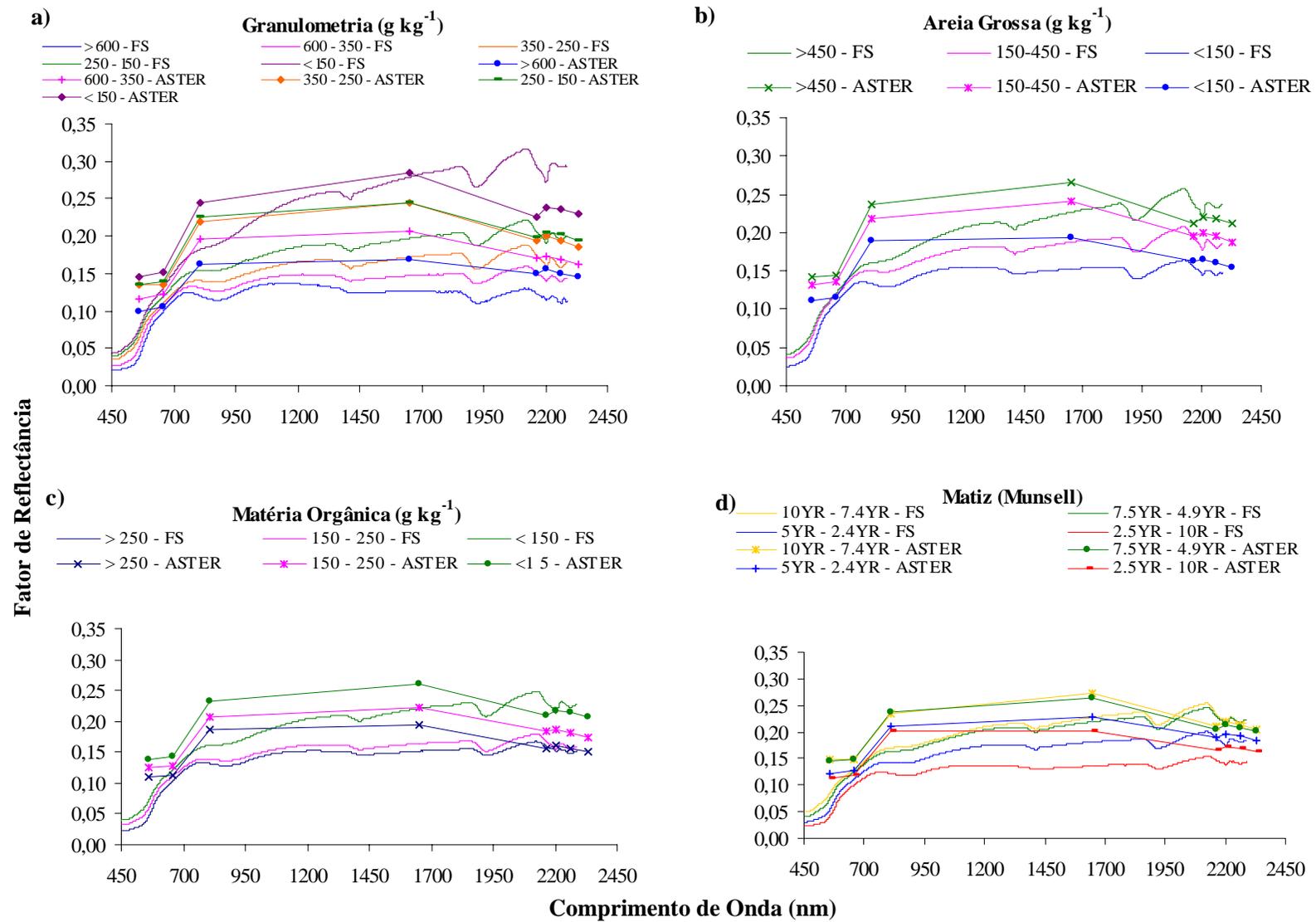


Figura 8 - Variação dos atributos do solo e sua reflectância orbital (ASTER) e terrestre (FieldSpec)

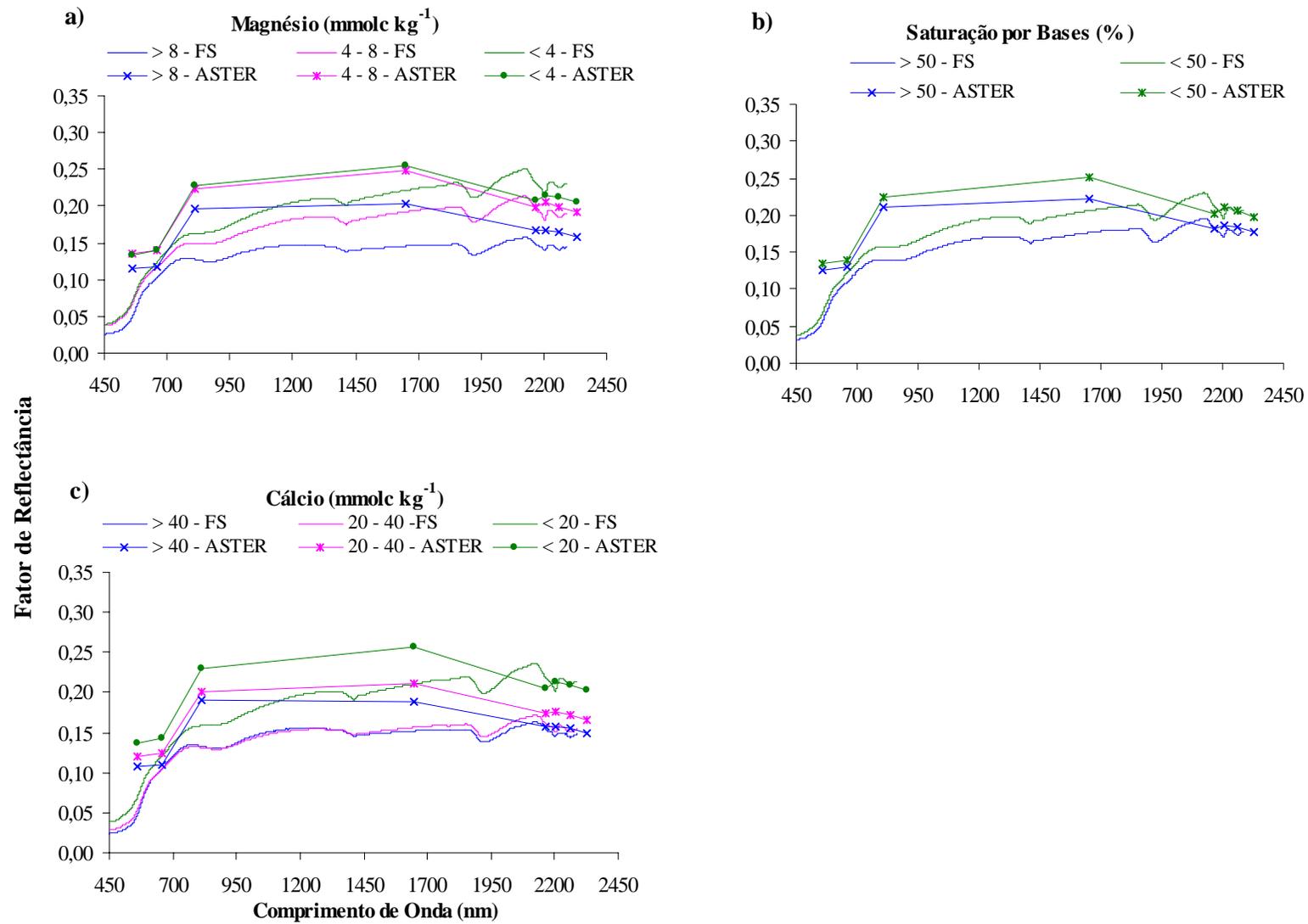


Figura 9 - Variação dos atributos do solo e sua reflectância orbital (ASTER) e terrestre (FieldSpec)

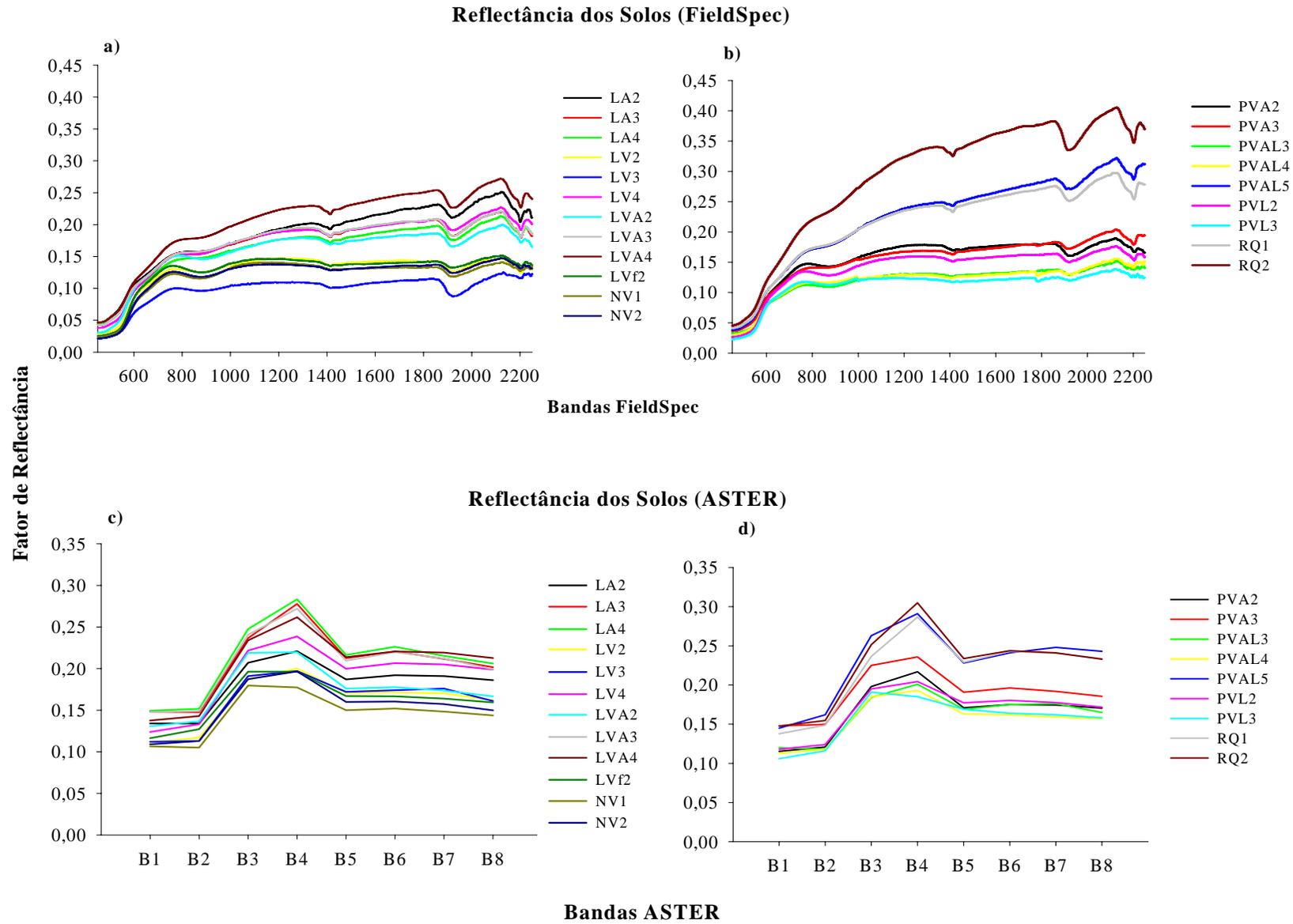


Figura 10 - Reflectância das principais classes de solo da área estudada obtida em dois níveis de aquisição, terrestre e orbital

Referências

- ABRAMS, M.; HOOK, S; RAMACHANDRAN, B. **ASTER user handbook**. 2nd ed. Pasadena: Jet Propulsion Laboratory, California Institute of Technology, 2002.135 p.
- AL-ABBAS, A.H.; SWAIN, P.H.; BAUMGARDNER, M.F. Relating organic matter and clay content to multispectral radiance of soils. **Soil Science**, Baltimore, v. 114, n. 6, p. 477-485, June 1972.
- ANALYTICAL IMAGING AND GEOPHYSICS. **Atmospheric correction now (ACORN) 3.12**. Boulder, 2001. 1 CD-ROM.
- BARNES, E.M.; BAKER, M.G. Multispectral data for mapping soil texture: possibilities and limitations. **Applied Engineering in Agriculture**, Michigan, v. 16, n. 6, p. 731-741, Nov. 2000.
- BARNES, E.M.; SUDDUTH, K.A.; HUMMEL, J.W.; LESCH, S.M.; CORWIN, D.L.; YANG, C.; DAUGHTRY, C.S.T.; BAUSCH, W.C. Remote and ground-based sensor techniques to map soil properties. **Photogrammetric Engineering & Remote Sensing**. Bethesda, v. 69, n. 6, p. 619-630, June 2003.
- BAUMGARDNER, M.F., KRISTOF, S.; JOHANNSEN, C.J.; ZACHARY, A. Effects of organic matter on the multispectral properties of soils. **Proceedings of the Indian Academy of Sciences (Earth and Planetary Sciences)**, Bangalore, v. 79, n. 4, p. 413-422, Dec.1970.
- BEN-DOR, E. Quantitative remote sensing of soil properties. **Advances in Agronomy**, San Diego, v. 75, p. 173-243, 2002.
- 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.
- BISTRICHI, C.A.; CARNEIRO, C.D.R.; DANTAS, A.S.L.; PONÇANO, W.L.; CAMPANHA, G.A.C.; NAGATA, N.; ALMEIDA, M.A.; STEIN, D.P.; MELO, M.S.; CREMONINI, O.A. **Mapa geológico do Estado de São Paulo**. São Paulo: Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo, 1981. 1 mapa, Escala: 1: 500.000.
- BOWERS, S.A.; HANKS, R.J. Reflectance of radiant energy from soils. **Soil Science**, Baltimore, v. 100, n. 2, p. 130-138, Feb. 1965.
- BULLOCK, P.; BRISCO, B.; HIROSE, T. Remote Sensing for improving crop management. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON GEOSPATIAL INFORMATION IN AGRICULTURE AND FORESTRY, 2., 2000, Lake Buena Vista. **Proceedings...** Lake Buena Vista: Erim, 2000. p. 487-494.

CÂMARA, G.; MEDEIROS, J.S.de. Princípios básicos em geoprocessamento. In: ASSAD, E.D.; SANO, E.E.(Ed.). **Sistema de informações geográficas: aplicações na agricultura**. Planaltina: EMBRAPA, 1998. cap. 1. p. 3-11.

CAMARGO, M.N.; KLANT, E.; KAUFFMAN, J.H. Classificação de solos usada em levantamentos pedológicos no Brasil. **Boletim Informativo**, Campinas, v. 12. n. 1, p. 11-13, jan./abr. 1987.

CAMPOS, R.C.; DEMATTÊ, J.A.M.; QUARTAROLI, C.F. Determinação indireta do teor de hematita no solo a partir de dados de colorimetria e radiometria. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 38, n. 4, p. 521-528, abr. 2003.

CHABRILLAT, S.; GOETZ, A.F.H.; KROSLEY, L.; OLSEN, H.W. Use of hyperspectral images in the identification and mapping of expansive clays soils and the role of spatial resolution. **Remote Sensing of Environment**, New York, v. 82, n. 2/3, p. 431-445, Oct. 2002.

COLEMAN, T.L.; MONTGOMERY, O.L. Soil moisture, organic matter and iron content effect on the spectral characteristics of selected Vertisols and Alfisols in Alabama. **Photogrammetric Engineering & Remote Sensing**, Bethesda, v. 53, n. 12, p. 1659-1663, Dec. 1987.

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**, Baltimore, v. 151, n. 5, p.355-361, May 1991.

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. **Reflectância espectral de solos**. 1999. 452 p. Tese (Livre- Docência) - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Universidade de São Paulo, Piracicaba, 1999.

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.; GARCIA, G.J. Alteration of soil properties through a weathering sequence as evaluated by spectral reflectance. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 63, n. 2, p. 327-342, Mar./Apr. 1999.

DEMATTÊ, J.A.M.; EIPHANIO, 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.; MORETI, 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.; DEMATTÊ, J.L.I.; CAMARGO, W.P.; FIORIO, P.R.; NANNI, M.R. Remote sensing in the recognition and mapping of tropical soils developed on topographic sequences. **Mapping Sciences & Remote Sensing**, Columbia, v. 38, n. 2, p. 79-102, Apr./June 2001.

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.

DEMATTÊ, J.A.M.; HUETE A.R.; FERREIRA JUNIOR. L.G.; ALVES M. C.; NANNI M.R.; CERRI C.E. Evaluation of tropical soils through ground and orbital sensors. In: INTERNATIONAL CONFERENCE OF GEOSPATIAL INFORMATION IN AGRICULTURE AND FORESTRY, 2., 2000, Lake Buena Vista. **Proceedings...** Lake Buena Vista: Erim, 2000. p. 34-41.

DRURY, S.A. **Image interpretation in geology**. 3rd ed. Cheltenham: Nelson Thornes, 2001. 290 p.

EMBRAPA. **Procedimentos normativos de levantamentos pedológicos**: normas em uso pelo SNLCS. Brasília: Serviço de Produção de Informação, 1995. 101 p.

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

ENVIRONMENTAL SYSTEMS RESEARCH INSTITUTE. **ARCGIS 8.3**. Redlands, 2000. 3 CD-ROM

EIPHANIO, J.C.N.; FORMAGGIO, A.R. Abordagens de uso de número digital e de reflectância em sensoriamento remoto com dados de satélites. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 5., Natal, 1988. **Anais...** São José do Campos: INPE, 1988. p. 400-405.

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. 131 p.

FELGUEIRAS, C.A.; CÂMARA, G. Modelagem numérica do terreno. In: CÂMARA, G.; DAVIS, C.; MONTEIRO, A.M.V.(Ed.). **Introdução a ciência da geoinformação**. São José dos Campos: INPE, 2005. cap.7, 38p. Disponível em: <<http://www.dpi.inpe.br/livros.html>>. Acesso em: 30 abr. 2005.

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, Jul./Aug. 2005.

FONTES, M.P.F.; OLIVEIRA, T.S.; COSTA, L.M.; CAMPOS, A.A.G. Magnetic separation and evaluation of magnetization of Brazilian soils from different parent materials. **Geoderma**, Amsterdam, v. 96, n. 1/2, p. 81-99, May 2000.

GALVÃO, L.S. **Litoestratigrafia de reflectância espectral e uma abordagem quantitativa para análise de espectros**. 1994. 191 p. Tese (Doutorado em Geofísica) - Instituto Astronômico e Geofísico, Universidade de São Paulo, São Paulo, 1994.

GALVÃO, L.S.; VITORELLO, I. Role of organic matter in obliterating the effects of iron on spectral reflectance and colour of Brazilian tropical soils. **International Journal of Remote Sensing**, London, v.19, n. 10, p. 1969-1979, July 1998.

HATCHELL, D.C. **ASD technical guide**. Boulder: Analytical Spectra Device, 1999. 140 p.

HENDERSON, T.L.; SZILAGYI, A.; BAUMGARDER, M.F.; CHEN, C.C.T.; LANDGREBE, D.A. Spectral band selection for classification of soil organic matter content. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 53, n. 6, p.1778-1784, Nov./Dec. 1989.

HOOK, S.J.; MYERS, J.J.; THOME, K.J.; FITZGERALD, M.; KAHLE, A.B. The MODIS/ASTER airborne simulator (MASTER) – A new instrument for earth science studies **Remote Sensing of Environment**, New York, v. 76, n. 1, p. 93-102, Apr. 2001.

HOUSSA, R.; PION, J.C.; YESOU, H. Effects of granulometric and mineralogical composition on spectral reflectance of soils in a Sahelian area. **ISPR Journal of Photogrammetry and Remote Sensing**, Amsterdam, v. 51, n. 6, p. 284-298, Dec.1996

HUETE, A.R.; ESCADAFAL, R. Assessment of biophysical soil properties through spectral decomposition techniques. **Remote Sensing of Environment**, New York, v. 35, n. 2-3, p. 149-159, Fev./Mar. 1991.

HUMMEL, J.W.; SUDDUTH, K.A.; HOLLINGER, S.E. Soil moisture and organic matter prediction of surface and subsurface soils using an NIR soil sensor. **Computers and Electronics in Agriculture**, Oxon, v. 32, n. 2, p. 149-165, Aug. 2001.

HUNT, G.R. Near-infrared (1.3-2.5 μm) spectra of alteration minerals – potential for use in remote sensing. **Geophysics**, Tulsa, v. 44, n. 12, p. 1974-1986, Dec. 1979

HUNT, G.R.; SALISBURY, J.W.; LENHOFF, C.J. Visible and near-infrared spectra of minerals and rocks: III Oxides and hydroxides. **Modern Geology**, New York, v. 1, p.195-205, 1971.

INSTITUTO DE CIÊNCIAS MATEMÁTICAS E DE COMPUTAÇÃO. Disponível em: <<http://www.icmc.usp.br/ambiente/saocarlos/geral.html>>. Acesso em: 08 nov. 2005.

KOSMAS, C.S.; CURI, N., BRYANT, R.B.; FRANZMEIER, D.P. Characterization of iron oxide minerals by second-derivate visible spectroscopy. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 48, n. 2, p. 401-405, Mar./Apr. 1984.

KRISHNAN, P.; ALEXANDER, J.D; BUTLER, B.J; HUMMEL, J.W. Reflectance technique for predicting soil organic matter. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 44, n. 6, p.1282-1285, Nov./Dec.1980.

LEMOS, R.C. de; SANTOS, R.D. dos. **Manual de descrição e coleta de solo no campo**. 3. ed. Campinas: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 1996. 84p.

LEPSCH, I.F.; BUOL, S.W. Investigation in an Oxisol-Ultisol toposequence in São Paulo State, Brazil. **Soil Science Society of America Journal**, v. 38, n. 3, p. 491-496, May/June 1974.

LINDBERG, J.D.; SNYDER, D.G. Diffuse reflectance spectra of several clay minerals. **American Mineralogist**, Washington, v. 57, n.3/4, p.485-493, Mar./Apr. 1972.

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 en Science du Sol) – Universite Pierre & Marie Curie, Université Paris VI, Paris, 1991.

MATHEWS, H.L; CUNNINGHAM, R.L; PETERSEN, G.W. Spectral reflectance of selected Pennsylvania soils. **Soil Science Society of America Proceedings**, Madison, v. 37, n. 2, p. 421-424, Mar./Apr. 1973.

MENESES, P.R.; MADEIRA NETTO, J.S. (Org.). **Sensoriamento remoto: reflectância dos alvos naturais**. Brasília: Editora UnB, EMBRAPA Cerrados, 2001. 262 p.

MONIZ, A.C.; BUOL, S.W. Formation of an Oxisol-Ultisol transition in São Paulo, Brazil: I. Double-water flow model of soil development. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 46, n. 6, p. 1228-1233, Nov./Dec. 1982.

MONTGOMERY, O.L. **An investigation of the relationship between spectral reflectance and chemical, physical and genetic characteristics of soil**. 1976. 148 p. Thesis (PhD in Soil Science) - Purdue University, West Lafayette, 1976.

- MOREIRA, A.M. **Fundamentos do sensoriamento remoto e metodologias de aplicação**. 2.ed. Viçosa: UFV, 2003. 307 p.
- MULLER, E.; DÉCAMPS, H. Modeling soil moisture – reflectance. **Remote Sensing of Environment**, New York, v. 76, n. 2, p. 173-180, May 2001.
- NATIONAL AERONAUTICS AND SPACE ADMINISTRATION. Disponíveis em: <<http://asterweb.jpl.nasa.gov>>. Acesso em: 31 jul. 2005.
- NOVO, E.M.L.M. **Sensoriamento remoto: princípios e aplicações**. 2. ed. São Paulo: Edgard Blücher, 1992. 308 p.
- OLIVEIRA, J.B. **Carta pedológica semi-detalhada do Estado de São Paulo: Folha de Brotas – SF 22-Z-B-III-4**. Campinas: Instituto Agrônômico, 1981a. 1 mapa. Escala 1:100.000.
- OLIVEIRA, J.B. **Carta pedológica semi-detalhada do Estado de São Paulo: Folha de São Carlos – SF 23-Y-A-I**. Campinas: Instituto Agrônômico, 1981b. 1 mapa. Escala 1:100.000.
- OLIVEIRA, J.B. **Carta pedológica semi-detalhada do Estado de São Paulo: Folha de Descalvado – SF 23-V-C-IV**. Campinas: Instituto Agrônômico, 1982. 1 mapa. Escala 1:100.000.
- OLIVEIRA, J.B.; JACOMINE, P.K.T.; CAMARGO, M.N. **Classes gerais de solos do Brasil**. Jaboticabal: FUNEP, 1992. 201 p.
- OLIVEIRA, J.B.; CAMARGO, M.N.; ROSSI, M.; CALDERANO FILHO, B. **Mapa pedológico de reconhecimento do Estado de São Paulo**. Campinas: Instituto Agrônômico de Campinas, 1999. 1 mapa. Escala 1:500.000
- PRADO, H. do. **Manual de classificação de solos do Brasil**. 2. ed. Jaboticabal: FUNEP, 1995. 197 p.
- RAIJ, B.van.; ANDRADE, J.C.; CANTARELLA, H.; QUAGGIO, J. A. **Análise química para avaliação da fertilidade de solos tropicais**. Campinas: Instituto Agrônômico, 2001. 285 p.
- RAIJ, B. van.; CANTARELLA, H.; QUAGGIO, J.A.; FURLANI, A.M.C. **Recomendações de adubação e calagem para o Estado de São Paulo**. 2. ed. Campinas, Instituto Agrônômico / Fundação IAC, 1997, 285 p. (Boletim técnico 100).
- RESEARCH SYSTEMS INC. **ENVI 4.1.**, 2004. Boulder, 2004. 2 CD-ROM.
- RESENDE, M.; CURTI, N.; KER, J.C.; REZENDE, S.B. **Mineralogia de solos brasileiros: interpretação e aplicações**. Lavras: Editora UFLA, 2005. 192 p.
- SABINS, F.F. **Remote sensing: principles and interpretations**. 3rd. ed. New York: W.H. Freeman and Company, 2000. 494 p.

SHERMAN, D.M.; WAITE, T.D. Electronic 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.

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

STONER, E.R. **Physicochemical, site and bi-directional reflectance factor characteristics of uniformly moist soils**. 1979. 132 p. Thesis (PhD in Soil Science) - Purdue University, West Lafayette, 1979.

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./Dec. 1981.

STONER, E.R.; BAUMGARDNER, M.F. Data acquisition through remote sensing. In: BEATTY, M.T. (Ed.). **Planning the uses and management of land**. Madison: American Society of Agronomy, 1986. p. 159-185.

STONER, E.R.; DERKSEN, I.; MACEDO, J. Discriminação espectral de Latossolos do Planalto Central brasileiro. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 26, n. 10, p. 1599-1606, out. 1991.

VIDAL-TORRADO, P.; LEPSCH, I.F. Morfogênese dos solos de uma topossequência com transição B latossólico/B textural sobre migmatitos em Mococa (SP). **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 17, p.109-119, 1993.

VITORELLO, I.; GALVÃO, L.S. Spectral properties of geologic materials in the 400 to 2500 nm range: Review for applications to mineral exploration and lithologic mapping. **Photo Interprétation**. Paris, v. 34, n. 2, p. 77-96, Oct. 1996.

ZHU, G.B.; BLUMBERG, D.G. Classification using ASTER data and SVM algorithms: the case study of Beer Sheva, Israel. **Remote Sensing of Environment**, New York, v. 80, n. 2, p. 233-240, May 2002.

3 MODELOS ESPECTRAIS TERRESTRES E ORBITAIS NA DETERMINAÇÃO DE TEORES DE ATRIBUTOS DOS SOLOS

Resumo

A crescente implantação da Agricultura de Precisão pelos produtores vêm aumentando a produtividade agrícola, no entanto, esta prática demanda um grande número de análises de terra e os resultados em tempo cada vez menor. Os métodos tradicionais de quantificação dos atributos do solo são complexos, caros, demandam tempo e geram grandes quantidades de resíduos químicos que podem vir a contaminar o meio ambiente. Desta forma, o uso da radiação eletromagnética por meio de sensores mostra-se como uma alternativa na solução destas questões. Neste sentido, o presente trabalho tem por objetivo estimar atributos químicos e granulométricos de solos da região de Ibaté e São Carlos, São Paulo, por meio de equações lineares de regressão múltipla geradas a partir da manipulação das informações eletromagnéticas refletidas e captadas por sensores instalados em laboratório e satélite. Neste trabalho também foi realizada uma análise da viabilidade econômica da utilização de sensores na quantificação de elementos do solo em comparação ao método convencional de análises de solo. Foram coletadas 319 amostras de terra, as quais foram georreferenciadas e analisadas quanto sua reflectância por sensor em laboratório (FieldSpec: 450-2500 nm) e orbital (ASTER). Foram elaborados modelos espectrais nos dois níveis de aquisição. Os modelos foram utilizados para determinar os teores de atributos de amostras de terra desconhecidas. A análise de tempo e custo considerou todo o sistema já previamente preparado para análise de terra. A partir dos resultados obtidos conclui-se que é possível quantificar determinados atributos do solo, como teor de argila ($R^2 = 0,69$) e areia ($R^2 = 0,53$) utilizando-se sua energia eletromagnética refletida e mensurada por sensor terrestre. O sensor orbital obteve bons resultados na predição da areia grossa ($R^2 = 0,45$) e areia total ($R^2 = 0,41$). Verificou-se que a análise de atributos do solo por sensores pode ser um método menos oneroso e mais rápido do que o método tradicional de análise de terra. A utilização do sensoriamento remoto apresentou a possibilidade de quantificar diversos atributos do solo com inúmeras vantagens, tais como: preparação mínima da amostra, análises rápidas, determinação simultânea de vários constituintes do solo, análise não destrutiva da amostra, não há utilização de reagentes químicos tóxicos ao ser humano e ao meio ambiente.

Palavras Chave: Sensor; Quantificação; Agricultura de precisão.

TERRESTRIAL AND ORBITAL SPECTRAL MODELS FOR THE DETERMINATION OF TROPICAL SOIL ATTRIBUTES

Abstract

The increasing in use of precision agriculture by farmers has been promoted changes in crop yields, but this practice demands a large number of soil chemical analysis and quick results. The traditional methods for soil attributes quantification are complex, expensive, and slow generating a large amount of chemical residues that can contribute to environmental contaminations. Thus, the use of electromagnetic radiation by sensors can be an alternative. The objective of this work was estimate chemical and granulometric attributes of soil from Ibaté and São Carlos, SP, through multiple linear regression equations generated with reflected electromagnetic information collect by sensors installed in laboratory and satellite. An analysis of the economic viability of the sensor utilization for soil attributes quantification was done in comparison with the conventional method for soil analysis. It was collected 319 soil samples and these points were georeferenced. The soil samples were evaluated by laboratory sensor (FielSpec: 450-2500 nm) and orbital image (ASTER). Spectral models were elaborated for both acquisition levels. The models were used to determine the attributes on unknown samples. The time and cost analysis considered the system used for soil analysis. The conclusion was that is possible to quantify some soil attributes, such as clay ($R^2 = 0.69$) and sand ($R^2 = 0.53$) content using the reflected electromagnetic energy measures by terrestrial sensor. The orbital sensor showed good results to predict coarse sand ($R^2 = 0.45$) e total sand ($R^2 = 0.41$). It was verified that the attributes analysis by sensors can be cheaper and faster than the traditional method one for soil analysis. The utilization of remote sensing showed the possibility to quantify many soil attributes with several benefits, i.e., minimum sample preparation, faster analysis, simultaneous determination of several soil constituents, indestructible soil sample analysis, no use of toxic chemical reagents to humans and environment.

Key words: Sensor; Quantification; Precision agriculture

3.1 Introdução

O desenvolvimento sustentável tem como um de seus alicerces o uso racional dos recursos naturais. No entanto, o equilíbrio entre qualidade ambiental e o aumento da produtividade depende, entre outros fatores, do planejamento agrícola, cuja base está no conhecimento da distribuição espacial das diversas classes de solos e, conseqüentemente de suas propriedades químicas, físicas e mineralógicas. A metodologia utilizada para se obter grande parte das informações necessárias a esta atividade, está relacionada às análises de solo.

A determinação dos atributos do solo realizada por análises tradicionais em laboratório, são as mais confiáveis considerando os anos de pesquisa e testes realizados para se chegar aos métodos padrões. Trata-se de métodos em que as amostras de terra coletadas no campo, passam por uma série de processos visando a determinação de sua constituição química e física. Porém, estes métodos tradicionais de quantificação dos atributos do solo são complexos, caros, demandam tempo, e geram grandes quantidades de resíduos químicos que podem vir a contaminar o meio ambiente. Estima-se que no Brasil o número de análises químicas de terra tenha atingido 1 milhão de amostras no ano de 2001, resultando em uma grande quantidade de reagentes gastos e resíduos produzidos (RAIJ et al., 2001) além da destinação inadequada deste material, alto custo e tempo.

A estimativa de atributos de solos é um desafio que vem sendo buscado por pesquisadores da área de sensoriamento remoto. Vários sistemas com este objetivo vêm sendo desenvolvidos e testados, buscando seu aperfeiçoamento. Desta forma, novas tecnologias vêm sendo desenvolvidas com intuito de auxiliar nos processos de tomada de decisão nos planejamentos agrícolas. Principalmente com a implantação da Agricultura de Precisão, na qual o número de amostras é maior e a necessidade de informações em tempo real é indispensável (THOMASSON et al., 2001). Dentre estas tecnologias temos o sensoriamento remoto. Neste aspecto foi desenvolvido o sistema denominado NIRA (Near-Infrared Analysis) ou NIRS (Near-Infrared Spectroscopy), baseado nas informações do infravermelho próximo, em laboratório, com o objetivo de avaliar a radiação eletromagnética relacionada aos aspectos químicos de materiais (STARK; LUCHTER; MARGOSHES, 1986). Esta metodologia foi desenvolvida há mais de 30 anos para uma rápida análise da umidade de grãos (BEN-GERA; NORRIS, 1968). Apesar de iniciado há anos atrás, o uso da aquisição remota de espectros da superfície terrestre aumentou

drasticamente na última década. Hoje os métodos do NIRA são aplicados em várias áreas: farmacêuticas, petroquímicas e outras indústrias (NORRIS, 1988; WORKMAN JUNIOR, 1996).

Análises de solo utilizando o NIRS têm sido pesquisadas para determinação da umidade do solo (LOBELL; ASNER, 2002), carbono orgânico, condutividade elétrica, capacidade de troca catiônica (CTC), pH, N, C, P, S, Ca, Mg, Na, K, Fe e Mn (BARNES et al., 2003; CHANG et al., 2001; DUNN et al., 2002; SHEPHERD; WALSH, 2002).

O espectro do NIR é influenciado principalmente pela estrutura física do material. O tamanho e a forma das partículas, os poros entre as partículas e o seu arranjo afetam a duração da transmissão da luz que passa através da amostra, influenciando na sua reflectância (WETZEL, 1983).

Em adição ao NIRA, Coleman et al. (1991), utilizaram desde o visível até o infravermelho para avaliação de características do solo, obtendo bons resultados na estimativa de matéria orgânica, argila e ferro. Ou seja, os métodos de estimativa baseiam-se em equações lineares múltiplas, que são constantemente calibradas em função da região de estudo e a faixa do espectro eletromagnético que se obteve das leituras das amostras (BEN-DOR et al., 2002).

As razões para utilização da radiação eletromagnética (REM) como um método analítico são várias: preparação mínima da amostra, análises rápidas, determinação simultânea de vários constituintes do solo, análise não destrutiva da amostra, não há utilização de reagentes químicos tóxicos ao ser humano e ao meio ambiente.

Alguns resultados obtidos mostram-se promissores (BARNES et al., 2003; CHANG et al., 2001; DUNN et al., 2002). Entretanto, muitas destas pesquisas envolvem um número limitado de amostras ou são provenientes de regiões com classes similares de solos. Sendo assim, para que a resposta espectral do solo possa ser utilizada como um método analítico de análise para fins comerciais, é necessário que vários tipos de solos em diferentes regiões sejam avaliados. Além disso, pouco se sabe sob as informações ao nível de satélite, sendo necessário o conhecimento ao nível terrestre.

Espera-se que, a partir da energia eletromagnética refletida pelo solo seus atributos possam ser estimados, uma vez que cada solo, como indivíduo, apresenta atributos diferenciadores, que por sua vez, podem alterar a energia eletromagnética refletida. Neste sentido, o presente trabalho tem por objetivo estimar atributos químicos e granulométricos de solos da região de Ibaté e São Carlos, SP por meio de equações lineares de regressão múltipla

geradas a partir da manipulação das informações eletromagnéticas refletidas e captadas por sensores instalados em laboratório (FieldSpec) e satélite (ASTER), comparando também o tempo e o custo financeiro com o método tradicional.

3.2 Desenvolvimento

3.2.1 Revisão de literatura

Os solos raramente são homogêneos, tanto lateralmente como em profundidade, e a noção de homogeneidade foi questionada com o avanço da agricultura de precisão (AP) que justamente trata o solo diferenciadamente em áreas relativamente pequenas (McBRATNEY; WHELAN; VISCARRA ROSSEL, 1996). Devido a diferença entre os solos, um método rápido, preciso e econômico é necessário para se obter informações ao longo da variabilidade espacial do solo.

A implementação da AP requer um grande número de análises de terra, que geralmente são realizados em malhas ou *grids*, elevando-se os custos de produção. Os métodos convencionais para determinação de alguns atributos do solo, são análises laboratoriais químicas e mineralógicas de custos elevados e que demandam tempo para se obter os resultados. Desta maneira, outras metodologias de análise do solo vêm sendo estudadas em várias partes do mundo.

A assinatura ou comportamento espectral do solo depende diretamente de sua composição química, física, biológica e mineralógica. E com o avanço no conhecimento das relações existentes entre reflectância espectral e os atributos do solo, pode-se prever, de maneira rápida, confiável e não invasiva, várias características químicas e físicas do solo, conforme constatado por Shepherd e Walsh (2002), que obtiveram uma ampla base de dados de reflectância espectral de solos e denominaram de bibliotecas espectrais.

As razões para utilização da radiação eletromagnética (REM) como um método de análise são vários: preparação mínima da amostra, análises rápidas, determinação simultânea de vários constituintes do solo, análise não destrutiva da amostra, não há utilização de reagentes químicos tóxicos ao ser humano e ao meio ambiente e os resultados podem ser muito precisos.

Coleman; Agbu e Montgomery (1993) estabeleceram modelos estatísticos para quantificar atributos do solo através da reflectância. Demattê e Nanni (2001), estabeleceram equações de regressão entre diversos atributos do solo e dados espectrais, tanto para sensor orbital quanto terrestre.

Dunn et al. (2002) demonstraram que o NIRS (near-infrared reflectance spectroscopy) pode determinar com sucesso alguns atributos do solo, tanto em superfície quanto em subsuperfície. Na superfície: CTC, Ca e Mg trocáveis, pH e a relação Ca:Mg. Em subsuperfície: CTC, Na, Ca e Mg trocáveis, pH e a relação Ca:Mg.

Nos últimos anos, o baixo custo e a alta velocidade da espectroscopia do NIR conduziu a seu uso difundido dentro das aplicações do sensoriamento remoto, e como um substituto viável para os laboratórios de rotina de análise de terra. Análises de terra utilizando-se o NIRS já foi pesquisada para determinação da umidade do solo, carbono orgânico, condutividade elétrica, CTC, pH, N, C, P, S, Ca, Mg, Na, K, Fe e Mn (BEN-DOR; BANIN 1995a; CHANG et al., 2001; DALAL; HENRY, 1986; MALLEY et al., 1999; MORRA; HALL; FREEBORN, 1991). Muitos desses resultados alcançados parecem promissores, porém muitas dessas pesquisas envolvem um número limitado de amostras, ou as amostras são provenientes de uma região de solos similares. Para se ter uma utilização difundida do NIRS, este tem que ser um método analítico que sirva para várias classes de solos com variações no seu conteúdo orgânico e inorgânico.

A espectroscopia tanto na faixa do infravermelho próximo quanto no médio permitem uma rápida aquisição de informações quantitativas e qualitativas do solo, que podem ser utilizadas tanto na agricultura como no monitoramento ambiental. Janik; Merry e Skjemstad (1998) descreveram como a análise da reflectância na faixa do infravermelho médio pode gerar resultados com acurácia comparável com métodos tradicionais de laboratório para análise de atributos do solo. Alguns exemplos seriam: estimar teor de carbono orgânico, cátions trocáveis, conteúdo de argila e indicadores biológicos.

Alguns autores dizem que o MIR (infravermelho médio) é superior ao NIRS (infravermelho próximo) na predição dos atributos do solo, alegando que o comprimento de onda que o MIR trabalha está mais fortemente relacionado com os grupos funcionais do solo e a matéria orgânica (MERRY; JANIK, 2001). Porém, o NIRS possui algumas vantagens sobre o MIR para análises de terra, o espectrômetro pode ser menor, mais barato e pode ser levado com facilidade para o campo, além de poder ser utilizado para outros fins (JANIK; MERRY; SKJEMSTAD, 1998).

Em estudo sobre a quantificação de atributos do solo a partir de técnicas de sensoriamento remoto, vários autores também vêm buscando respostas pelas análises de correlações entre atributos do solo e reflectância espectral (DEMATTE; GARCIA, 1999b; GALVÃO;

VITORELLO; FORMAGGIO, 1997). Da mesma forma, modelos de previsão de atributos dos solos têm apresentado alto potencial (BEN-DOR; IMBAR; CHEN, 1997; MORRA; HALL; FREEBORN, 1991).

Nanni e Demattê (2001a) utilizando equações lineares de regressão múltipla, estimaram valores de atributos dos solos com dados radiométricos em dois níveis de aquisição, laboratorial e orbital, sendo esses dados comparados com os valores determinados por análises químicas e físicas. Os resultados não apresentaram diferenças significativas, a 1% de probabilidade entre as médias dos valores estimados e valores determinados para conteúdo de argila, soma de bases e CTC.

Da mesma forma, Nanni e Demattê (2001b), implementaram uma metodologia que permitiu quantificar atributos do solo pelo sensor TM com alto grau de confiabilidade. Entretanto, destacam a necessidade de outros trabalhos contribuírem para verificação da repetitividade.

No Brasil, o interesse de pesquisadores pelo estudo do comportamento espectral de solos vem crescendo, sendo esta linha de estudo relativamente jovem e necessitada de suporte de pesquisa para melhor entendimento dos efeitos da interação da energia eletromagnética entre os diferentes componentes do solo.

3.2.2 Materiais e Métodos

3.2.2.1 Descrição da área de estudo

A área localiza-se no Estado de São Paulo, nos municípios de Ibaté e São Carlos. É delimitada pelas coordenadas geográficas 21°46' 55'' S / 48° 09' 42'' W e 22° 10' 08'' S / 47° 48' 33'' W (Anexos). Apresenta aproximadamente 16.000 ha cultivados com cana-de-açúcar em altitudes variando de 500 a 950 m do nível médio do mar. O clima da região, segundo Köppen, é do tipo Cwb (temperado com inverno seco), precipitação e temperatura média anual de 1000 a 1.800 mm e 20° C, respectivamente (ICMC, 2005).

A litologia é representada principalmente pelas formações Serra Geral, Botucatu e Pirambóia (Grupo São Bento) e Cobertura da Serra de Santana e Similares (Grupo Taubaté). As rochas da Formação Serra Geral são vulcânicas de derrames basálticos; a Formação Botucatu são arenitos eólicos; Formação Pirambóia constituídos de arenitos oriundos de depósitos fluviais e de

planícies de inundação (BISTRICHI et al., 1981) (Anexos). A vegetação primitiva está representada predominantemente por Cerrados e Cerradões, e por matas nas áreas onde os solos são argilosos e mais férteis.

Os principais solos que ocorrem na região são o Latossolo Vermelho e Vermelho Amarelo, Nitossolo Vermelho, Argissolo Vermelho e Neossolo Litólico (OLIVEIRA, 1981a, b, 1982; OLIVEIRA et al., 1999) (Anexos) conforme classificação da Embrapa (1999).

3.2.2.2 Seqüência de trabalho – Procedimentos metodológicos

A seqüência de trabalho é a seguir descrita.

Fase 1. Desenvolvimento da base de campo e do banco de dados

(a) Para ter uma representatividade dos solos da região foi elaborado um mapa pedológico semi-detalhado de acordo com Embrapa (1995). Além disso, para melhor detalhamento, foram compiladas informações de mapas pré-existentes como as cartas semi-detalhadas de Descalvado (OLIVEIRA, 1982), Brotas (OLIVEIRA, 1981a) e São Carlos (OLIVEIRA, 1981b) escala de publicação 1:100.000, mapa de reconhecimento de solos do Estado de São Paulo (OLIVEIRA et al., 1999) escala de publicação 1:500.000, carta planialtimétrica da região, com curvas de nível intercaladas de 5 em 5 metros (Anexos), e o mapa geológico de São Paulo (BISTRICHI et al., 1981) escala de publicação 1:500.000.

(b) Foi realizada fotointerpretação em fotografias aéreas escala 1:25.000, para visualização da rede de drenagem como auxílio na delimitação das paisagens. Foram alocados pontos para observação no campo pelo método da transeção (topossequências), tendo por objetivo identificar os limites de solos. Foram amostrados 319 pontos com trado em três profundidades 0-20, 40-60 e 80-100 cm, designadas de Camadas A, B e C, respectivamente (Anexos).

(c) As amostras foram analisadas quimicamente para determinar: pH (CaCl_2 , H_2O e KCl), teor de matéria orgânica, fósforo, potássio, magnésio, cálcio, alumínio e hidrogênio mais alumínio, segundo metodologia descrita em Raij et al. (2001) e, granulométricamente para determinar os

teores de areia (grossa e fina), silte e argila (CAMARGO; KLANT; KAUFFMAN, 1987). De posse destes resultados foram estabelecidos os limites reais entre as unidades de solos ao longo das toposseqüências. A classificação dos solos foi realizada seguindo os critérios estipulados pelo Sistema Brasileiro de Classificação de Solos (EMBRAPA, 1999). A cor do solo foi obtida úmida com colorímetro Minolta CR 300 para cor de Munsell, assim como em Campos; Demattê e Quartaroli (2003). Na determinação das cores pelo colorímetro temos matizes com valores decimais e contínuos, por isso foram determinados matizes intermediários para classificação dos solos, onde matizes mais amarelas que 6.2YR foram consideradas amarelas, matizes mais vermelhas que 6.2YR e mais amarela que 3.7YR foram consideradas vermelho-amarela e por fim, matizes mais vermelhas que 3.7YR considerou-se vermelha.

(d) Foi montado um banco de dados com informações do local como os limites dos solos de acordo com cartas semi-detalhadas e de reconhecimento de solos, hidrografia, imagem de satélite, pontos de amostragens, rios, curvas de nível, estradas e geologia. Associados aos pontos de tradagens foram incluídos os resultados das análises de terra em ambiente de Sistema de Informações Geográficas, SIG (ESRI, 2000).

Fase 2. Coleta de dados espectrais níveis, orbital (ASTER) e terrestre (FieldSpec)

(a) A coleta de dados espectrais foi feita em dois níveis, sensor terrestre FieldSpec (HATCHELL, 1999) e sensor orbital ASTER (Anexos).

(b) No nível orbital, foi utilizada uma cena do sensor ASTER (satélite TERRA), data de aquisição 05/09/2003 (ID: ASTL1B.003:2005566405) utilizando-se as bandas de 1 a 8, sendo (em nm): B1: 520-600, B2: 630-690, B3: 760-860, B4: 1.600-1.700, B5: 2.145-2.185, B6: 2.185-2.225, B7: 2.235-2.285 e B8: 2.295-2.365.

Conforme descrito por Epiphanyo e Formaggio (1988), a análise quantitativa de imagens digitais sobre o comportamento espectral de alvos deve ser feita com os dados em reflectância, por ser uma grandeza física intrínseca dos alvos, ao passo que os números digitais são valores transformados para a obtenção das imagens orbitais. Os valores de níveis de cinza devem ser transformados em reflectância e devidamente ajustados aos efeitos atmosféricos e posteriormente

os números digitais convertidos em valores de reflectância real. Para tanto, foi utilizado o programa Atmospheric Correction Now - ACORN (AIG, 2001) Após o processo de conversão e correção, o nível de cinza zero presente na imagem passou a corresponder à reflectância 0 % e o nível de cinza 10000, à reflectância 100 %.

Para adequar o posicionamento da imagem com a verdade de campo, a correção geométrica se faz necessária. Dessa forma, foram coletados pontos de controle na região de abrangência da área de estudo com um GPS Trimble PRO-XR, submétrico e pós-processado, de acordo com procedimentos descritos por Crósta (1992). Objetivando manter o valor do pixel o mais semelhante possível ao seu original, utilizou-se o método de interpolação do vizinho mais próximo, corrigindo apenas as distorções de escala, deslocamento ou rotação existentes entre a imagem e projeção terrestre (CRÓSTA, 1992). A correção geométrica foi realizada no software Environment for Visualizing Images – ENVI (RSI, 2004). O sistema de projeção e o Datum utilizados para localização e georreferenciamento foram UTM e SAD-1969, respectivamente.

Em locais de solo exposto nas imagens de satélite, foram extraídos os valores de reflectância de cada pixel ao longo das toposequências pré-estabelecidas. Nos pontos de amostragem locados foi avaliada sua informação espectral orbital (imagem). O procedimento de coleta espectral seguiu metodologia de Demattê et al. (2000).

(c) Para obtenção dos dados espectrais de laboratório, foi utilizado o sensor hiperespectral, FieldSpec Spectroradiometer (HATCHELL, 1999), que recobre a faixa espectral entre 450 e 2.500 nm com resolução espectral de 1 nm. As amostras da Camada A foram secas em estufa a 45°C por 24 horas, moídas e peneiradas (malha de 2 mm), para homogeneização dos efeitos da umidade e rugosidade (EPIPHANIO et al., 1992). Depois deste processo as amostras foram acondicionadas em placas de petri de 13,5 cm de diâmetro para serem feitas as leituras pelo sensor. Utilizou-se a placa padrão branca com 100 % de reflectância. Na geometria utilizada a amostra foi posicionada a 80 cm da fonte de iluminação (lâmpada halógena de 650 W) e 11 do alvo-sensor. Foi realizada a leitura espectral das amostras de terra retiradas dos mesmos pontos locados no campo e também avaliados pelo sensor orbital para comparação. A relação entre a energia refletida pelo alvo e a energia refletida pela placa de referência gerou o fator de reflectância bidirecional.

(d) Os dados espectrais obtidos com o FieldSpec em laboratório, permitem uma maior resolução espectral, podendo-se estabelecer um maior número de bandas. O sensor cobre um grande número de bandas o que torna difícil sua avaliação por completo. Nesse caso utilizou-se faixas espectrais sugeridas por Nanni e Demattê (2001b), sendo elas (nm): B1: 450-481, B2: 481, B3: 481-596, B4: 596-710, B5: 710-814, B6: 814-975, B7: 975-1350, B8: 1350-1417, B9: 1417, B10: 1417-1449, B11: 1449-1793, B12: 1793-1831, B13: 1865-1927, B14: 1927, B15: 1927-2102, B16: 2101-2139, B17: 2139-2206, B18: 2206, B19: 2206-2258, B20: 2258, B21: 2258-2290 e 12 alturas (H), sendo elas(nm): H1: 469-532, H2: 532-768, H3: 768-876, H4: 876-1353, H5: 1353-1411, H6: 1411-1439, H7: 1439-1783, H8: 1860-1923, H9: 1923-2120, H10: 2120-2206, H11: 2206-2258, H12:2258-2290. Essa seleção baseia-se em observações empíricas e em literatura. Posteriormente é utilizado um sistema automatizado estatístico para determinação das melhores bandas e/ou melhores alturas.

(e) Foi realizada análise de correlação (r) entre os atributo do solo e os dados espectrais de cada banda do sensor ASTER e as bandas simuladas para os mesmos comprimentos de onda das bandas do ASTER a partir dos dados radiométricos do FieldSpec. Utilizando o sistema de regressão linear múltipla, STEPWISE (ROBBINS; DANEMAN, 1999), através do programa *Statistical Analysis System* (SAS, 1999), foram correlacionados 19 atributos do solo: areia grossa, areia fina, areia total, silte, argila, pH em H₂O, pH em KCl, pH em CaCl₂, matéria orgânica, fósforo, cálcio, magnésio, hidrogênio mais alumínio, alumínio, soma de bases, CTC, saturação por bases e por alumínio com as leituras espectrais das 8 bandas do sensor ASTER.

(f) Foram gerados modelos que estimam os teores destes atributos do solo, conforme sua reflectância em cada uma das bandas do sensor ASTER. Para este sensor foram utilizadas 36 amostras de reflectância de pixels para gerar os modelos do sensor orbital, sendo outras 72 amostras para validação. A escolha dos pontos para gerar os modelos foi aleatória, porém, representativa de toda a área de estudo. A quantidade de pontos a ser utilizada foi em função de testes preliminares, onde foram elaborados modelos com 35%, 50% e 75% dos pontos, não obtendo grandes diferenças na qualidade dos modelos, optando-se pela utilização do menor número de pontos.

(g) Desta mesma forma, foram gerados modelos para os dados de reflectância coletados pelo sensor de laboratório, utilizando-se as 21 bandas e 12 alturas determinadas a partir das leituras das amostras da camada A (0-20 cm), e da camada B (40-60 cm), do solo (do mesmo ponto onde foram coletadas as informações pelo sensor orbital). Para o sensor terrestre procedeu-se da seguinte forma. As leituras espectrais foram obtidas a partir de amostras de terra coletadas no campo, em duas profundidades, 0-20 e 40-60 cm (Camada A e B respectivamente). Estes pontos de amostragens foram situados nos mesmos locais de onde foram coletadas as informações espectrais pelo sensor orbital, através da leitura de pixels. Foram utilizadas 72 amostras para gerar os modelos e outras 144 para validação.

(h) Para validação dos modelos, foram estimados os teores dos atributos do solo a partir das equações geradas para ambos os sensores (ASTER e FieldSpec). Para tanto, leituras espectrais das amostras de terra com teores desconhecidos tiveram suas concentrações estimadas pelos modelos. Posteriormente, comparou-se por regressão simples os valores estimados e os valores determinados pela análise convencional de laboratório da amostra desconhecida.

(i) Comparação de custo e tempo: Foi realizado um estudo comparativo entre o método tradicional e o espectrométrico de análise de solo, baseado exclusivamente nos equipamentos e produtos utilizados.

Para melhor compreensão da metodologia descrita, foi elaborado um fluxograma com as principais etapas desenvolvidas (Figura 1).

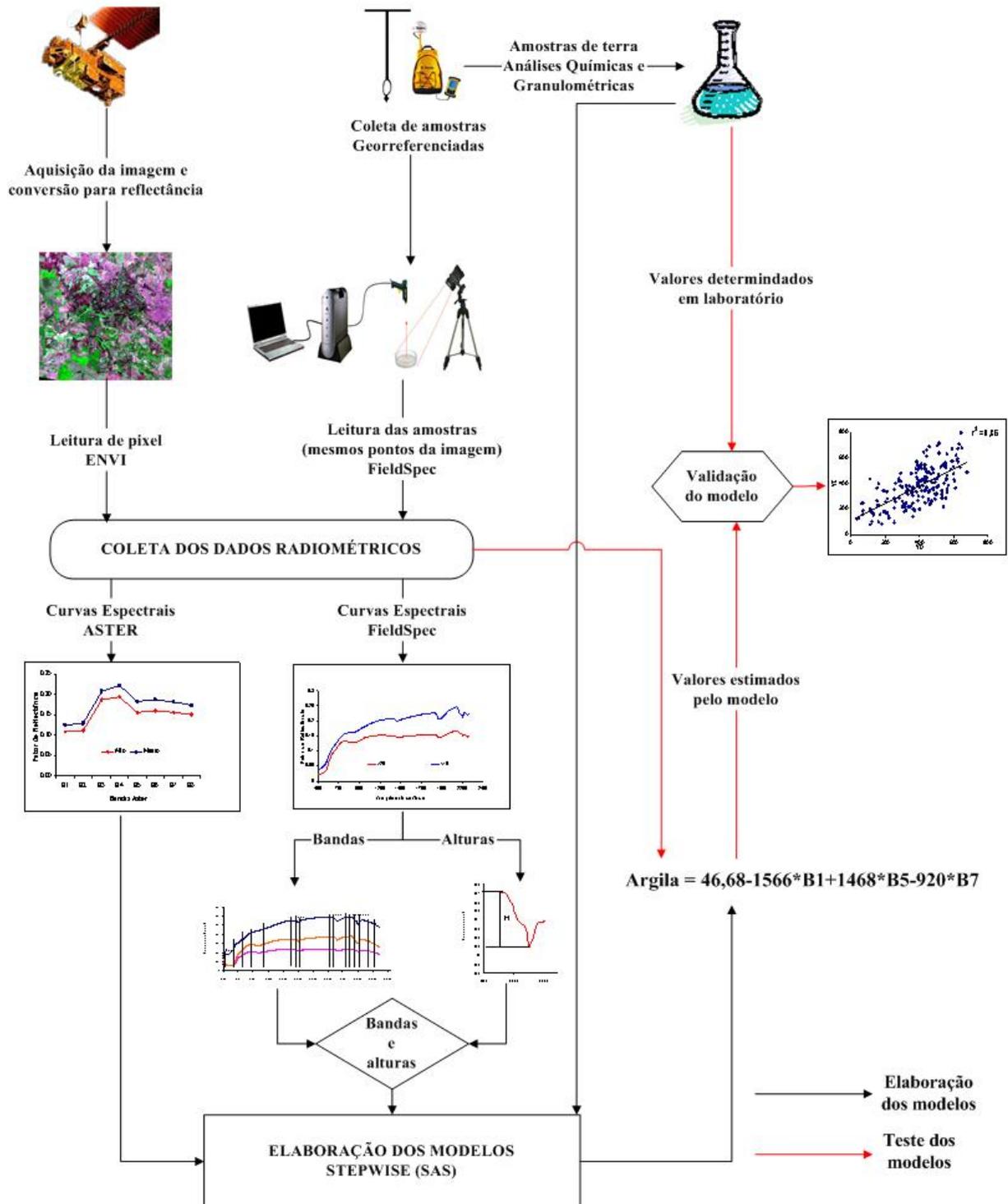


Figura 1 - Fluxograma representativo dos procedimentos adotados para estabelecimento das equações de regressão múltiplas para estimativa dos atributos dos solos estudados e teste para avaliação das equações geradas

3.2.3 Resultados e Discussão

3.2.3.1 Características analíticas

A caracterização do local de estudo se faz necessária para situar a variabilidade dos teores dos diferentes atributos dos solos ocorrentes na área trabalhada. Observa-se (Tabela 1), que o coeficiente de variação (CV) apresentou valores elevados, como por exemplo o silte (CV = 117,79), demonstrando a grande variabilidade dos dados presentes e refletindo a heterogeneidade da área. Apenas os valores de pH não apresentaram grandes variações. Das 111 amostras analisadas, setenta e cinco apresentaram tanto em superfície quanto em subsuperfície conteúdos de argila menores que 350 g kg^{-1} , possuindo textura arenosa e média (EMBRAPA, 1999). A área apresentou variação no teor de argila de $79,0$ a $745,0 \text{ g kg}^{-1}$ na superfície (camada A) e média de $271,8 \text{ g kg}^{-1}$. Em subsuperfície (camada B) o valor mínimo foi de $87,0 \text{ g kg}^{-1}$, o máximo de $646,0 \text{ g kg}^{-1}$ e uma média de $283,5 \text{ g kg}^{-1}$. A média mais elevada de argila na camada B pode ser resultado da grande quantidade de solos com gradiente textural, resultando em acúmulo relativo de argila em subsuperfície.

O teor médio de matéria orgânica (MO) para a área foi de $15,27$ e $10,22 \text{ g kg}^{-1}$ para superfície e subsuperfície, respectivamente (Tabela 1). Deve-se ressaltar que, a maior variação de MO em superfície pode ser atribuída às diferentes práticas de manejo aplicadas à cultura da cana-de-açúcar, tais como colheita de cana crua ou de cana queimada (mecanizada e manual respectivamente), aplicação de torta de filtro e vinhaça.

Quimicamente, a área apresentou médias superiores de cátions trocáveis e fósforo na camada superficial. A ação antrópica no sistema, com processos de calagem para correção da acidez, elevação da saturação por bases e adubações de correção, foram responsáveis por essas diferenças. Apesar disto, a saturação por bases apresentou valor médio inferior a 50% tanto em superfície quanto em subsuperfície. A CTC foi bastante variável, decorrente da variação dos teores de matéria orgânica e de argila. A saturação por alumínio também apresentou CV elevado em ambas as camadas analisadas, em função da grande variação dos teores de alumínio (Tabela 1).

3.2.3.2 Correlação entre os atributos do solo e reflectância obtidas por sensor terrestre (FieldSpec)

As análises de correlação podem indicar como cada atributo do solo influencia na reflectância. Nesse caso o parâmetro pode mostrar qual ou quais bandas são as mais influentes ou significativas.

Os resultados da correlação entre os atributos do solo estudados e sua reflectância para cada banda (simuladas do sensor ASTER) obtidas pelo sensor FieldSpec (Tabela 2), denotam que as características granulométricas do solo apresentaram os melhores coeficientes de correlação (r).

A argila obteve os maiores coeficientes de correlação negativa com a reflectância do solo ($r = -0,70$; $-0,68$, $-0,67$ e $-0,64$), enquanto que a areia total resultou nos maiores coeficientes positivos ($r = 0,66$; $0,65$ e $0,62$). Estes atributos apresentam maiores influências nos comprimentos de onda referentes às bandas 4, 5, 6 e 7 (Tabela 2). De maneira geral, solos de textura arenosa tendem a apresentar maior reflectância, devido à sua constituição mineralógica (rica em quartzo) (RESENDE et al., 2005) e ao fato de geralmente apresentarem baixos teores de matéria orgânica, óxidos de ferro e menores teores de água (MENESES; MADEIRA NETTO, 2001). Concordando com Al-Abbas; Swain e Baumgardner (1972), solos argilosos, com granulometria mais fina que os arenosos refletem menos gerando coeficientes negativos. De uma maneira geral, solos de textura arenosa tendem a ter maior intensidade de reflectância, devido sua constituição mineralógica (geralmente rica em quartzo) (RESENDE et al., 2005), aos baixos teores de matéria orgânica e óxidos de ferro.

A areia fina e grossa resultaram em coeficientes de correlação similares entre as bandas, havendo um aumento nas bandas 4, 5, 6 e 7 (Tabela 2). Quando analisada separadamente, cada uma das frações da areia, observa-se que a areia grossa resultou em maiores coeficientes em quase todas as bandas, exceto a 2 e 3.

Os resultados das correlações apresentadas mostram que a matéria orgânica também possui uma grande influência no comportamento espectral dos solos, resultando em uma correlação negativa significativa em todas as bandas avaliadas (coeficiente médio, $-0,45$). Dalmolin (2002) e Demattê e Garcia (1999a), observaram aumento na resposta espectral dos solos quando houve um decréscimo dos teores de matéria orgânica, concordando com Formaggio

et al. (1996). Normalmente a MO do solo é classificada em três categorias gerais: huminas, ácidos fúlvicos e ácidos húmicos. Cada um desses constituintes da MO mostram características diferentes de reflectância. Os ácidos húmicos mostram reflectância muito baixa (2 %) em todo o espectro devido ao grande número de constituintes moleculares que absorvem no visível, como os compostos fenólicos e seus produtos de oxidação, os aminoácidos, etc.

Os elementos cálcio e magnésio e conseqüentemente a Soma de Bases (SB) e a CTC apresentaram índices de correlação na faixa de 0,40 com a reflectância dos solos. Os resultados indicam uma correlação negativa para estes atributos, isto é, quanto maiores os teores destes atributos no solo menor será sua energia refletida, opondo-se aos resultados obtidos por Demattê et al. (2003). Estes autores verificaram o aumento na reflectância dos solos onde foram realizadas calagens, promovendo um aumento nos teores de cálcio no solo. Como se trata de um elemento químico de baixa influência na energia refletida sua influência pode gerar controvérsias.

O pH do solo (em H₂O, KCl e CaCl₂), saturação por alumínio e por bases e os elementos: P, K e Al, apresentaram correlações muito baixas ou não significativas ao nível de 5% de probabilidade (Tabela 2). Estes resultados discordam dos obtidos por López-Granados et al. (2005), que para correlação entre pH e a reflectância do solo encontraram um coeficiente de 0,30 na região do azul e 0,25 na região do verde e do vermelho. Porém, estes mesmos autores, não conseguiram coeficientes significativos para o P na região do visível, concordando com o presente trabalho.

3.2.3.3 Correlação entre os atributos do solo e reflectância obtidas por sensor orbital (ASTER)

Os resultados da correlação entre os atributos do solo estudados e sua reflectância para cada banda do sensor ASTER (Tabela 3), denotam que as características granulométricas do solo (areia grossa, fina e total, silte e argila) apresentaram os maiores coeficientes de correlação (r).

A argila, assim como no sensor FieldSpec, obteve os maiores coeficientes de correlação negativa com a reflectância do solo ($r = -0,67$; $-0,66$; $-0,63$ e $-0,62$) e a areia total os maiores coeficientes positivos ($r = 0,69$; $0,67$ e $0,66$). Estes atributos influenciaram mais nos comprimentos de onda referentes às bandas B4, B5, B6, B7 e B8 (Tabela 3). Quando analisada separadamente cada uma das frações da areia, observa-se que a areia grossa apresentou

coeficientes de correlações maiores do que a areia fina em todas as faixas do espectro estudado. Estes valores foram superiores aos encontrados por Barnes e Baker (2000), que testando vários sensores orbitais (Landsat TM, SPOT e AVIRIS), obtiveram as melhores correlações tanto positivas quanto negativas para as bandas do TM. As correlações negativas foram para a argila, -0,56; -0,52; -0,49 e -0,42 bandas 7, 5, 4 e 3 respectivamente. As melhores correlações positivas encontradas por estes autores foram para a areia, 0,57; 0,52; 0,49 e 0,46 bandas 7, 5, 4 e 3, respectivamente. Segundo os autores, isto ocorre porque as áreas mais arenosas tendem a apresentar menor conteúdo de MO, causando maiores valores de reflectância para tais áreas.

A areia possui correlação positiva com a reflectância, enquanto o silte e a argila geralmente mostram uma correlação negativa. As áreas com maiores teores de areia tendem a ter um maior brilho aparente, pois na fração areia o quartzo é o mineral dominante (RESENDE et al., 2005), além disso, estes solos possuem um baixo teor de conteúdo orgânico, contribuindo ainda mais para o aumento de sua reflectância, concordando com os dados apresentados por Barnes e Baker (2000).

A MO também apresentou altos índices de correlação negativa, como -0,63; -0,61 e -0,60 para as bandas B8, B7 e B6, respectivamente, devido a grande influência da matéria orgânica no comportamento espectral dos solos (DALMOLIN, 2002). Al-Abbas; Swain e Baumgardner (1972), também chegaram a resultados semelhantes, afirmando haver correlação negativa entre a energia refletida pelo solo e o teor de MO.

A CTC, a SB e os cátions Ca e Mg resultaram em índices de correlações maiores do que a saturação por bases e alumínio, e dos elementos P e H + Al. Dunn et al. (2002) explicam que a CTC não possui uma resposta primária à região do infravermelho mas sua correlação com o teor de argila e MO pode explicar esta boa correlação. De forma similar, a existência de uma alta correlação entre CTC e Ca + Mg pode explicar a correlação entre Ca e Mg e a reflectância.

Pode-se observar (Tabelas 2 e 3) que para todos os elementos testados há uma tendência de maior coeficiente de correlação com as bandas de maior comprimento de onda do espectro eletromagnético, principalmente para areia, silte e argila, tanto para o sensor FieldSpec como para o sensor ASTER. Estes dados concordam os obtidos por Barnes e Baker (2000), que analisando diversos sensores (Landsat TM, SPOT, AVIRIS) encontraram coeficientes de correlação altamente significativos entre as bandas destes sensores e os atributos granulométricos do solo (areia, silte e argila). Estes autores também notaram que o valor de r tende a aumentar em

magnitude com o aumento do comprimento de onda (exceto para a banda do termal) para todos os sensores. Estes fatos podem ser explicados pelo aumento do número de constituintes do solo que interferem significativamente na sua reflectância, conforme aumenta-se o comprimento de onda. Um exemplo é a banda 6 (2.185-2.225 nm), que teve uma alta correlação negativa para ambos sensores estudados devido a absorção da caulinita (2.205 nm) (HUNT; SALISBURY; LENHOFF, 1971; MENESES; MADEIRA NETTO, 2001). O mesmo é observado na banda 7 (2.235-2.285), que teve uma correlação ainda maior, devido a absorção da energia eletromagnética pela presença da gibbsita (2.265 nm). Este mineral ocorre em grandes quantidades nos solos do Brasil, solos que foram submetidos a forte intemperismo, como os Latossolos, localizados nas antigas superfícies de erosão (MENESES; MADEIRA NETTO, 2001).

3.2.3.4 Quantificação de solos por modelos espectrais obtidos por sensor de laboratório

Verificou-se que as equações geradas para os atributos estruturais do solo, como areia grossa, fina e total, silte, argila apresentaram altos coeficientes de determinação (Tabela 4). As equações da areia grossa, areia total e argila apresentaram coeficientes de determinação maiores que 0,69 (Tabela 4), concordando com Demattê e Garcia (1999a) com R^2 de 0,8 para argila e Nanni e Demattê (2001b) com R^2 de 0,91 para argila e 0,74 para areia na superfície. Ressalta-se que o coeficiente 0,56 obtido para o silte é considerado satisfatório quando comparado com os resultados obtidos por Nanni & Demattê (2001b) que obtiveram para este mesmo elemento um R^2 de 0,27, Demattê e Garcia (1999b) $R^2 = 0,33$ e Fiorio (2002) obteve um R^2 muito próximo ao obtido neste trabalho ($R^2 = 0,56$).

Coefficientes de determinação mais significativos que os obtidos no presente trabalho foram observados por Janik; Merry e Skjemstad (1998) com 0,94 para areia e 0,79 para argila, assim como por Fiorio (2002) para solos da região de Barra Bonita, com 0,85 para argila.

Para a MO os resultados não foram satisfatórios apresentando coeficiente de determinação de 0,37 (Tabela 4). Ben-Dor e Banin (1995b) verificaram R^2 de 0,5 para MO, porém comentam que durante a predição desses atributos deve-se levar em conta o tipo de MO (estágio de degradação). Barnes et al. (2003), afirma que a MO tem sido correlacionada com a reflectância do solo por diversos pesquisadores. Sudduth e Hummel (1993) desenvolveram um

espectrorradiômetro portátil para obter a reflectância do solo na região do infravermelho-próximo, obtendo resultados satisfatórios a respeito dos teores de MO em uma ampla faixa de solos com diferentes umidades.

Para os atributos químicos, os coeficientes de determinação das equações do Mg e CTC foram 0,40 e 0,50 (tabela 4) respectivamente e mais baixos quando comparados com os dados apresentados por Nanni e Demattê (2001b), onde o R^2 para CTC foi de 0,90.

Objetivando verificar a possibilidade da utilização das equações geradas nesse trabalho, na predição dos atributos dos solos, metade das amostras da área não foram utilizadas para gerar os modelos. Os dados espectrais dessas amostras foram utilizados para testar os modelos, obtendo-se os valores estimados (VE), os quais foram comparados com os valores determinados (VD) em laboratório de análises de solos. Foram realizadas análises de correlação entre os VD e VE para os atributos testados, eliminando-se alguns pontos extremos “outline”, neste trabalho foram apresentados os resultados dos atributos que obtiveram os melhores coeficientes (Figura 2).

Verifica-se que os maiores valores para o coeficiente de correlação (R^2) são para areia total (0,53) (Figura 2b) e argila (0,69) (Figura 2c). Ben-Dor e Banin (1995a) obtiveram um R^2 para argila de 0,56, Fiorio (2002) obteve coeficientes de 0,84 para areia e 0,83 para argila corroborando o potencial dessa metodologia na predição de determinados atributos do solo. Para a areia grossa também se obteve resultados satisfatórios com um coeficiente de determinação de 0,46 (Figura 2a).

A predição dos elementos químicos, tais como, Ca (Figura 2e), Mg, P, K, Al e pH do solo, obtiveram coeficientes significativos, porém de baixa expressão, em desacordo com Dunn et al. (2002) que obtiveram um R^2 de 0,72 para K em solos da região do sul da Austrália. Outros pesquisadores também encontraram um R^2 superior a 0,60 para este mesmo elemento (CHANG et al., 2001; CONFALONIERI et al., 2001; SHEPHERD; WALSH, 2002). Para CTC verificou-se um valor de 0,25 (Figura 2f), diferente daqueles obtidos por Nanni e Demattê (2001a) onde o R^2 para CTC foi de 0,90 e Fiorio (2002) que obteve um R^2 de 0,66. Estes autores, no entanto, utilizaram imagens Landsat.

Nanni (2000) obteve valores expressivos para a quantificação de matéria orgânica, R^2 de 0,79, bem superior ao obtido no presente trabalho com R^2 de 0,26 (Figura 2d). Demattê e Garcia (1999b) também obtiveram baixa correlação para MO (0,45).

3.2.3.5 Quantificação de solos por modelos espectrais obtidos por sensor de orbital

Os atributos granulométricos do solo apresentaram os maiores coeficientes de determinação sendo eles para argila (0,56), areia total (0,52) e grossa (0,41) (Tabela 5). Coleman; Agbu e Montgomery (1993) utilizando o sensor Landsat TM para gerar equações similares, obtiveram coeficientes abaixo dos encontrados neste trabalho, 0,40 para argila e 0,17 para areia. Fiorio (2002), também trabalhando com sensor Landsat TM, obteve resultados um pouco superiores, com 0,61 para argila e 0,63 para areia.

Quimicamente, as equações para predição dos atributos, K, Ca, Mg, H + Al + SB e CTC, apresentaram coeficientes de determinação variando de 0,38 para o Mg até 0,58 para o K. A elaboração dos modelos para os elementos P e Al, não obteve significância, não sendo possível gerar a equação. A equação da MO obteve um R^2 de 0,32, equivalente ao coeficiente obtido por Fiorio (2002) que foi 0,35. Ben-Dor et al. (2002) geraram uma equação para predição da matéria orgânica a partir de leituras espectrais de um sensor a bordo de avião (DAIS-7915), obtendo um R^2 de 0,83.

As referidas equações foram testadas com as amostras de solo que não participaram do modelo. Para isso foram realizadas correlações entre os valores estimados (VD) e os valores determinados (VE) (Figura 3). Verificou-se que os maiores valores para o coeficiente de correlação R^2 são para a areia grossa (0,45) e total (0,41) (Figuras 3a e 3b, respectivamente). Para argila obteve-se um R^2 de 0,34 (Figura 3c). Coleman; Agbu e Montgomery (1993) tentaram estimar teores de areia e argila pelas imagens de satélite, obtendo valores baixos de R^2 , sendo 0,14 e 0,40 respectivamente.

Os resultados obtidos pelo sensor ASTER foram menos consistentes que os com sensor em laboratório, concordando com resultados de Coleman; Agbu e Montgomery (1993). Apenas a matéria orgânica apresentou um melhor coeficiente de correlação quando comparado ao resultado do sensor de laboratório, 0,34 do sensor ASTER (Figura 3d) contra 0,26 do sensor FieldSpec (Figura 2d). Mesmo os atributos químicos que obtiveram um coeficiente de determinação superior para o modelo gerado (Tabelas 4 e 5), na predição dos seus atributos resultaram em um coeficiente de correlação inferior aos do sensor de laboratório, como foi o caso do cálcio e da CTC (Figuras 2e e 2f e 3e e 3f).

As imagens de satélite, juntamente com os dados espectrais de sensores terrestres têm-se mostrado promissoras em prover um meio para amostragem direta e uma relação específica e usual para o mapeamento de MO, granulometria e fertilidade. No entanto, o uso isolado de dados de sensoriamento remoto tem uma limitação no desenvolvimento de um modelo robusto de avaliação quantitativa das propriedades do solo que não necessite de calibrações locais (BARNES et al., 2003). É importante reafirmar que os resultados indicam avanços e que novas pesquisas para os elementos de difícil determinação (P, K e silte) devem ser realizadas, como também salienta Ben-Dor (2002). A combinação de dados de sensores remotos e terrestres e dados de campo pode proporcionar o mapeamento dos atributos do solo de maneira mais precisa, econômica e com redução do impacto ambiental.

3.2.3.6 Análise de custo de análises de terra por meio do método convencional e espectroradiométrico

O custo da análise de terra e o tempo para obtenção dos resultados têm sido considerados um dos principais entraves para a expansão da agricultura de precisão. Desta forma foi realizada uma análise dos principais custos dessa operação, tanto pelo método tradicional quanto pelo método proposto neste trabalho. Verifica-se que apesar do número de equipamentos necessários para realização das análises de terra pelo método tradicional ser muito maior, o valor total de todos esses equipamentos é de U\$ 53.195,45, enquanto que os equipamentos para análise de terra pelo outro método, custam no total U\$ 73.622,73 (27,74 % mais caro) (Tabela 6). No entanto, o custo com reagentes para realização das análises químicas (macro e micro) e granulométricas (areia, silte e argila) é de U\$ 5,00 por amostra, enquanto que, pelo método proposto o custo com reagentes é nulo. Assim, calcula-se que um laboratório como o da ESALQ onde são analisadas aproximadamente 46.500 amostras de terra por ano (3.875/mês) seria necessário aproximadamente 1 (um) mês para amortização da diferença de custos entre os equipamentos.

Além da questão financeira, tem-se que o método tradicional demanda muito mais tempo para obtenção dos resultados das análises. Por exemplo, enquanto que o método tradicional para análise granulométrica (Bouyoucos) leva aproximadamente 48 horas para se obter o resultado de uma amostra que já foi seca e peneirada, o método proposto é praticamente imediato necessitando de apenas 10 minutos para obtenção dos resultados, isto é, o método utilizando-se o sensor,

obtém o mesmo resultado em aproximadamente 0,34 % do tempo que levaria a análise convencional (Tabela 6). De acordo com estas informações, pode-se inferir que a diferença entre o custo de análises de terra pode ser ainda maior, pois o método espectrorradiométrico demanda menos mão-de-obra e podem ser realizadas muito mais análises em um mesmo período. Outro fator de suma importância que deve-se levar em conta, é a não utilização de reagentes químicos nas análises, não havendo produção de resíduos que possam a vir contaminar o ambiente.

3.3 Conclusões

1. O conteúdo de areia do solo apresentou o maior coeficiente de correlação positivo com o comportamento espectral do solo (sensor FieldSpec = 0,55 e sensor ASTER = 0,62) e o conteúdo de argila e matéria orgânica os maiores coeficientes negativos (sensor FieldSpec = -0,70 e -0,51 e sensor ASTER = -0,67 e -0,63 respectivamente);
2. Há uma tendência de aumentar a correlação entre os atributos do solo e sua reflectância em maiores comprimentos de ondas, como por exemplo a argila (sensor FieldSpec: B5 (2.145-2.185 nm) = -0,67; B6 (2.185-2.225 nm) = -0,68 e B7 (2.225-2.285 nm) = -0,70);
3. É possível quantificar os atributos do solo: areia, silte, argila, CTC e a fração da areia, no caso areia grossa;
4. Comparando-se os resultados das correlações obtidas pelo sensor FieldSpec e o sensor ASTER, verifica-se que o terrestre obteve maiores índices para os seguintes atributos: areia fina, argila, H +Al, CTC e V% e o sensor ASTER para os atributos: areia grossa, areia total, silte, matéria orgânica, cálcio magnésio e SB;
5. O comportamento espectral de elementos químicos, como o fósforo e o potássio, devem ser mais estudados;
6. A análise de atributos do solo por sensores é um método menos oneroso, mais rápido e que gera menos impactos ao meio ambiente.

Tabela 1 - Teores médios dos atributos das Camadas A (0-20 cm) e B (40-60 cm) dos solos
(continua)

Atributos	Camada	Análise ⁽¹⁾				
		Minímio	Máximo	Média	DP ²	CV ³
Areia Grossa (g kg ⁻¹)	A	10,0	640,0	356,1	171,9	48,3
	B	10,0	646,0	346,4	165,4	47,7
Areia Fina (g kg ⁻¹)	A	90,0	530,0	285,6	94,9	33,2
	B	80,0	612,0	275,4	94,4	34,3
Areia Total (g kg ⁻¹)	A	110,0	912,0	641,8	213,0	33,2
	B	90,0	904,0	622,1	214,0	34,4
Silte (g kg ⁻¹)	A	2,0	465,0	85,2	100,4	117,8
	B	2,0	378,0	93,3	97,3	104,3
Argila (g kg ⁻¹)	A	79,0	745,0	271,6	136,2	50,2
	B	87,0	646,0	283,5	130,5	46,0
pH em H ₂ O	A	4,4	6,5	5,5	0,4	7,8
	B	4,4	6,3	5,3	0,5	9,1
pH em KCl	A	3,9	5,8	4,7	0,5	10,0
	B	3,9	5,8	4,5	0,5	10,9
pH em CaCl ₂	A	3,8	5,9	4,9	0,4	8,8
	B	3,8	5,7	4,7	0,5	10,2
Matéria Orgânica (g kg ⁻¹)	A	7,0	30,0	15,3	5,7	37,7
	B	4,0	19,0	10,2	3,6	35,5
Fósforo ⁽⁴⁾ (mg kg ⁻¹)	A	2,0	23,0	6,4	4,5	70,1
	B	1,0	19,0	3,3	2,3	69,9
Potássio ⁽⁴⁾ (mmolc kg ⁻¹)	A	0,1	4,9	1,2	1,1	94,9
	B	0,1	3,3	0,6	0,7	125,4
Cálcio ⁽⁴⁾ (mmolc kg ⁻¹)	A	2,0	62,0	17,5	11,4	65,0
	B	2,0	60,0	11,7	9,2	78,7
Magnésio ⁽⁴⁾ (mmolc kg ⁻¹)	A	1,0	20,0	6,0	4,3	70,6
	B	1,0	17,0	3,5	2,7	77,3
H+Al ⁽⁵⁾ (mmolc kg ⁻¹)	A	12,0	52,0	29,4	10,8	36,8
	B	13,0	58,0	28,0	8,1	28,9
Alumínio ⁽⁴⁾ (mmolc kg ⁻¹)	A	0,0	8,0	1,4	1,6	118,0
	B	0,0	7,0	2,3	2,0	88,8

Tabela 1 - Teores médios dos atributos das Camadas A (0-20 cm) e B (40-60 cm) dos solos
(conclusão)

Atributos	Camada	Análise ⁽¹⁾				
		Minímio	Máximo	Média	DP ²	CV ³
SB ⁽⁶⁾ (mmolc kg ⁻¹)	A	3,0	84,0	24,9	15,6	62,8
	B	4,0	70,0	15,8	11,6	73,6
CTC ⁽⁷⁾ (mmolc kg ⁻¹)	A	18,0	131,0	54,2	20,7	38,1
	B	24,0	92,0	43,8	12,7	29,0
V ⁽⁸⁾ (%)	A	8,0	75,0	43,7	15,5	35,4
	B	11,0	76,0	34,0	15,4	45,3
m ⁽⁹⁾ (%)	A	0,0	62,0	8,8	12,2	140,0
	B	0,0	59,0	17,9	17,1	95,8

⁽¹⁾ Valores médios de 111 amostras

⁽²⁾ Desvio Padrão

⁽³⁾ Coeficiente de Variação

⁽⁴⁾ Extraído por resina, Raij, et al. (2001)

⁽⁵⁾ Hidrogênio mais alumínio

⁽⁶⁾ Soma de Bases (Ca + Mg + K)

⁽⁷⁾ Capacidade de Troca Catiônica (SB + H + Al)

⁽⁸⁾ Saturação por Bases (SB/CTC * 100)

⁽⁹⁾ Saturação por Alumínio (Al/Al + SB) * 100

Tabela 2 - Correlação de Pearson entre os atributos e a reflectância média do solo, bandas ASTER simuladas a partir dos dados obtidos em nível terreste (FieldSpec)

	Bandas ASTER Simuladas (nm)						
	B1 (520-600)	B2 (630-690)	B3 (760-860)	B4 (1.600-1.700)	B5 (2.145-2.185)	B6 (2.185-2.225)	B7 (2.235-2.285)
Areia Grossa	0,531**	0,328**	0,404**	0,511**	0,541**	0,544**	0,553**
Areia Fina	0,383**	0,435**	0,475**	0,468**	0,485**	0,489**	0,498**
Areia Total	0,600**	0,458**	0,537**	0,621**	0,653**	0,657**	0,668**
Silte	-0,512**	-0,376**	-0,410**	-0,455**	-0,473**	-0,470**	-0,465**
Argila	-0,556**	-0,444**	-0,544**	-0,641**	-0,677**	-0,686**	-0,706**
pH H₂O	-0,095 ^{ns}	-0,121 ^{ns}	-0,108 ^{ns}	-0,069 ^{ns}	-0,063 ^{ns}	-0,059 ^{ns}	0,062 ^{ns}
pH KCl	-0,214*	-0,225*	-0,208*	-0,146 ^{ns}	-0,135 ^{ns}	-0,128 ^{ns}	-0,124 ^{ns}
pH CaCl₂	-0,095 ^{ns}	-0,121 ^{ns}	-0,108 ^{ns}	-0,069 ^{ns}	-0,063 ^{ns}	-0,059 ^{ns}	-0,062 ^{ns}
MO⁽¹⁾	-0,436**	-0,343**	-0,403**	-0,463**	-0,484**	-0,490**	-0,517**
Fósforo	0,125 ^{ns}	0,220*	0,229*	0,227*	0,250**	0,249**	0,232*
Potássio	0,044 ^{ns}	-0,022 ^{ns}	-0,072 ^{ns}	-0,133 ^{ns}	-0,151 ^{ns}	-0,165 ^{ns}	-0,201*
Cálcio	-0,407**	-0,327**	-0,352**	-0,367**	-0,380**	-0,380**	0,391**
Magnésio	-0,431**	-0,338**	-0,388**	-0,431**	-0,453**	-0,455**	-0,462**
H+Al⁽²⁾	-0,218*	-0,151 ^{ns}	-0,220*	-0,318**	-0,360**	-0,373**	-0,400**
Alumínio	0,012 ^{ns}	0,009 ^{ns}	-0,010 ^{ns}	-0,050 ^{ns}	-0,060 ^{ns}	-0,065 ^{ns}	-0,069 ^{ns}
SB⁽³⁾	-0,410**	-0,331**	-0,367**	-0,395**	-0,412**	-0,413**	-0,426**
CTC⁽⁴⁾	-0,424**	-0,330**	-0,392**	-0,465**	-0,499**	-0,507**	-0,531**
V%⁽⁵⁾	-0,230*	-0,228*	-0,224*	-0,192*	-0,186*	-0,179 ^{ns}	-0,176 ^{ns}
m%⁽⁶⁾	0,034 ^{ns}	0,036 ^{ns}	0,041 ^{ns}	0,038 ^{ns}	0,044 ^{ns}	0,043 ^{ns}	0,049 ^{ns}

** , * , ^{ns} , significativo ao nível de 1%, 5% e não significativo, respectivamente

(1) Matéria Orgânica

(2) Hidrogênio + Alumínio

(3) Soma de Bases

(4) Capacidade de Troca Catiônica

(5) Saturação por Bases

(6) Saturação por Alumínio

Tabela 3 - Correlação de Pearson entre os atributos e a reflectância média do solo, bandas ASTER

	Bandas ASTER (nm)							
	B1 (520-600)	B2 (630-690)	B3 (760-860)	B4 (1.600-1700)	B5 (2.145-2.185)	B6 (2.185-2.225)	B7 (2.235-2.285)	B8 (2.295-2.365)
Areia Grossa	0,586**	0,543**	0,597**	0,588**	0,606**	0,611**	0,619**	0,623**
Areia Fina	0,266**	0,315**	0,362**	0,341**	0,421**	0,393**	0,425**	0,441**
Areia Total	0,592**	0,579**	0,643**	0,626**	0,676**	0,668**	0,690**	0,699**
Silte	-0,522**	-0,515**	-0,538**	-0,539**	-0,570**	-0,569**	-0,562**	-0,564**
Argila	-0,535**	-0,523**	-0,605**	-0,584**	-0,637**	-0,624**	-0,664**	-0,679**
pH H₂O	-0,223 ^{ns}	-0,028 ^{ns}	-0,046 ^{ns}	-0,132 ^{ns}	-0,132*	-0,189*	-0,200*	-0,167 ^{ns}
pH KCl	-0,117 ^{ns}	-0,082 ^{ns}	-0,135 ^{ns}	-0,204*	-0,215*	-0,229*	-0,213*	-0,191*
pH CaCl₂	-0,022 ^{ns}	-0,028 ^{ns}	-0,046 ^{ns}	-0,132 ^{ns}	-0,189*	-0,200*	-0,195*	-0,167 ^{ns}
MO⁽¹⁾	-0,530**	-0,558**	-0,590**	-0,556**	-0,600**	-0,605**	-0,614**	-0,630**
Fósforo	0,024 ^{ns}	0,005 ^{ns}	-0,054 ^{ns}	-0,032 ^{ns}	-0,033 ^{ns}	-0,034 ^{ns}	-0,04 ^{ns}	-0,027 ^{ns}
Potássio	-0,08 ^{ns}	-0,193*	-0,209*	-0,132 ^{ns}	-0,193*	-0,183 ^{ns}	-0,224*	-0,0232*
Cálcio	-0,442**	-0,465**	-0,496**	-0,501**	-0,547**	-0,553**	-0,546**	-0,544**
Magnésio	-0,397**	-0,431**	-0,433**	-0,474**	-0,564**	-0,568**	-0,569**	-0,576**
H+Al⁽²⁾	-0,257**	-0,293**	-0,338**	-0,259**	-0,297**	-0,299**	-0,333**	-0,361**
Alumínio	0,065 ^{ns}	0,046 ^{ns}	0,06 ^{ns}	0,107 ^{ns}	0,127 ^{ns}	0,141 ^{ns}	0,09 ^{ns}	0,071 ^{ns}
SB⁽³⁾	-0,435**	-0,469**	-0,493**	-0,503**	-0,565**	-0,570**	-0,569**	-0,570**
CTC⁽⁴⁾	-0,463**	-0,508**	-0,549**	-0,515**	-0,582**	-0,587**	-0,604**	-0,620**
V%⁽⁵⁾	-0,196*	-0,212*	-0,235*	-0,288**	-0,330**	-0,338**	-0,319**	-0,309**
m%⁽⁶⁾	0,082 ^{ns}	0,08 ^{ns}	0,117 ^{ns}	0,14 ^{ns}	0,183 ^{ns}	0,186 ^{ns}	0,16 ^{ns}	0,15 ^{ns}

** , * , ^{ns} , significativo ao nível de 1% , 5% e não significativo , respectivamente

(1) Matéria Orgânica

(2) Hidrogênio + Alumínio

(3) Soma de Bases

(4) Capacidade de Troca Catiônica

(5) Saturação por Bases

(6) Saturação por Alumínio

Tabela 4 - Equações de regressão múltipla elaborados a partir da reflectância do solo obtidas em nível terrestre (FieldSpec)

Atributos	Equações múltiplas ⁽¹⁾	R ²
Areia Grossa	148,89660 + 9663,43003H1 - 5964,45751H3 - 3297,20061H4 - 10249H5 + 10954H7 + 12278H11 + 11801H12	0,76
Areia Fina	139,65324 + 6213,22900B19 - 4985,99936B20 - 2798,46154H3 - 3222,56449H11 - 9822,74059H12	0,47
Areia Total	606,78709 + 132822B3 - 158209B5 + 33812B6 - 21841B7 + 9500,84258B14 + 123250H2 + 18941H5 + 5957,66475H8	0,84
Silte	119,94640 + 113470B1 - 113899B2 + 2439,41241B7 + 8620,45330H8 - 8578,23725H9 - 6609,88239H10	0,57
Argila	478,79135 - 2412,21332B3 + 2942,03154B9 - 2875,85961B20 + 4295,73270H3 - 5010,04119H7	0,70
pH em H₂O	5,60054 - 6,16206H10 - 27,86081H12	0,13
pH em KCl	5,20385 - 4,34959B6	0,21
pH em CaCl₂	5,00054 - 6,16206H10 - 27,86081H12	0,13
MO ⁽²⁾	20,95535 + 112,96196H4 - 224,28560H5 - 229,89331H9 - 176,95050H11	0,38
Fósforo	-21,76370 + 382,71252B4 - 668,74876H3 - 2283,35189H5 + 800,23929H8	0,28
Potássio	1,03411 - 26,79305H3	0,07
Cálcio	22,87457 - 265,83980H10	0,20
Magnésio	10,87970 - 114,60232B2 - 117,91016H3 + 143,00957H4 - 333,36605H7 - 103,05023H11	0,41
H+Al ⁽³⁾	40,22898 + 297,03678H4 + 418,10275H5 - 540,10579H9 - 590,89611H11	0,32
Alumínio	0,92434 + 21,55252H10 + 115,16935H12	0,11
SB ⁽⁴⁾	31,68022 - 373,63478H10	0,21
CTC ⁽⁵⁾	72,08600 - 763,49302H3 + 993,42541H4 - 2131,70248H7 - 270,86416H10 - 845,25299H11	0,50
V ⁽⁶⁾	46,79155 + 308,68985H8 - 540,47251H10	0,25
m ⁽⁷⁾	2,86394 + 515,52785H7 + 1043,09448H12	0,21

⁽¹⁾ B1...B21; H1...H12, bandas e alturas selecionadas

⁽²⁾ Matéria Orgânica

⁽³⁾ Hidrogênio + Alumínio

⁽⁴⁾ Soma de Bases

⁽⁵⁾ Capacidade de Troca Catiônica

⁽⁶⁾ Saturação por Bases (%)

⁽⁷⁾ Saturação por Alumínio (%)

Tabela 5 - Equações de regressão múltipla elaborados a partir da reflectância do solo obtidas em nível orbital (ASTER)

Atributos	Equações múltiplas ⁽¹⁾	R²
Areia Grossa	-281,72410 + 3033,05108B7	0,42
Areia Fina	-414,18054 + 5294,14269B1 - 5227,32905B4 + 6548,01233B5	0,35
Areia Total	-195,74047 + 4122,52335B7	0,53
Silte	433,37163 - 1650,35990B3	0,33
Argila	754,76440 + 8678,50194B6 - 11046B7	0,57
pH em H₂O	5,83762 + 23,53962B1 - 16,47469B3	0,21
pH em KCl	5,61120 - 5,07865B3	0,15
pH em CaCl₂	5,23762 + 23,53962B1 - 16,47469B3	0,21
MO ⁽²⁾	30,41331 - 77,63851B7	0,32
Fósforo	- ⁽⁸⁾	-
Potássio	1,35100 + 101,41663B1 - 24,11561B2 - 46,96738B3	0,59
Cálcio	49,14546 + 726,10137B1 - 371,55171B2 - 359,08711B3	0,47
Magnésio	17,58201 - 63,86300B8	0,38
H+Al ⁽³⁾	64,80597 + 567,52892B4 - 826,25912B6	0,42
Alumínio	-	-
SB ⁽⁴⁾	70,28431 + 1141,77822B1 - 525,53420B2 - 578,92618B3	0,52
CTC ⁽⁵⁾	85,91305 + 1287,97471B1 - 599,57139B3 - 344,79600B8	0,52
V ⁽⁶⁾	91,32045 - 254,33218B3	0,29
m ⁽⁷⁾	-18,89416 + 149,46014B3	0,09

⁽¹⁾ B1, B2, B3...B8

⁽²⁾ Matéria Orgânica

⁽³⁾ Hidrogênio + Alumínio

⁽⁴⁾ Soma de Bases

⁽⁵⁾ Capacidade de Troca Catiônica

⁽⁶⁾ Saturação por Bases (%)

⁽⁷⁾ Saturação por Alumínio (%)

⁽⁸⁾ Não Significativo

Tabela 6 - Análise do custo de análises químicas e granulométricas do solo pelo método convencional e espectrorradiométrico

Parâmetro	Método			
	Tradicional		Espectrorradiométrico ⁽²⁾	
	Descrição ⁽¹⁾	Custo (U\$)	Descrição	Custo (U\$)
Equipamentos necessários	Balança analítica	1863,64	Espectrorradiômetro	70000,00
	Balança semi-analítica	909,09	Estufa para secagem e esterilização	2272,73
	Espectrofotômetro de absorção atômica	18181,82	Vidraria em geral	1200,00
	Espectrofotômetro de chama	1818,18	Peneira	150,00
	Espectrofotômetro uv-visível	3181,82		
	Titulador automático	2272,73		
	pH-metro	545,45		
	Estufa para secagem e esterilização	2272,73		
	Peneira	150,00		
	Agitador magnético	181,82		
	Geladeira (para amostras e reagentes)	409,09		
	Destilador de água	318,18		
	Deionizador	227,27		
	Chapa aquecedora	363,64		
	Capela com retirada forçada de ar	909,09		
	Pipetas automáticas	500,00		
	Vidraria em geral	4545,45		
	Sistema de Purificação de água Milli-Q	12272,73		
	Capela de Fluxo Laminar	2272,73		
		TOTAL	53195,45	TOTAL
Leituras ⁽³⁾	Reagentes/amostra para análise granulométrica ⁽⁴⁾	0,12	Reagentes	0,00
Amostras	Reagentes/amostra para análise química ⁽⁵⁾	4,94	Reagentes	0,00
	TOTAL	5,06	TOTAL	0,00
Tempo ⁽³⁾	Tempo total para obtenção do resultados de uma análise granulométrica (frações areia, silte e argila)	48 horas ⁽⁶⁾		10 min ⁽⁶⁾

⁽¹⁾ Preços de equipamentos cotados em 16/06/2005 na MPL equipamentos para laboratórios

⁽²⁾ Preço do sensor FieldSpec cotado em 16/06/2005

⁽³⁾ Valores aproximados, desconsiderando custos com mão-de-obra, luz, água e depreciação dos equipamentos. Informações cedidas pelo laboratório do Departamento de Solos e Nutrição de Plantas da Escola Superior de Agronomia Luiz de Queiroz, ESALQ

⁽⁴⁾ Determinação dos teores de areia, silte e argila do solo

⁽⁵⁾ Determinação dos teores de macro e micro nutrientes do solo

⁽⁶⁾ Tempo gasto para obtenção dos resultados (amostras já secas e peneiradas)

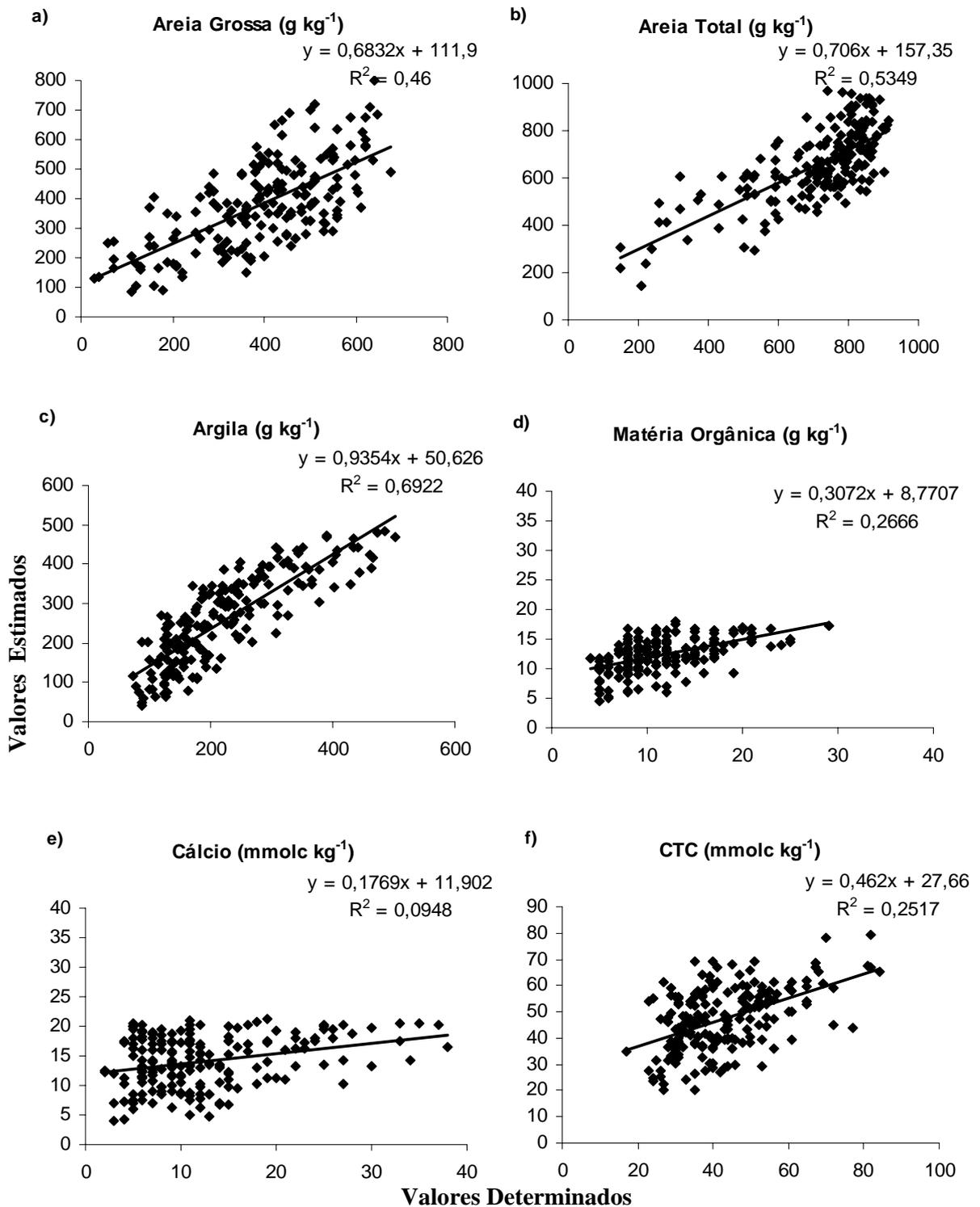


Figura 2 - Comparação entre os valores dos atributos do solo determinados pelas análises químicas e estimados pelas equações geradas a partir dos dados de reflectância do sensor FieldSpec

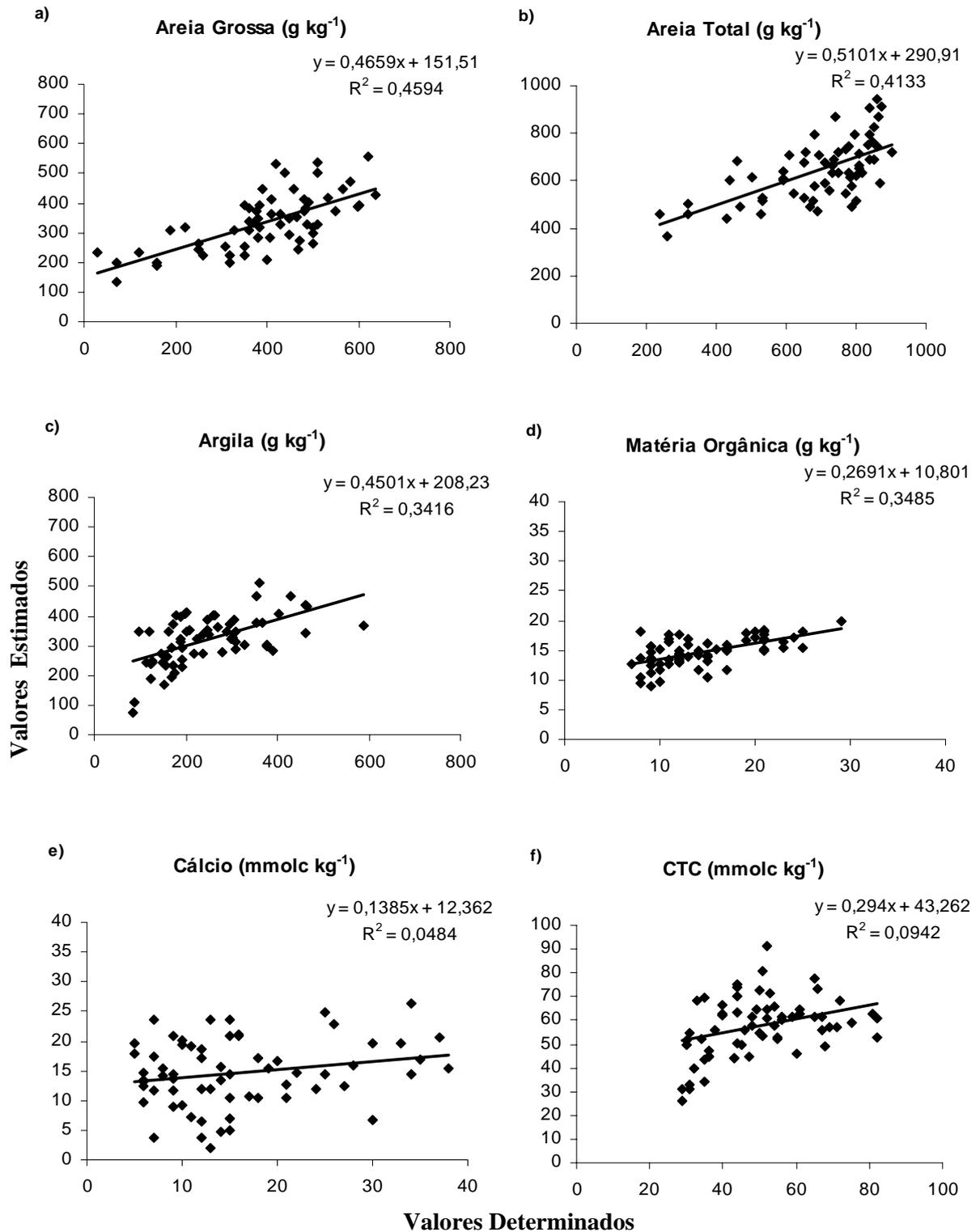


Figura 3 - Comparação entre os valores dos atributos do solo determinados pelas análises químicas e estimados pelas equações geradas a partir dos dados de reflectância do sensor ASTER

Referências

- AL-ABBAS, A.H.; SWAIN, P.H.; BAUMGARDNER, M.F. Relating organic matter and clay content to multispectral radiance of soils. **Soil Science**, Baltimore, v. 114, n. 6, p. 477-485, June 1972.
- ANALYTICAL IMAGING AND GEOPHYSICS. **Atmospheric correction now (ACORN) 3.12**. Boulder, 2001. 1 CD-ROM.
- BARNES, E.M.; BAKER, M.G. Multispectral data for mapping soil texture: possibilities and limitations. **Applied Engineering in Agriculture**, Michigan, v. 16, n. 6, p. 731-741, Nov. 2000.
- BARNES, E.M.; SUDDUTH, K.A.; HUMMEL, J.W.; LESCH, S.M.; CORWIN, D.L.; YANG, C.; DAUGHTRY, C.S.T.; BAUSCH, W.C. Remote and ground-based sensor techniques to map soil properties. **Photogrammetric Engineering & Remote Sensing**. Bethesda, v. 69, n. 6, p. 619-630, June 2003.
- BEN-DOR, E. Quantitative remote sensing of soil properties. **Advances in Agronomy**, San Diego, v. 75, p. 173-243, 2002.
- BEN-DOR E.; BANIN, A. Near infrared analysis (NIRA) as a rapid method to simultaneously evaluate several soil properties. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 59, n. 2, p. 364-372, Mar. 1995a.
- BEN-DOR E.; BANIN, A. Near infrared analysis as simultaneously method to evaluate spectral featureless constituents in soil. **Soil Science**, Baltimore, v. 159, n. 4, p. 259-269, Apr. 1995b.
- BEN-DOR, E.; IMBAR, Y.; CHEN, Y. The reflectance spectra of organic matter in the visible near infrared and short wave infrared region (400-2500nm) during a control decomposition process. **Remote Sensing of Environment**, New York, v. 61, n. 1, p.1-15, July 1997.
- BEN-DOR, E.; PAKTIN, 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**, Oxon, v. 23, n. 6, p. 1043-1062, Mar. 2002
- BEN-GERA, I.; NORRIS, K. Determination of moisture content in soybeans by direct spectrophotometry. **Israel Journal of Agricultural Research**, Tel Aviv, v. 18, n. 3, p. 124-132, 1968.
- BISTRICHI, C.A.; CARNEIRO, C.D.R.; DANTAS, A.S.L.; PONÇANO, W.L.; CAMPANHA, G.A.C.; NAGATA, N.; ALMEIDA, M.A.; STEIN, D.P.; MELO, M.S.; CREMONINI, O.A. **Mapa geológico do Estado de São Paulo**. São Paulo: Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo, 1981. 1 mapa, Escala: 1: 500.000.

CAMARGO, M.N.; KLANT, E.; KAUFFMAN, J.H. Classificação de solos usada em levantamentos pedológicos no Brasil. **Boletim Informativo**, Campinas, v. 12, n. 1, p. 11-13, jan./abr. 1987.

CAMPOS, R.C.; DEMATTÊ, J.A.M.; QUARTAROLI, C.F. Determinação indireta do teor de hematita no solo a partir de dados de colorimetria e radiometria. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 38, n. 4, p. 521-528, abr. 2003.

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.

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**, Baltimore, v. 151, n. 5, p.355-361, May 1991.

CONFALONIERI, M.; FORNASIER, F.; URSINO, A.; BOCCARDI, F.; PINTUS, B.; ODOARDI, M. The potencial of near infrared reflectance spectroscopy as a tool for the chemical characterization of agricultural soils. **Journal of Near Infrared Spectroscopy**, West Sussex, v. 9, n. 2, p. 123-131. Mar./Apr. 2001.

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

DALAL, R.C.; HENRY, R.J. Simultaneous Determination of Moisture, Organic Carbon and Total Nitrogen by Near Infrared Reflectance Spectrophotometry. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 50, n. 1, p. 120-123. Jan./Feb. 1986.

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.

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**, Madison, v. 63, n. 2, p. 327-342, Mar./Apr. 1999a.

DEMATTÊ, J.A.M.; GARCIA, G.J. Avaliação de atributos de Latossolo Bruno e de Terra Bruna Estruturada da região de Guarapuava, Paraná, por meio de sua energia refletida. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 23, p.343-355, 1999b.

DEMATTÊ, J.A.M.; NANNI, M.R. It is possible to estimate physical-chemical soil attributes by using laboratory and orbital sensors. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON GEOSPATIAL INFORMATION IN AGRICULTURE AND FORESTRY, 3., 2001, Denver, **Proceedings...** Denver: Veridian, 2001. p. 5-7.

DEMATTÊ, J.A.M.; PEREIRA, H.S.; NANNI, M.R.; 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.

DEMATTÊ, J.A.M.; HUETE A.R.; FERREIRA JUNIOR. L.G.; ALVES M. C.; NANNI M.R.; CERRI C.E. Evaluation of tropical soils through ground and orbital sensors. In: INTERNATIONAL CONFERENCE OF GEOSPATIAL INFORMATION IN AGRICULTURE AND FORESTRY, 2., 2000, Lake Buena Vista. **Proceedings...** Lake Buena Vista: Erim, 2000. p. 34-41.

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, May 2002.

EMBRAPA. **Procedimentos normativos de levantamentos pedológicos**: normas em uso pelo SNLCS. Brasília: Serviço de Produção de Informação, 1995. 101 p.

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

ENVIRONMENTAL SYSTEMS RESEARCH INSTITUTE. **ARCGIS 8.3**. Redlands, 2000. 3 CD-ROM.

EPIPHANIO, J.C.N.; FORMAGGIO, A.R. Abordagens de uso de número digital e de reflectância em sensoriamento remoto com dados de satélites. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 5., Natal, 1988. **Anais...** São José do Campos: INPE, 1988. p. 400-405.

EPIPHANIO, 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.

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.

FORMAGGIO, A.R.; EPIPHANIO, J.C.N.; VALERIANO, M.M.; OLIVEIRA, J.B. Comportamento espectral (450-2.450 nm) de solos tropicais de São Paulo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v. 20, p. 467-474, 1996.

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**, New York, v. 61, n. 1, p. 24-33, July 1997.

HATCHELL, D.C. **ASD technical guide**. Boulder: Analytical Spectra Device, 1999. 140 p.

HUNT, G.R.; SALISBURY, J.W; LENHOFF, C.J. Visible and near-infrared spectra of minerals and rocks: III Oxides and hydroxides. **Modern Geology**, New York, v. 1, p.195-205, 1971.

INSTITUTO DE CIÊNCIAS MATEMÁTICAS E DE COMPUTAÇÃO. Disponível em: <<http://www.icmc.usp.br/ambiente/saocarlos/geral.html>>. Acesso em: 08 nov. 2005.

JANIK, L.J; MERRY, R.H.; SKJEMSTAD, J.O. Can mid infrared diffuse reflectance analysis replace soil extractions? **Australian Journal of Experimental Agriculture**, Collingwood, v. 38, n. 7, p. 681–696, July 1998.

LOBELL, D.B.; ASNER, G.P. Moisture effects on soil reflectance. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 66, n. 3, p. 722-727, May/June 2002.

LÓPEZ-GRANADOS, F.; JURADO-EXPÓSITO, M.; PEÑA-BARRAGÁN, J.M.; GARCIA-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.

MALLEY, D.F.; YESMIN, L.; WRAY D.; EDWARDS S. Application of near-infrared spectroscopy in analysis of soil mineral nutrients. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, London, v. 30, n. 7/8, p. 999-1012, 1999.

McBRATNEY, A.B.; WHELAN, B.M.; VISCARRA ROSSEL; R.A. Implications of precision agriculture for soil resource assessment. In: AUSTRALIAN AND NEW ZEALAND NATIONAL SOILS CONFERENCE, 1996, Melbourne. **Proceeding...** Melbourne: Australian Society of Soil Science Incorporated, 1996. p. 161–162.

MENESES, P.R.; MADEIRA NETTO, J.S. (Org.). **Sensoriamento remoto: reflectância dos alvos naturais**. Brasília: Editora UnB/EMBRAPA Cerrados, 2001. 262 p.

MERRY, R.H.; JANIK, L.J. Mid infrared spectroscopy for rapid and cheap analysis of soils. In: AUSTRALIAN AGRONOMY CONFERENCE, 10., 2001, Hobart. **Proceedings...** Hobart: The Australian Society of Agronomy, 2001. Disponível em: <http://www.regional.org.au/au/asa/2001/3/c/merry.htm#P2_63> Acesso em: 21 maio 2005.

MORRA, M.J.; HALL, M.H.; FREEBORN, L.L. Carbon and nitrogen analysis of soil fractions using near-infrared reflectance spectroscopy. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 55, n. 1, p. 288-291, Jan./Feb. 1991.

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. Quantification and discrimination of soils developed from basalt as evaluated by terrestrial, airborne and orbital sensors. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 10., 2001, Foz do Iguaçu. **Anais...** São José dos Campos, INPE, 2001a. p. 1441-1450.1 CD-ROM.

NANNI, M.R.; DEMATTÊ, J.A.M. It is possible estimate physical-chemical soil attributes by using laboratory and orbital sensors. In: INTERNATIONAL CONFERENCE OF GEOSPATIAL INFORMATION IN AGRICULTURE AND FORESTRY, 3., 2001, Denver. **Proceedings...**, Denver: Veridian, 2001b. 1 CD-ROM.

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.

OLIVEIRA, J.B. **Carta pedológica semi-detalhada do Estado de São Paulo: Folha de Brotas – SF 22-Z-B-III-4**. Campinas: Instituto Agronômico, 1981a. 1 mapa. Escala 1:100.000.

OLIVEIRA, J.B. **Carta pedológica semi-detalhada do Estado de São Paulo: Folha de São Carlos – SF 23-Y-A-I**. Campinas: Instituto Agronômico, 1981b. 1 mapa. Escala 1:100.000.

OLIVEIRA, J.B. **Carta pedológica semi-detalhada do Estado de São Paulo: Folha de Descalvado – SF 23-V-C-IV**. Campinas: Instituto Agronômico, 1982. 1 mapa. Escala 1:100.000.

OLIVEIRA, J.B.; CAMARGO, M.N.; ROSSI, M.; CALDERANO FILHO, B. **Mapa pedológico de reconhecimento do Estado de São Paulo**. Campinas: Instituto Agronômico de Campinas, 1999. 1 mapa. Escala 1:500.000

RAIJ, B.van.; ANDRADE, J.C.; CANTARELLA, H.; QUAGGIO, J.A. **Análise química para avaliação da fertilidade de solos tropicais**. Campinas: Instituto Agronômico, 2001. 285 p.

RESEARCH SYSTEMS INC. **ENVI 4.1.**, 2004. Boulder, 2004. 2 CD-ROM.

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

ROBBINS, J.L.; DANEMAN, J.C. Parametric estimating & the stepwise statistical technique. **National Estimator**, Alexandria, v. 14, p. 24-34, aug. 1999.

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.

STARK, E.; LUCHTER, K.; MARGOSHES, M. Near-infrared analysis (NIRA): A technology for quantitative and qualitative analysis. **Applied Spectroscopy Reviews**, Philadelphia, v. 22, n. 4, p. 335-399, Oct./Dec. 1986.

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

SUDDUTH, K.A.; HUMMEL, J.W. Portable near-infrared spectrophotometer for rapid soil analysis, **Transaction of the ASAE**, St. Joseph, v. 36, n. 1, p. 185-193, Jan./Feb. 1993.

THOMASSON, J.A.; SUI, R.; COX, M.S.; AL-RAJEHY, A. Soil reflectance sensing for determining soil properties in precision agriculture. **Transactions of the ASAE**, St. Joseph, v. 44, n. 6, p. 1445-1453, Nov./Dec. 2001.

WETZEL, D.L. Near-Infrared reflectance analysis: Sleeper among spectroscopic techniques. **Analytical Chemistry**, Washington, v. 55, n. 12, p. 1165-1176, 1983.

WORKMAN JUNIOR, J.J. Interpretive Spectroscopy for Near Infrared. **Applied Spectroscopy Reviews**, New York, v. 31, n. 4, p. 251-320, 1996.

4 GEOPROCESSAMENTO NA CARACTERIZAÇÃO DE SOLOS DESENVOLVIDOS DE BASALTO E MATERIAL ARENÍTICO

Resumo

Os processos de tomada de decisão no setor agrícola, geralmente têm como base, mapas pedológicos. Entretanto, no Brasil os levantamentos de solos são na maioria antigos e pouco detalhados, geralmente nos níveis exploratório e de reconhecimento. Este fato pode ser explicado em função do método tradicional de levantamento de solos ser lento, caro e requerer análises laboratoriais subseqüentes. Desta forma, o desenvolvimento de técnicas que melhorem os níveis de mapeamento e que sejam mais rápidas e menos onerosas é necessário. Assim, o presente trabalho tem como objetivo caracterizar unidades de mapeamento de solos da região de Ibaté e São Carlos, São Paulo, em função da declividade e altitudes correspondentes, baseado em modelo digital de elevação (MDE). Primeiramente foi realizado um mapa de solos semi-detalhado com observações de campo. Posteriormente, utilizando-se curvas de nível da região foi elaborado o MDE, do qual foi extraído mapas com diferentes classes de declividade e elevação. Através da tabulação cruzada foi determinada a incidência de cada solo nas respectivas classes de declives altitudes. Verificou-se que em escalas regionais há uma tendência de ocorrência de classes de solo em determinadas elevações e declividades. Cada solo apresentou um comportamento diferenciado em relação às classes de declive. Porém nas faixas limítrofes de declividade pode ocorrer sobreposição de dois ou mais solos. Na referida região o Latossolo Amarelo encontra-se predominantemente nas regiões mais altas (815-835 m) e relevo plano (1-3 %). Porém, solos pouco intemperizados como os Neossolos Litólicos aparecem em diferentes faixas de declividade, desde terrenos planos até os forte ondulados. O mapa de solos gerado pelo método tradicional apresenta limites de solos similares com as faixas de elevação geradas pelo modelo digital do terreno. Conclui-se que o conhecimento da distribuição dos solos, no relevo, desde as posições mais altas até as mais baixas, é de grande importância, pois facilita a execução do levantamento de solos. Por outro lado, o fato de uma mesma classe de solo ocorrer em diferentes declividades e elevações, denota que deve haver cuidado na extrapolação dessas informações. O modelo de elevação apresenta semelhanças com o mapa de solos e pode auxiliar no modelo. Porém, as variações de solos mostram-se mais complexas e exigem verificações de campo como apoio para o modelo. Ou seja, a partir do conhecimento da caracterização da área, a extrapolação pedológica em locais sem apoio de campo deve ser feita com cautela.

Palavras Chaves: Modelo digital de elevação; Classes de solo; Sistema de informação geográfica

GEOPROCESSING FOR THE CHARACTERIZATION OF SOILS DEVELOPED ON BASALT AND SAND MATERIAL

Abstract

The decision about soil use in agriculture is usually based on soil maps. However, in Brazil, soil surveys show low details on exploratory and recognition levels. This fact can be explained due to the slow and expensive traditional soil survey method which requires subsequent laboratorial works. Thus, the development of soil mapping techniques to get faster and cheaper information is necessary. The objective of this work was to characterize soil mapping units from Ibaté and São Carlos, SP, region, as a function of correspondents slope and altitudes, based in a digital elevation model. First a semidetailed soil map was done based on field observations. Then, using contour lines of the region, the DEM was elaborated from which was extracted maps with different classes of slope and elevation. Through a cross tabulation the occurrence of each soil in each slope and elevation classes was determined. It was verified in regional scales a tendency of specific soil classes in certain elevation and slope. Each soil presented a different response related to the slope classes. However, in an adjacent area can occur overlay of two or more soil. This was verified with the Typic Haplustox soil which was found predominantly in higher areas (815-835 m) and flat lands (1-3%). However, low weathered soils like the Typic Udorthent were in different slope levels, from flat lands to strong-undulated. The soil map generated by conventional method showed soil borders close to the elevation areas generated by the digital elevation models. It was concluded that the knowledge of soil distribution in landscape, from higher to lower positions, is very important to make the soil survey execution easier. However, the fact that the same soil class can occur in different slopes and altitudes shows that is necessary to be careful with the extrapolation of this information. The pedologic extrapolation for places without observation must be done with caution.

Key words: Digital elevation model; Soil classes; Geographic information system

4.1 Introdução

Os processos de tomada de decisão no setor agrícola, geralmente têm como base, mapas pedológicos. Esses mapas podem ser utilizados em combinação com outros fatores para quantificar erros e incertezas, auxiliando a determinar fatores que podem afetar todo um planejamento e a produtividade, tais como a erodibilidade dos solos, talhamento, ambientes de produção (JOAQUIM et al., 1994), auxílio na coleta de amostras de terra para fins de fertilidade, racionalização na aplicação de fertilizantes, programas de conservação dos solos e sistemas de uso da terra. No Brasil, os levantamentos de solos são na maioria antigos e pouco detalhados, geralmente nos níveis exploratório e de reconhecimento. O Estado de São Paulo é o que apresenta mapas com melhor nível de detalhamento, tais como as cartas semi-detalhadas feitas pelo Instituto Agrônomo de Campinas (IAC) que, mesmo assim, não cobrem todo o Estado.

O método tradicional de levantamento de solos é lento, caro e requer análises laboratoriais subsequentes (McBRATNEY; SANTOS; MINASNY, 2003). Desta forma, o desenvolvimento de técnicas que melhorem os níveis de mapeamento e que sejam mais rápidos e menos onerosos é necessário.

As relações entre os solos e as formas da paisagem têm sido por longo tempo a base do mapeamento de solos. Tradicionalmente, utiliza-se a análise estereoscópica de fotografias aéreas para o delineamento manual das unidades de solo-paisagem que posteriormente são constatadas no campo. Por outro lado, a análise digital do terreno introduz algumas vantagens em relação ao método tradicional para a separação dessas unidades; é uma alternativa rápida e econômica que pode ser aplicada para a quantificação e classificação do relevo, permitindo a definição automática ou semi-automática das unidades morfológicas da paisagem (IRVIN; VENTURA; SLATER, 1997; ODEH; CHITTLEBOROUGH; McBRATNEY, 1991; McBRATNEY; HART; McGARRY, 1991; MOORE et al., 1993; REIS; BARROS; REIS, 2004).

Odeh; Chittleborough e McBratney (1991) destacaram a importância do delineamento de unidades de paisagem para a projeção dos padrões de amostragem nos levantamentos de solos, com o objetivo de diminuir o erro por extrapolação e, portanto, a classificação inadequada dos solos. Concluíram que a declividade e a curvatura explicam grande parte da variabilidade.

Observa-se, portanto, que a caracterização da relação solo/paisagem é importante como base conceitual no processo de mapeamento de solos. Também é evidente que existe a

necessidade de caracterização de diferentes regiões, tendo-se parâmetros mais detalhados sobre a variabilidade de solos e suas respectivas paisagens. A quantificação da paisagem e cartografia digital é algo relativamente novo que vêm sendo estudada para auxiliar países com poucas informações do meio físico.

Informações quantitativas das relações solo/paisagem são necessárias. Poucas informações se encontram disponíveis como, por exemplo, classes de declividade e unidades de mapeamento, ou ainda, variação de altitude e solos.

No Brasil, Miranda et al. (1999) realizaram o levantamento semi-detalhado dos solos de um município da Zona da Mata Mineira utilizando como base a identificação de padrões fisiográficos por interpretação visual do modelo de elevação e das classes de declividade e de orientação derivadas desse modelo. Em cada unidade pedogeomorfológica homogênea os autores selecionaram pontos de observação e amostragem representativas, e obtiveram uma estratificação dos solos baseada nas formas do relevo. Ippoliti et al. (2005), também obtiveram bons resultados no delineamento de pedopaisagens em uma microbacia no município de Viçosa (MG), baseando-se no modelo digital de elevação e no cálculo dos atributos do relevo (elevação, declividade e curvatura).

Espera-se que solos mais intemperizados e com boa drenagem ocorram em relevos mais planos e elevadas altitudes. Em contrapartida, solos menos evoluídos devem ocorrer em altitudes menores e relevos ondulados. Assim, o presente trabalho tem como objetivo caracterizar unidades de mapeamento de solos da região de Ibaté e São Carlos, SP, desenvolvidos de materiais basálticos e areníticos em função da declividade e altitudes correspondentes, baseado em modelo digital de elevação.

4.2 Desenvolvimento

4.2.1 Revisão de literatura

Informações do solo são necessárias tanto em escala regional quanto em escala nacional permitindo explorar o potencial de uso do solo. Em muitos países, principalmente os desenvolvidos, muitos esforços estão sendo feitos na tentativa de aumentar o número de levantamento de solos em escalas maiores.

O inventário sobre solos pode ser realizado pelos métodos convencionais como os sistemas de classificação de solo determinado por Embrapa (1995) e Soil Survey Staff (1998), respectivamente para o Brasil e Estados Unidos. Por outro lado, o solo também pode ser avaliado por métodos com fotos aéreas como os iniciados por Goosen (1968), Westin e Frazee (1976) e Venkataratnam (1980). Geralmente os métodos convencionais são trabalhosos, caros e demorados, quando comparados com as modernas técnicas de mapeamento (SINGH; DWIVEDI, 1986). Da mesma forma que a classificação de solos evoluiu no Brasil (CAMARGO; KLANT; KAUFFMAN, 1987; EMBRAPA, 1999) e nos EUA (SOIL SURVEY STAFF, 1998), as técnicas auxiliares também o fizeram.

Neste aspecto, novas tecnologias como o sensoriamento remoto (SR) e o sistema de informações geográficas (SIG) podem ser utilizadas para auxiliar no levantamento de solos (USERY; POCKNEE; BOYDELL, 1995). A utilização do sensoriamento remoto baseia-se na interação da energia eletromagnética com os vários constituintes do solo, permitindo sua quantificação e discriminação. Vários estudos têm sido realizados para entender melhor o comportamento espectral dos solos (FORMAGGIO et al., 1996; MADEIRA NETTO, 1996). Assim, o sensoriamento remoto vem se destacando como uma importante ferramenta, que pode auxiliar no reconhecimento de solos (DEMATTE, 1999).

A interpretação visual das imagens orbitais traz resultados bastante satisfatórios, com a possibilidade de estratificação da região estudada em áreas homogêneas, tornando possível o planejamento global das atividades de campo e diminuindo o número de observações, que acarreta redução dos trabalhos de levantamento, com aumento da precisão dos traçados de limites entre as unidades de solos (VETTORAZZI; COUTO, 1990).

A incorporação de imagens de satélites dentro de um programa de mapeamento de solos, para delineamento de seus limites, tem se tornado extremamente significativo (AGBU; FEHRENBACHER; JANSEN, 1990).

Demattê et al. (2001) compararam várias metodologias para levantamento de solos e observaram que os métodos utilizando sensoriamento remoto produziram mapas muito similares ao levantamento detalhado, realizado pelo método tradicional. Posteriormente, Demattê e Nanni. (2003) coletando dados espectrais de vários solos em diferentes profundidades ao longo de uma topossequência puderam classificar o solo da região, obtendo maiores níveis de detalhes do que o mapa de solo existente.

O sistema de informações geográficas (SIG) criou uma evolução no modo de se determinar e disponibilizar as informações de um levantamento de solo. O método tradicional de mapeamento baseado quase que unicamente nas unidades de mapeamento está sendo substituída por mapeamentos baseados na criação de diversas camadas (*layers*) contendo várias informações sobre o solo, relevo, geologia, drenagens sendo armazenados em um banco de dados SIG.

As relações entre os solos e as formas da paisagem têm sido por longo tempo a base do mapeamento de solos. Tradicionalmente, utiliza-se a análise estereoscópica de fotografias aéreas para o delineamento manual das unidades de solo-paisagem que posteriormente são constatadas no campo. A análise digital do terreno introduz algumas vantagens em relação ao método tradicional para a separação dessas unidades; é uma alternativa rápida e econômica que pode ser aplicada para a quantificação e classificação do relevo, permitindo a definição automática ou semi-automática das unidades morfológicas da paisagem (IRVIN; VENTURA; SLATER, 1997; McBRATNEY; HART; McGARRY, 1991; MOORE et al., 1993; ODEH; CHITTLEBOROUGH; McBRATNEY, 1991; REIS; BARROS; REIS, 2004).

Uma forma de refinar o levantamento de solos é a utilização de dados que descrevem as características da paisagem. Particularmente, o uso de atributos derivados do MDE, devido a forte relação entre a forma da paisagem e os tipos de solo (BREEMEN; BUURMAN, 1998; BUOL et al., 1997).

Moore et al. (1993) determinaram correlações significativas entre atributos quantificáveis do terreno e propriedades do solo. Indicaram a utilização da técnica como uma primeira etapa nos levantamentos de solos, destacando que resultaria de utilidade tanto na amostragem dos solos como no desenvolvimento de modelos de localização das pedoformas. Irvin; Ventura e Slater (1997) utilizaram a informação derivada da análise digital do terreno (elevação, declividade, curvatura, radiação solar incidente e um índice topográfico) em classificações dos tipos ISODATA (Iterative Self-Organizing Data Analysis Technique) e lógica difusa (“fuzzy logic”) para a discriminação de pedoformas. Esses autores encontraram que os dois tipos de classificações numéricas replicaram as unidades de paisagem obtidas por métodos manuais e ainda permitiram maior detalhamento e quantificação dos elementos da paisagem.

Wanglu et al. (2003) examinaram a fusão de vários produtos do sensoriamento remoto (Landsat TM, IKONOS e fotos aéreas) e um modelo digital de elevação (MDE) para determinar uma melhor combinação desses produtos no mapeamento de diferentes classes de drenagens de

solos. Seus resultados demonstraram que houve um significativo aumento na predição espacial das classes de padrões de drenagem do solo quando utilizados técnicas de classificação de imagens e comparando os resultados com o método convencional de levantamento de solos.

4.2.2 Materiais e Métodos

4.2.2.1 Descrição da área de estudo

A área localiza-se no Estado de São Paulo, nos municípios de Ibaté e São Carlos. É delimitada pelas coordenadas geográficas 21°46' 55'' S / 48° 09' 42'' W e 22° 10' 08'' S / 47° 48' 33'' W (Anexos). Apresenta aproximadamente 9.000 ha cultivados com cana-de-açúcar em altitudes variando de 500 a 950 m do nível médio do mar. O clima da região, segundo Köppen, é do tipo Cwb (temperado com inverno seco), precipitação e temperatura média anual de 1000 a 1.800 mm e 20° C, respectivamente (ICMC, 2005).

A litologia é representada principalmente pelas formações Serra Geral, Botucatu e Pirambóia (Grupo São Bento) e Cobertura da Serra de Santana e Similares (Grupo Taubaté). As rochas da Formação Serra Geral são vulcânicas de derrames basálticos; a Formação Botucatu são arenitos eólicos; Formação Pirambóia constituídos de arenitos oriundos de depósitos fluviais e de planícies de inundação (BISTRICHI et al., 1981) (Anexos). A vegetação primitiva está representada predominantemente por Cerrados e Cerradões, e por matas nas áreas onde os solos são argilosos e mais férteis.

Os principais solos que ocorrem na região são o Latossolo Vermelho e Vermelho Amarelo, Nitossolo Vermelho, Argissolo Vermelho e Neossolo Litólico (OLIVEIRA, 1981a, b, 1982; OLIVEIRA et al., 1999) (Anexos) conforme classificação da Embrapa (1999).

4.2.2.2 Sequência de trabalho – Procedimentos metodológicos

A seqüência de trabalho é a seguir descrita.

Fase 1. Desenvolvimento da base de campo e do banco de dados

(a) Para ter uma representatividade dos solos da região foi elaborado um mapa pedológico semi-detalhado de acordo com Embrapa (1995). Além disso, para melhor detalhamento, foram compiladas informações de mapas pré-existentes como as cartas semi-detalhadas de Descalvado (OLIVEIRA, 1982), Brotas (OLIVEIRA, 1981a) e São Carlos (OLIVEIRA, 1981b) escala de publicação 1:100.000, mapa de reconhecimento de solos do Estado de São Paulo (OLIVEIRA et al., 1999) escala de publicação 1:500.000, carta planialtimétrica da região, com curvas de nível intercaladas de 5 em 5 metros (Anexos), e o mapa geológico de São Paulo (BISTRICHI et al., 1981) escala de publicação 1:500.000.

(b) Foi realizada fotointerpretação em fotografias aéreas escala 1:25.000, para visualização da rede de drenagem como auxílio na delimitação das paisagens. Foram alocados pontos para observação no campo pelo método da transeção (topossequências), tendo por objetivo identificar os limites de solos. Foram amostrados 100 pontos com trado em três profundidades 0-20, 40-60 e 80-100 cm, designadas de Camadas A, B e C, respectivamente (Anexos).

(c) As amostras foram analisadas quimicamente para determinar: pH (CaCl_2 , H_2O e KCl), teor de matéria orgânica, fósforo, potássio, magnésio, cálcio, alumínio e hidrogênio mais alumínio, segundo metodologia descrita em Raij et al. (2001) e, granulométricamente para determinar os teores de areia (grossa e fina), silte e argila (CAMARGO; KLANT; KAUFFMAN, 1987). Para ajudar na caracterização de alguns solos foi determinado o Fe_2O_3 total pelo método do ataque sulfúrico (CAMARGO et al., 1986). De posse destes resultados foram estabelecidos os limites reais entre as unidades de solos ao longo das topossequências. A classificação dos solos foi realizada seguindo os critérios estipulados pelo Sistema Brasileiro de Classificação de Solos (EMBRAPA, 1999). A cor do solo foi obtida úmida com colorímetro Minolta CR 300 para cor de Munsell, assim como em Campos; Demattê e Quartaroli (2003). Na determinação das cores pelo

colorímetro temos matizes com valores decimais e contínuos, por isso foram determinados matizes intermediários para classificação dos solos, onde matizes mais amarelas que 6.2YR foram consideradas amarelas, matizes mais vermelhas que 6.2YR e mais amarela que 3.7YR foram consideradas vermelho-amarela e por fim, matizes mais vermelhas que 3.7YR considerou-se vermelha.

(d) Foi montado um banco de dados com informações do local como os limites dos solos de acordo com cartas semi-detalhadas e de reconhecimento de solos, hidrografia, imagem de satélite, pontos de amostragens, rios, curvas de nível, estradas e geologia. Associados aos pontos de tradagens foram incluídos os resultados das análises de terra em ambiente de Sistema de Informações Geográficas, SIG (ESRI, 2000).

(e) A partir dos resultados das análises dos solos, das observações de campo e todo conjunto de informações da região, foram demarcados 12 perfis, nos quais foram realizadas a descrição morfológica de acordo com Lemos e Santos (1996) e definidas as unidades taxonômicas para finalmente elaborar o mapa semi-detalhado pelo método convencional, e servir de base para este estudo.

Fase 2. Modelagem de dados altimétricos e correlação com solos

(a) Utilizando-se as curvas de nível foi gerado um modelo digital de elevação do terreno (MDE). Na geração deste modelo foi utilizado a Rede Irregular de Triangulações (*Irregular Triangulated Networks* – TIN) que reproduz elevações ao plotar pontos em vértices de triângulos. O TIN é um conjunto de triângulos adjacentes, não sobrepostos, computados através de pontos irregulares espaçados na superfície do terreno, a partir dos pares de coordenadas x, y e dos valores de z (elevação). Foi utilizado o software ArcMap 8.3 (ESRI, 2000) módulo 3D Analyst. Segundo alguns autores (CÂMARA; MEDEIROS, 1998; FELGUEIRAS; CÂMARA, 2005), a grade triangular, permite maior precisão na análise quantitativa dos dados do que a grade retangular, e também são considerados melhores para representar as feições do relevo, pois capturam sua complexidade sem a necessidade de grande quantidade de dados.

(b) A partir da derivação do modelo digital do terreno foram geradas as declividades da área. A classificação das declividades foi realizada primeiramente conforme sugerido pela Embrapa (1999), sendo elas: 0-3 % (plano), 3-8 % (suave ondulado), 8-20 % (ondulado), 20-45 % (forte ondulado), 45-75% (montanhoso) e 75-100 % (escarpado). Com o objetivo de verificar em que faixas de declividade realmente, os solos podem ser caracterizados, foi gerada uma classificação com 23 classes, sendo elas: variando de 1 em 1% até 20% e depois repetiu-se as classes 45-75% e 75-100 %.

(c) Foram geradas 30 classes de elevação para o MDE, variando de 565 m a 865 m de altitude em intervalos de 10 em 10 metros.

(d) Com a finalidade de quantificar a ocorrência dos solos em relação a elevação e declividade do terreno, efetuou-se a tabulação cruzada dos planos de informação (PI) referentes ao mapa de solos *versus* classes de declividade, e mapa de solos *versus* classes de elevação. Este dispositivo, permitiu calcular as áreas das interseções entre as classes e o mapa de solo.

(e) Foi realizada uma análise média dos solos quanto sua distribuição em relação à altitude e a elevação, sendo avaliado: mínimo, máximo, variação, média e desvio padrão para cada classe de solo.

(f) Foram avaliados e caracterizados os solos da região com suas respectivas posições no relevo e níveis de declividade.

Fase 3. Conclusão/Sugestão

Baseado na análise das informações de declividade, foi elaborada uma tabela final com as faixas de declividade mais ocorrentes e seus respectivos solos para referida região.

4.2.3 Resultados e Discussão

4.2.3.1 Distribuição dos Solos da Região

O estabelecimento da distribuição cartográfica das classes de solos presentes foi realizada, pelo método convencional, como estabelecido por Embrapa (1995). Conforme o levantamento realizado na área de estudo foi gerado um mapa com as classes de solos identificadas na região (Figura 1). O mapa indica uma área bastante heterogênea, predominando ao norte nos topos os Latossolos e próximos aos canais de drenagem os Argissolos. Na medida em que se vai em direção sul surgem os solos ricos em ferro, LV's e NV's, justamente pela presença do material de origem, o basalto. Toda parte sul é demarcada por uma encosta predominantemente de basalto ocorrendo os CX's e os RL's. Na parte maior ao sul e inferior à encosta, surgem solos com material mais arenoso misturado a solos argilosos.

Verifica-se que na maior parte da área predomina o Latossolo Amarelo, abrangendo aproximadamente 30% do local de estudo, seguido do Argissolo Vermelho (12,1 %), Neossolo Litólico (10,5 %) e Nitossolo Vermelho (10,2 %). Essa distribuição está de acordo com a representatividade dos solos tropicais, onde predominam aqueles com maior relação infiltração/deflúvio, com horizontes diagnósticos B latossólicos (B_w). O LA apresentou-se em declividade máxima de 10,8 % (Tabela 1) com baixo desvio padrão. Entretanto, a média geral da declividade, que melhor representa esta unidade foi de 2,3 %.

Também comum e importante é a presença dos Argissolos com drenagem moderada e caracterizados pelo horizonte diagnóstico B textural (B_t). Esses solos, por sua vez, encontram-se em declividades superiores a 20 %, o que está coerente por ser um solo com drenagem moderada. Os Cambissolos (CX), solos pouco profundos com horizonte diagnóstico B incipiente (B_i), estão localizados em áreas de declividade acentuada, próximo a 30 %, porém, semelhantes à alguns Argissolos (PVA) que também são encontrados em declividades acentuadas. Por outro lado, a média do CX é maior, chegando a 7,7 %. Isso indica que áreas dos CX também podem ocorrer em declividades similares aos Argilosos (Tabela 1).

4.2.3.2 Relevo vs Classes de Solos

O termo relevo refere-se às formas do terreno que compõem a paisagem. Sua ação reflete-se diretamente sobre a dinâmica da água, tanto no sentido vertical (infiltração), como lateral (escoamento superficial – enxurradas e dentro do perfil), quer indiretamente (temperatura e umidade) através da incidência diferenciada da radiação solar, do decréscimo das temperaturas com o aumento das altitudes, e sobre os seres vivos e o tipo de vegetação (OLIVEIRA; JACOMINE; CAMARGO, 1992).

Para a elaboração do plano de informação referente ao relevo da região, isto é o modelo digital de elevação (MDE), foi necessária a obtenção das curvas de nível. A partir destes dados gerou-se um MDE (Figura 2) de grade irregular triangular. Verificou-se que o mapa de solos (Figura 1) aponta semelhanças importantes com o MDE (Figura 2), como os limites entre as classes e sua distribuição espacial na paisagem.

Assim, o MDE pode auxiliar na identificação de unidades de paisagem. Nota-se uma tendência de aparecimento de determinadas classes de solos em posições específicas do relevo para a região estudada (Figuras 1 e 2). Isto ocorre pois a topossequência é a seqüência de solos relacionados que diferem uns dos outros primariamente, devido a topografia como um fator de formação do solo (CURI, 1993). Observa-se que a mancha do LAd na parte norte, bem como o PVd ao longo do canal de drenagem é bastante semelhante (Figuras 1 e 2), essa tendência mostra a utilidade do referido MDE. Por outro lado, também se verifica vários pontos onde não há variação significativa do modelo, mas há no mapa de solos. Isto leva a crer que as variações de campo são mais complexas e exigem verificações de campo ou de outros métodos auxiliares.

Após obtido o MDE fez-se uma derivação do mesmo para obter as declividades do terreno. Primeiramente foram geradas 6 classes de declividade, as mesmas sugeridas por Embrapa (1999) (Tabela 2). Constata-se que a paisagem é composta predominantemente por formas suave onduladas (48,0 %) e planas (40,7 %) e somente 9,9 % e 1,4 % encontram-se em um terreno ondulado e fortemente ondulado, respectivamente (Figura 2 e Tabela 2).

A princípio, a distribuição da área dentro dessas faixas de declividades sugeridas pela Embrapa (1999), levariam a crer a existência de poucas classes de solo na região devido a pouca variação do relevo. No entanto, uma grande variação de solos dentro da área de estudo (Figura 1), corroborando a necessidade do maior detalhamento dessas declividades, para averiguar em quais

faixas podem ocorrer mudanças de solos e se em mesmas declividades pode haver diferentes classes de solos. A classificação sugerida por Embrapa (1999) deve ser mantida por ser de caráter geral e nacional, porém informações regionais devem ser levantadas e são discutidas a seguir.

4.2.3.3 Declividade vs Classes de Solos

Analisando-se a distribuição dos solos ao longo das classes de declividade sugeridas por Embrapa (1999), nota-se que a grande maioria dos solos está entre as duas primeiras faixas: plano e suave ondulado (Tabela 2). Apenas os Cambissolos e os Neossolos Litólicos são encontrados em porcentagens expressivas em outras faixas, podendo diferenciá-los dos outros solos por esta característica. Os solos que ocorrem em terrenos íngremes são submetidos ao rejuvenescimento (ablação), através dos processos erosivos naturais. Nas áreas cuja vegetação revela menor disponibilidade de água e/ou maior transitoriedade de residência das águas pluviais, as reações de hidrólise e dissolução processam-se em condições hídricas menos favoráveis à sua manifestação e, em contrapartida, é intensificada a ação dos fenômenos de umedecimento e secagem dos constituintes coloidais orgânicos. Disso resultam solos relativamente menos profundos e evoluídos (OLIVEIRA; JACOMINE; CAMARGO, 1992).

Verifica-se que os LVA's não foram encontrados em declividades maiores que 15,9 % (Tabelas 1 e 2). Concordando com os resultados obtidos por Lacerda et al. (2005), que correlacionaram dados de declividade, solo, geologia e vegetação nativa do Distrito Federal e verificando que os Latossolos se encontram em declividades de até 10 %. No entanto, Ippoliti et al. (2005), utilizando ferramentas de SIG (MDE) para o delineamento de geoformas e pedopaisagens no município de Viçosa, MG verificaram a presença de Latossolos Vermelho-Amarelo cambissólico em declives maiores que 45%. Estes mesmos autores observaram a presença de Cambissolos Háplicos latossólicos nesta mesma declividade. Enquanto que, na área avaliada deste trabalho, os CX foram identificados em declividade máxima de 29,6 %. Essas variações indicam a necessidade de caracterização regional da paisagem como base para futuros levantamentos.

Os LV's foram encontrados de forma equivalentes entre 0-3 e 3-8 % de declive, aproximadamente 50 % de ocorrência em cada uma delas. Reis; Barros e Reis (2004), utilizando-se também de técnicas de geoprocessamento para uma investigação detalhada de relacionamentos

entre relevo e classes de solo no município de Bandeirantes, Paraná, verificaram que 37,4 % dos LV's da área em estudo encontravam-se entre 0-3 % de declividade. Isso demonstra a variabilidade regional que ocorre na correlação entre solo e declive.

Conforme comentado os LV's concentram-se na faixa de 0 a 7 %, no entanto, Reis; Barros e Reis (2004) estudando solos do Município de Bandeirantes, Paraná, verificaram a presença deste solo em declividades de até 20 %. Observou-se a presença de unidade de mapeamento tipo associação LV + PV, onde a porcentagem de ocorrência aumenta na maior declividade, justamente pela presença do PV. Os LVA's e LA's ocorreram predominantemente em relevo plano (0-3 %), concordando com Oliveira; Jacomine e Camargo (1992). Tais autores afirmam que em terrenos aplainados a eliminação da água pelo escoamento superficial é diminuta, assim há um acentuado fluxo de água através do perfil, favorecendo a lixiviação de bases e a dessilicização, caracterizando os solos muito intemperizados.

O Nitossolo apresentou uma porcentagem significativa de sua área (17 %), distribuída em regiões onduladas (Tabela 2), concordando com Oliveira; Jacomine e Camargo (1992). Estes autores afirmam que esta classe de solo com perfil raso ou pouco profundo pode ocorrer em vertentes declivosas dos planaltos basálticos. Reis; Barros e Reis (2004) encontraram a maior parte do NV (38,8 %), distribuídos em terreno ondulados do Paraná. Por outro lado, a mesma unidade de mapeamento, o NV, também ocorre predominantemente (69 %) em áreas de 3-8 % na região de São Carlos (Tabela 2).

Na seqüência de unidades de mapeamento NV para NV + LV, diminui o grau de declividade (Tabela 2), justamente pela presença de solos mais profundos e permeáveis (Tabela 2).

Um mesmo solo que inicialmente poderia se julgar de difícil presença em áreas declivosas, pode ocorrer em terrenos mais acidentados, apesar de não ser em quantidades expressivas. Esse é o caso do LVA que em média ocorreram em áreas com declividade de 2,6 % mas também ocorrem em terrenos com declive de quase 16 % (Tabela 1), discordando de Oliveira; Jacomine e Camargo (1992), que alegam a presença deste solo em relevo plano a suave ondulado.

Como podemos observar, as classes de declividade sugeridas por Embrapa (1999), não indicam uma faixa específica de declive na qual possa ser inferido com maior segurança a possibilidade de ocorrência de determinado solo. Isto se deve em função de que a maioria dos

solos aparecem em apenas duas faixas, 0-3 e 3-8 % de declive. Desta forma, estas faixas foram “destrinchadas” para se obter um maior número de classes de declive na tentativa de definir melhor as classes de solos de acordo com a declividade do terreno (Tabela 2).

Os LV's são encontrados de forma quase equivalente entre 0-3 e 3-8 %, no entanto, a tabela mais detalhada mostra que há uma predominância deste solo (51,8 %) entre 2-4 % de declive (Tabela 2). O mesmo comportamento se observa para o LVA. Para o LA, verifica-se que sua presença está 55 % concentrada entre 1-3 % de declividade. Comparando-se os Latossolos com os Argissolos, nota-se que a distribuição dos Latossolos ficaram entre 1-4 %, enquanto que os Argissolos foram predominantes entre 3-6 % não diferindo muito dentro desta última classe. Somente o PA demonstrou ocorrer em declividades um pouco menores (2-5 %), mas ainda significativo na faixa de 5-6 %.

Verifica-se pelas classes da Embrapa (1999), que o Neossolo Quartzarênico concentra-se quase que em sua totalidade entre 0-8 % de declividade. O detalhamento (Tabela 2) indica que 75 % de sua ocorrência está situada entre 2 a 6 % de declividade. Nesses solos, os perfis são homogêneos, limitando-se a diferenciação à expressão de um horizonte A formado de materiais sumamente arenosos, sendo que, na fração areia o quartzo é o mineral dominante (RESENDE et al., 2005). São solos excessivamente drenados, por isso sua ocorrência predomina em locais planos a suave ondulados.

Alguns solos como os NV's não diferiram muito entre a tabela de declividade sugerida por Embrapa (1999) e a apresentada neste trabalho, mostrando que sua ocorrência ocorre predominantemente entre 3-7 % de declividade (Tabela 2).

Baseado nas faixas de declividade da Embrapa (1999), infere-se que o RL ocorre predominantemente (58 % do total) em declives entre 8-20 %. Porém, analisando-se a tabela 2 detalhada verifica-se que este solo ocorre de maneira uniforme por quase todas as declividades, havendo ocorrência equivalente do mesmo em declividades entre 5-7 %. O Cambissolo concentrou-se entre 4-10 % de declividade diferentemente das classes sugeridas pela Embrapa, onde este solo concentrava-se entre 3-20 %.

Procurou-se relacionar cada classe de solo com a declividade mais propícia de sua ocorrência nesta região (Tabela 2). Para tanto, levou-se em consideração os menores intervalos de declividade nos quais ocorressem pelo menos 50 % de determinada classe de solo de forma bem distribuída e apresentando a menor variação (Tabela 3). A utilização deste tipo de informação

pode auxiliar na tomada de decisões em futuras interpretações de solos da referida região tanto ao nível de campo como foto-interpretivo e outros métodos que necessitem de conhecimentos relativos à declividade *vs* solos.

4.2.3.4 Classes de Solos *vs* Elevação

Analisando-se a elevação média onde ocorrem as classes de solo na região estudada (Tabela 4) nota-se que não há uma altitude exata de ocorrência dos solos na paisagem, havendo grandes variações entre as posições de ocorrência da mesma classe de solo no relevo. Pode-se citar o Argissolo Vermelho-Amarelo, que ocorre de 605,0 a 851,0 metros de altitude, apresentando uma variação de 246,0 metros entre a menor e a máxima altitude em que aparece na paisagem. No entanto, o Latossolo Amarelo merece destaque, pois tem uma grande representatividade na área de estudo (29 %) e foi uma das classes que apresentou a menor variação de elevação 122,0 metros. Concordando com os resultados obtidos por Lacerda et al. (2005), que verificaram o predomínio de Latossolos nas superfícies geomorfológicas mais altas (100 a 1300 m), na região do Distrito Federal.

Apesar de aparentemente a maioria dos solos variarem muito quanto à altitude que aparece no relevo, nota-se uma tendência de determinados solos ocorrerem de forma predominante em certas posições (Tabela 5). Na parte mais alta da paisagem há uma predominância dos LA, concentrando-se aproximadamente 40% entre as altitudes de 815 a 835 metros. Contudo esta classe de solo também está presente em altitudes mais baixas (745-755 m), porém em quantidades pouco significativas 0,22%. Outro forte indicador da alta incidência do LA é que na região mapeada 1.302 ha (15% do total) encontra-se entre 825 a 865 m de altitude e nesta área o LA está presente em 1200 ha. Verifica-se que este solo ocorre em 2.625 ha (29 % da área total) numa elevação média de 824 metros de altitude (Tabela 4).

Analisando-se as outras subordens dos Latossolos, verifica-se que o LVA ocorre em posições mais baixas do relevo (775-805 m) em média à 782 metros, e os LV's 766 m. Este último, por sua vez, mostra-se mais bem distribuído ao longo da paisagem aparecendo em porcentagens similares entre 725 a 775 m (Tabela 5). Concordando com os resultados obtidos por Miklos (1992) que estudando uma transeção no reverso da Cuesta Basáltica do Planalto Ocidental, verificou a presença de LVA em altitudes médias de 800 metros e LV em 700 m.

Lepsch; Buol e Daniels (1977), estudando a região de Echaporã, SP, obtiveram resultados semelhantes aos deste trabalho e verificaram a presença de LV nas partes mais altas e planas da paisagem (700 m).

Analisando-se os Latossolos e os Argissolos, nota-se que, conforme a matiz vai ficando mais amarela aumenta-se a incidência desses solos nas áreas mais altas e planas e conforme a matiz vai se tornando mais vermelha aumenta a proporção desses solos em relevo suave ondulado, nas posições mais baixas do relevo (Tabela 5). Isto se deve a influência de diferentes materiais de origem no processo de formação desses solos. Nas partes mais altas têm-se grande influência dos arenitos, enquanto que nas posições inferiores, os diabásios.

Os PA's ocorrem em uma altitude média de 786 metros enquanto que os PVA's em 768 m e os PV's em 754 m (Tabela 4). Dos 9.000 ha mapeados 1.302 ha (15% do total) encontram-se entre 825 a 865 m e o LA está presente em 1.200 ha desta área. Este solo também se encontra distribuído em outras altitudes, porém em quantidades pouco expressivas (Tabela 4).

Solos mais argilosos como os Nitossolos concentraram-se em altitudes mais baixas principalmente entre 675 a 725 m de altitude (Tabela 5). Miklos (1992) identificou NV's em altitudes de aproximadamente 550 m.

Solos pouco intemperizados como os Neossolos Litólicos (RL) apresentaram-se bem distribuídos entre 615 e 795 m. Aloisi et al. (1976) encontraram a seguinte seqüência de solos em uma transeção estudada na região de Jaboticabal, SP, PVA (670 m), RL (660 m), PV (650 m), LV (630 m), LVf (620 m) e NV (550 m). Reis; Barros e Reis (2004) estudaram a distribuição espacial dos solos da região do município de Bandeirantes, Paraná, em relação à elevação e declividade do relevo, e constataram que de forma geral os Latossolos ocupam as partes mais elevadas da paisagem, onde o relevo é plano com declives suaves e o Nitossolo é encontrado nas meias encostas e nos sopés das elevações, em relevo ondulado e com pendentes mais acentuadas.

Algumas classes de solos como, RQ e CX, concentraram-se em determinadas altitudes, em torno de 689 e 762 metros respectivamente (Tabela 5), no entanto, a área total de cada um desses solos foi pequena dentro da área de estudo (Tabela 4).

Na região destaca-se as cuestas arenítico-basálticas. O limite entre a Depressão Periférica e as Cuestas Basálticas é a frente escarpada formando paredões, esculpidos em arenitos e basaltos das formações Serra Geral, Botucatu e Pirambóia. Este paredão, extremamente íngreme, que em algumas posições do relevo atinge quase a verticalidade, é representado por exposições de basalto

e arenito Botucatu-Pirambóia. Analisando-se a declividade e elevação em que ocorre o Neossolo Quartzarênico (Tabelas 2 e 5 respectivamente), verifica-se que o RQ ocorre predominantemente em terrenos planos a suave ondulados e em altitudes mais baixas, sendo isto característico da região, onde ocorrem depósitos de materiais arenosos no sopé dos morros testemunhos de basalto (Figura 3). Concordando com Oliveira e Prado (1984) que no levantamento pedológico semi-detalhado da região de São Carlos verificaram espessos depósitos arenosos que constituem os cones de dejeção do sopé dessa frente escarpada, desenvolvendo-se os Neossolos Quartzarênicos.

Comparando os resultados deste trabalho com os obtidos por Prado (1995), que estudou a distribuição dos solos na paisagem em diversas regiões do Brasil, nota-se que a ocorrência dos solos em determinadas posições do relevo varia muito de região para região. Numa transeção feita no Estado de Rondônia por exemplo, observou que a associação dos solos RQ + RL ocorriam predominantemente nas partes mais altas (600 m). Por outro lado, nas regiões mais baixas e planas ocorreram associações de LA + AQ (200 m). Neste local, também foi observado a presença de morros testemunhos em altitudes de 200 a 400 m, desenvolvendo solos como PVA + NV + RL (Figura 3).

4.3 Conclusões

1. O comportamento dos solos com a declividade é variável. Um mesmo solo pode ocorrer em diferentes declives. Solos diferentes também podem ocorrer na mesma classe. Existe entretanto, uma predominância de ocorrência de cada solo de uma faixa específica de declividade. Na região estudada os LA's ocorrem principalmente nas partes mais altas do relevo (815-835 m) e os RQ's nas posições mais baixas (685-725 m);
2. Cada solo apresentou um comportamento diferenciado em relação às classes de declive. Porém nas faixas limítrofes de declividade pode ocorrer sobreposição de dois ou mais solos. Na região de São Carlos os Latossolos ocorrem predominantemente em relevo plano a suave ondulado e os Neossolos Litólicos aparecem em diferentes faixas de declividade, desde terrenos planos até forte ondulado;

3. A relação entre solos e classes de declive é dependente e devem ser devidamente caracterizadas na região. Na área de estudo em questão sugere-se as seguintes classes e os respectivos solos: 2-4 % (LV); 1-4 % (LVA); 1-3 % (LA); 3-7 % (NV); 3-6 % (PV e PVA); 2-5 % (PA); 0-6 % (RQ); 5-9 % (CX); 5-45 % (RL);
4. O modelo de elevação apresenta semelhanças com o mapa de solos e pode auxiliar no modelo. Porém, as variações de solos mostram-se mais complexas e exigem verificações de campo como apoio para o modelo.

Tabela 1 - Distribuição das classes de solos em relação a declividade do terreno

Unidades de mapeamento ⁽¹⁾	Área ha	Ocorrência	Declividade				DP ⁽²⁾
			Mínima	Máxima	Varição	Média	
			----- % -----				
LV	649,3	7,2	0,0	10,5	10,5	3,0	1,6
LV + PV	132,6	1,5	0,0	9,1	9,1	4,0	1,4
LVA	725,3	8,0	0,0	15,9	15,9	2,6	1,8
LA	2625,8	29,0	0,0	10,8	10,8	2,3	1,4
LA + LVA	139,8	1,5	0,0	8,3	8,3	3,1	1,3
NV	921,0	10,2	0,0	29,9	29,9	5,8	3,0
NV + LV	61,8	0,7	0,0	8,6	8,6	4,0	1,5
PV	1094,1	12,1	0,0	20,3	20,3	4,1	2,2
PV + PVA	130,1	1,4	0,0	9,4	9,4	4,3	1,9
PVA	818,9	9,1	0,0	31,5	31,5	4,2	2,3
PA	498,2	5,5	0,0	10,0	10,0	3,5	1,7
RQ	95,3	1,1	0,0	9,9	9,9	4,0	2,4
CX	29,2	0,3	0,0	29,6	29,5	7,7	3,7
CX + RL	170,1	1,9	0,0	24,7	24,7	8,0	4,3
RL	951,7	10,5	0,0	36,8	36,8	12,2	6,2

⁽¹⁾ Nomenclatura de acordo com Embrapa (1999). Latossolo Vermelho (LV), Latossolo Vermelho-Amarelo (LVA), Latossolo Amarelo (LA), Nitossolo Vermelho (NV), Argissolo Vermelho (PV), Argissolo Vermelho-Amarelo (PVA), Argissolo Amarelo (PA), Neossolo Quartzarênico (RQ), Cambissolo Háplico (CX), Neossolo Litólico (RL)

⁽²⁾ Desvio padrão

Tabela 2 - Ocorrência das classes de solos em diferentes declividades

Declividade ⁽¹⁾	Unidades de Mapeamento ⁽³⁾															Área ha	Ocorrência %
	LV	LV + PV	LVA	LA + LVA	LA	NV	NV + LV	PV	PVA	PV + PVA	PA	RQ	CX	CX + RL	RL		
	----- % -----																
0-3 %	49,3	22,8	62,6	48,5	71,3	12,8	19,4	26,7	27,5	23,7	36,5	34,8	5,5	6,1	3,0	3671	41
3-8 %	50,4	77,1	35,6	51,5	28,6	69,8	80,5	70,1	68,9	74,5	63,2	61,5	52,1	53,9	24,2	4335	48
8-20 %	0,3	0,1	1,8	0,0	0,1	17,0	0,1	3,2	3,5	1,8	0,3	3,6	40,9	39,3	59,9	893	10
20-45 %	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,3	0,0	0,0	0,1	0,0	0,0	0,0	1,4	0,7	12,9	128	1
45-75 %	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0	0
75-100 %	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0	0
Declividade ⁽²⁾																	
0 - 1 %	10,2	1,8	16,9	16,4	2,9	4,1	5,2	11,0	4,9	8,9	10,5	14,6	1,4	1,9	1,2	946	10
1 - 2 %	12,3	3,0	17,9	25,7	15,7	1,5	1,9	4,2	4,9	4,4	6,9	5,5	1,7	1,6	0,5	1059	12
2 - 3 %	26,9	18,0	27,8	29,2	29,9	7,3	12,3	11,5	13,8	14,1	19,1	14,7	2,4	2,6	1,3	1666	18
3 - 4 %	24,9	31,5	21,9	18,3	27,0	13,0	31,1	19,3	20,5	19,1	24,2	15,9	6,9	9,1	2,7	1591	18
4 - 5 %	15,8	21,2	9,6	6,9	15,7	16,9	26,2	20,5	17,3	22,1	21,3	15,7	8,1	9,1	3,0	1169	13
5 - 6 %	6,8	16,0	3,1	2,4	7,2	16,3	16,7	16,6	17,2	15,5	13,0	13,1	10,8	15,5	5,1	803	9
6 - 7%	2,3	6,7	0,6	0,8	1,2	14,1	4,8	9,5	13,5	8,7	3,9	8,9	15,6	13,4	6,6	493	5
7 - 8 %	0,7	1,7	0,4	0,2	0,4	9,6	1,7	4,3	5,9	3,5	0,7	8,1	10,7	6,7	6,8	279	3
8 - 9 %	0,2	0,1	0,4	0,1	0,0	6,9	0,1	1,9	1,7	1,6	0,3	2,3	12,6	5,7	7,2	192	2
9 - 10 %	0,0	0,0	0,5	0,0	0,0	3,8	0,0	0,8	0,2	0,5	0,0	1,3	8,2	6,0	6,7	130	1
10 - 11 %	0,0	0,0	0,5	0,0	0,0	2,2	0,0	0,2	0,0	0,3	0,0	0,0	7,2	4,8	7,3	109	1
11 - 12 %	0,0	0,0	0,2	0,0	0,0	1,2	0,0	0,1	0,0	0,3	0,0	0,0	5,6	4,1	7,2	93	1
12 - 13 %	0,0	0,0	0,2	0,0	0,0	0,6	0,0	0,0	0,0	0,1	0,0	0,0	2,8	4,4	6,8	81	1
13 - 14 %	0,0	0,0	0,1	0,0	0,0	0,5	0,0	0,0	0,0	0,2	0,0	0,0	1,6	3,7	5,1	62	1
14 - 15 %	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,4	0,0	0,0	0,0	0,1	0,0	0,0	1,0	3,3	4,1	51	1
15 - 16 %	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,4	0,0	0,0	0,0	0,2	0,0	0,0	0,4	2,1	3,8	45	1
16 - 17 %	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,4	0,0	0,0	0,0	0,1	0,0	0,0	0,4	1,6	3,2	38	0
17 - 18 %	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,2	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,6	1,4	2,8	32	0
18 - 19 %	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,2	0,0	0,0	0,0	0,1	0,0	0,0	0,2	1,6	2,9	32	0
19 - 20 %	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,3	0,6	2,6	28	0
20 - 45 %	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,3	0,0	0,0	0,0	0,1	0,0	0,0	1,4	0,7	12,9	128	1
45 - 75%	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0	0
75-100%	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0	0

⁽¹⁾ Intervalos de declive de acordo com Embrapa (1999)

Plano (0-3%), Suave Ondulado (3-8%), Ondulado (8-20%), Forte Ondulado (20-45%), Montanhoso (45-75%), Escarpado (75-100%)

⁽²⁾ Declividades detalhadas para avaliação e comparação

⁽³⁾ Nomenclatura de acordo com Embrapa (1999)

Tabela 3 - Sugestão das classes de declividade para cada classe de solo da área de estudo

Classes de Solo ⁽¹⁾	Siglas	Faixas de declividade predominante dos solos
		----- % -----
Latossolo Vermelho	LV	2-4
Latossolo Vermelho-Amarelo	LVA	1-4
Latossolo Amarelo	LA	1-3
Nitossolo Vermelho	NV	3-7
Argissolo Vermelho	PV	3-6
Argissolo Vermelho-Amarelo	PVA	3-6
Argissolo Amarelo	PA	2-5
Neossolo Quartzarênico	RQ	0-6
Cambissolo Háptico	CX	5-9
Neossolo Litólico	RL	5-45

⁽¹⁾ Nomenclatura de acordo com Embrapa (1999)

Tabela 4 - Distribuição das classes de solos em relação à altitude do terreno

Unidade de mapeamento ⁽¹⁾	Área ha	Ocorrência %	Altitude				DP ⁽²⁾
			Minima	Máxima	Variação	Média	
			----- metros -----				
LV	649,30	7,18	659,70	820,00	160,30	766,91	37,20
LV + PV	132,58	1,47	704,86	755,00	50,14	731,95	11,87
LVA	725,29	8,02	722,47	851,54	129,07	782,66	25,00
LA	2625,78	29,04	743,06	865,00	121,94	824,22	21,49
LA + LVA	139,80	1,55	714,47	812,63	98,17	796,04	11,34
NV	921,01	10,18	607,49	816,50	209,01	718,24	41,54
NV + LV	61,79	0,68	680,31	730,53	50,22	713,73	8,66
PV	1094,06	12,10	643,93	839,09	195,16	754,22	41,25
PV + PVA	130,09	1,44	659,15	759,55	100,40	713,44	21,25
PVA	818,86	9,05	605,00	850,98	245,98	768,42	64,36
PA	498,24	5,51	719,93	829,56	109,63	786,67	23,04
RQ	95,29	1,05	655,00	723,37	68,37	689,83	19,09
CX	29,23	0,32	671,40	821,79	150,39	762,30	36,07
CX + RL	170,13	1,88	603,19	747,51	144,32	675,32	29,43
RL	951,74	10,52	574,86	808,45	233,59	692,64	50,31

⁽¹⁾ Nomenclatura de acordo com Embrapa (1999). Latossolo Vermelho (LV), Latossolo Vermelho-Amarelo (LVA), Latossolo Amarelo (LA), Nitossolo Vermelho (NV), Argissolo Vermelho (PV), Argissolo Vermelho-Amarelo (PVA), Argissolo Amarelo (PA), Neossolo Quartzarênico (RQ), Cambissolo Háplico (CX), Neossolo Litólico (RL)

⁽²⁾ Desvio padrão

Tabela 5 - Porcentagem de ocorrência das classes de solos (mapa de campo) com respectivas altitudes

(continua)

Elevação (m)	Unidades de Mapeamento ⁽¹⁾															Área	
	LA	LA + LVA	PA	LVA	PVA	LV	CX	PV	LV + PV	NV	NV + LV	PV + PVA	RL	RQ	CX + RL	ha	%
855-865	2,5	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	64,7	0,7
845-855	10,2	0,0	0,0	0,3	0,1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	271,4	3,0
835-845	12,8	0,0	0,0	2,7	2,4	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	374,1	4,1
825-835	19,8	0,0	0,0	1,2	7,5	0,0	0,0	0,1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	592,5	6,6
815-825	19,2	0,0	5,5	1,1	12,2	4,0	2,2	3,5	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	702,6	7,8
805-815	15,6	8,2	15,3	7,5	16,5	16,4	14,0	6,8	0,0	1,3	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	882,3	9,8
795-805	9,9	38,2	15,2	15,1	12,0	13,8	9,7	6,4	0,0	4,3	0,0	0,0	0,7	0,0	0,0	802,2	8,9
785-795	4,4	36,8	18,2	12,0	6,5	4,4	4,2	6,8	0,0	2,3	0,0	0,0	1,2	0,0	0,0	536,8	5,9
775-785	2,4	16,7	15,8	20,1	8,9	2,3	34,7	9,3	0,0	4,7	0,0	0,0	3,3	0,0	0,0	588,2	6,5
765-775	1,8	0,2	11,0	12,4	4,4	9,2	17,4	10,0	0,0	3,8	0,0	0,0	3,6	0,0	0,0	470,9	5,2
755-765	1,2	0,0	6,6	7,9	0,9	11,3	2,2	11,5	0,0	3,9	0,0	0,1	4,2	0,0	0,0	402,7	4,5
745-755	0,2	0,0	6,2	15,3	0,4	10,5	0,0	7,8	10,2	5,4	0,0	4,6	4,5	0,0	0,0	415,9	4,6
735-745	0,0	0,0	5,2	3,8	0,3	8,7	0,0	6,1	26,4	4,4	0,0	12,1	5,5	0,0	0,8	323,4	3,6
725-735	0,0	0,0	0,9	0,6	0,2	7,1	0,0	7,6	32,2	4,9	1,5	16,6	5,3	0,0	3,3	304,9	3,4
715-725	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	3,7	0,0	7,2	17,9	7,6	38,6	13,4	4,4	2,7	5,3	291,1	3,2
705-715	0,0	0,0	0,0	0,0	0,4	3,2	0,0	5,7	13,0	11,9	35,9	14,7	4,4	21,4	4,8	325,6	3,6
695-705	0,0	0,0	0,0	0,0	1,2	4,1	0,0	4,2	0,3	14,1	22,4	16,2	6,6	29,3	7,3	348,1	3,9
685-695	0,0	0,0	0,0	0,0	3,1	1,3	0,0	2,9	0,0	11,6	1,5	12,8	7,0	18,3	9,2	288,4	3,2
675-685	0,0	0,0	0,0	0,0	5,9	0,0	11,5	1,4	0,0	9,4	0,0	9,5	7,5	10,9	11,0	265,8	2,9
665-675	0,0	0,0	0,0	0,0	5,9	0,0	4,0	1,4	0,0	5,6	0,0	0,0	8,3	8,8	10,4	220,9	2,4
655-665	0,0	0,0	0,0	0,0	4,1	0,0	0,0	0,8	0,0	1,7	0,0	0,0	7,8	3,9	14,8	161,8	1,8
645-655	0,0	0,0	0,0	0,0	2,9	0,0	0,0	0,4	0,0	1,5	0,0	0,0	7,0	4,6	15,7	138,9	1,5
635-645	0,0	0,0	0,0	0,0	2,2	0,0	0,0	0,0	0,0	0,7	0,0	0,0	5,9	0,0	11,4	99,8	1,1
625-635	0,0	0,0	0,0	0,0	1,1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,7	0,0	0,0	4,4	0,0	3,0	62,9	0,7
615-625	0,0	0,0	0,0	0,0	0,5	0,0	0,0	0,0	0,0	0,2	0,0	0,0	3,8	0,0	1,9	44,8	0,5

Tabela 5 - Porcentagem de ocorrência das classes de solos (mapa de campo) com respectivas altitudes

(conclusão)

Elevação (m)	Unidades de Mapeamento ⁽¹⁾															Área	
	LA	LA + LVA	PA	LVA	PVA	LV	CX	PV	LV + PV	NV	NV + LV	PV + PVA	RL	RQ	CX + RL	ha	%
605-615	0,0	0,0	0,0	0,0	0,2	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	2,4	0,0	1,0	26,0	0,3
595-605	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	1,1	0,0	0,1	10,8	0,1
585-595	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,7	0,0	0,0	7,1	0,1
575-585	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,3	0,0	0,0	3,0	0,0
565-575	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,1	0,0

⁽¹⁾ Nomenclatura de acordo com Embrapa (1999). Latossolo Vermelho (LV), Latossolo Vermelho-Amarelo (LVA), Latossolo Amarelo (LA), Nitossolo Vermelho (NV), Argissolo Vermelho (PV), Argissolo Vermelho-Amarelo (PVA), Argissolo Amarelo (PA), Neossolo Quartzarênico (RQ), Cambissolo Háplico (CX), Neossolo Litólico (RL)

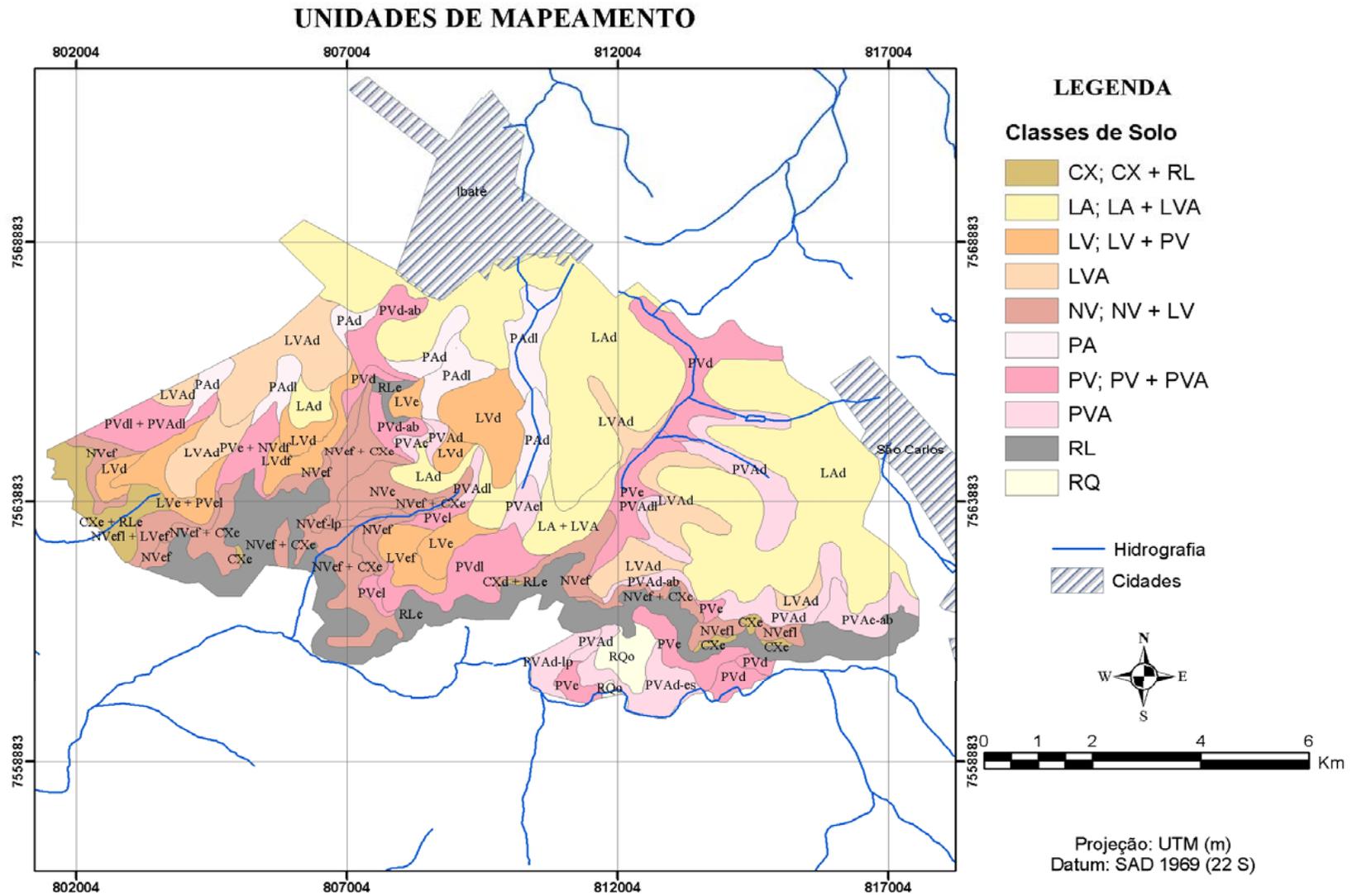


Figura 1 - Mapa de solos semi-detalhado elaborado pelo método tradicional de campo na referida área de estudo

MODELO DIGITAL DE ELEVAÇÃO

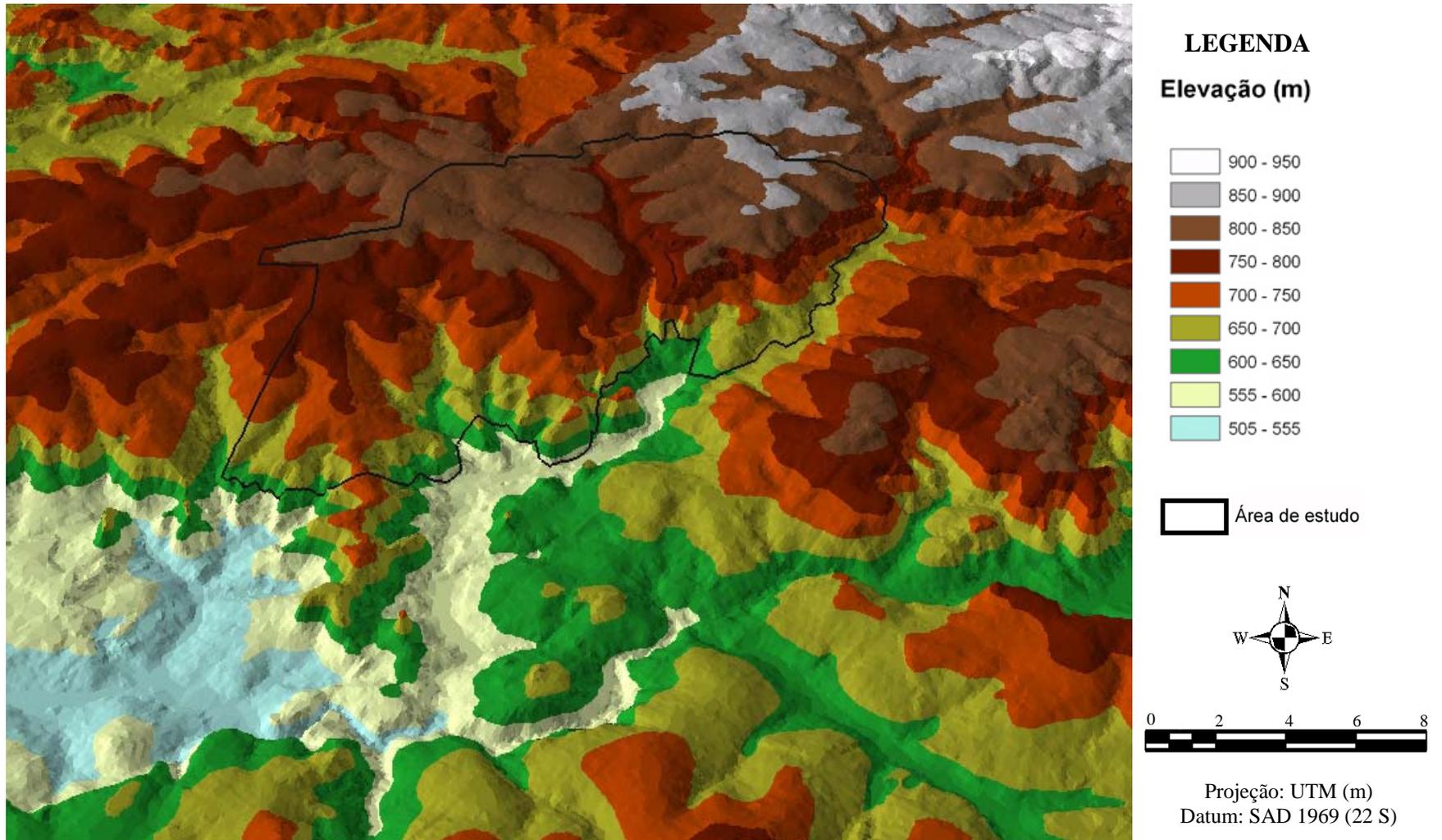


Figura 2. Modelo Digital de Elevação da área de estudo

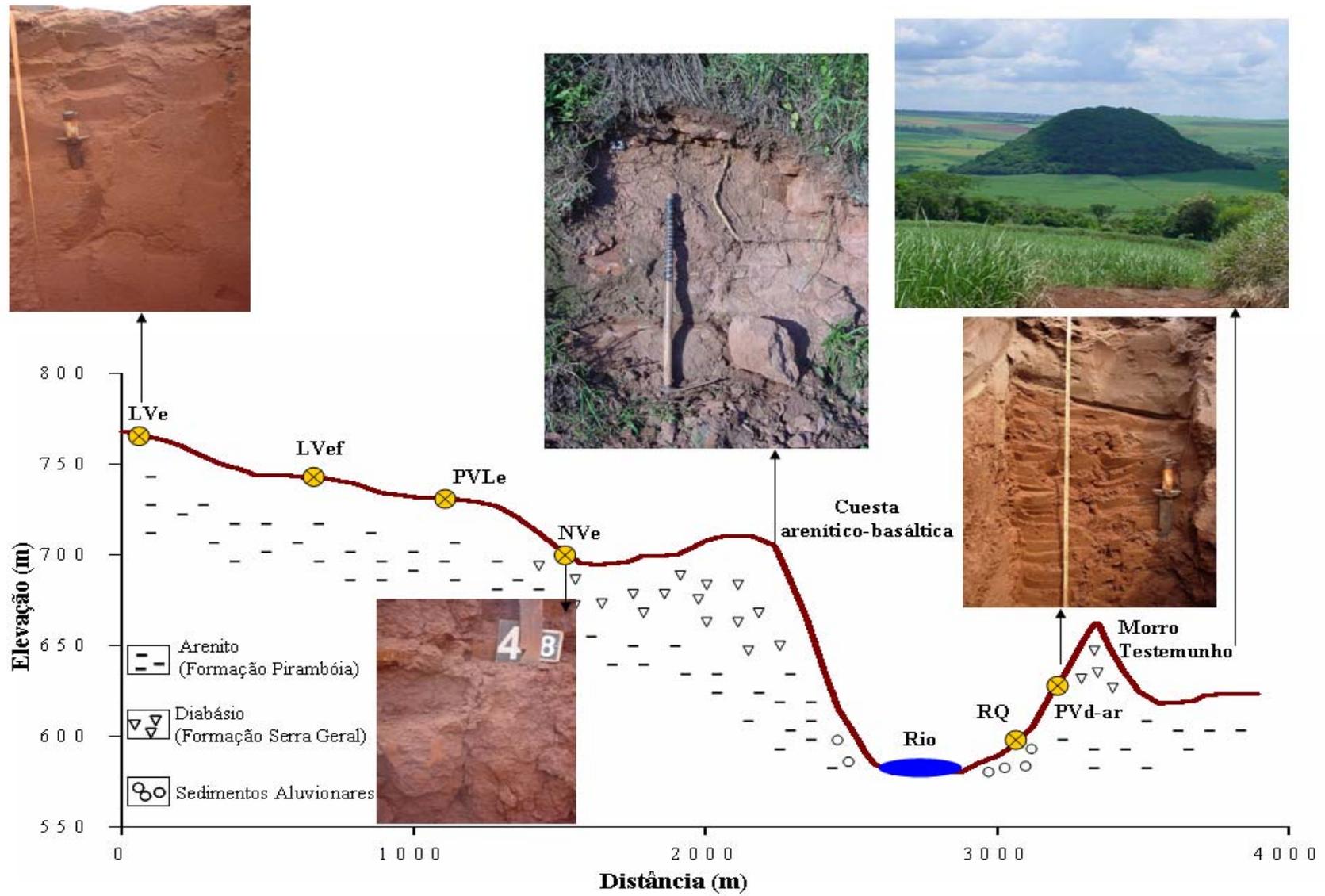


Figura 3 - Variabilidade espacial dos solos e da paisagem na área de estudo

Referências

- AGBU, P.A.; FEHRENBACHER, D.; JANSEN, I.J. Soil property relationships with SPOT satellite digital data in east central Illinois. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 54, n. 3, p. 807-812, May/June 1990.
- ALOISI, R.R.; RANZANI, G.; DEMATTÊ, J.L.I.; CERRI, C.C. Mineralogia da fração argila de alguns solos do município de Jaboticabal, SP. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA DO SOLO, 15., 1975, Campinas. **Anais...**Campinas: SBCS, 1976. p. 457-460.
- BISTRICHI, C.A.; CARNEIRO, C.D.R.; DANTAS, A.S.L.; PONÇANO, W.L.; CAMPANHA, G.A.C.; NAGATA, N.; ALMEIDA, M.A.; STEIN, D.P.; MELO, M.S.; CREMONINI, O.A. **Mapa geológico do Estado de São Paulo**. São Paulo: Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo, 1981. 1 mapa, Escala: 1: 500.000.
- BREEMEN, N. van; BUURMAN, P. **Soil formation**. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers, 1998. 377 p.
- BUOL, S.W.; HOLE, F.D.; MCCRACKEN, R. J.; SOUTHARD, R.J. **Soil genesis and classification**. 4th ed. Ames: Iowa State University Press, 1997. 526 p.
- CÂMARA, G.; MEDEIROS, J.S.de. Princípios básicos em geoprocessamento. In: ASSAD, E.D.; SANO, E.E., (Ed.) **Sistema de informações geográficas: aplicações na agricultura**. Planaltina: EMBRAPA, 1998. cap. 1. p. 3-11.
- CAMARGO, M.N.; KLANT, E.; KAUFFMAN, J.H. **Classificação de solos usada em levantamentos pedológicos no Brasil**. Campinas: SBCS, Boletim Informativo, v. 12. n. 1, p. 11-13, jan./abr. 1987.
- 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).
- CAMPOS, R.C.; DEMATTÊ, J.A.M.; QUARTAROLI, C.F. Determinação indireta do teor de hematita no solo a partir de dados de colorimetria e radiometria. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 38, n. 4, p. 521-528, abr. 2003.
- CURI, N. (Coord.). **Vocabulário de ciência do solo**. Campinas: SBCS, 1993. 69 p.
- DEMATTÊ, J.A.M. **Reflectância espectral de solos**. 1999. 452 p. Tese (Livre- Docência) - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Universidade de São Paulo, Piracicaba, 1999.
- 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**, Oxon, v. 24, n. 23, p. 4715-4738, Dec. 2003.

DEMATTÊ, J.A.M.; DEMATTÊ, J.L.I.; CAMARGO, W.P.; FIORIO, P.R.; NANNI, M.R. Remote sensing in the recognition and mapping of tropical soils developed on topographic sequences. **Mapping Sciences & Remote Sensing**, Columbia, v. 38, n. 2, p. 79-102, Apr./June 2001.

EMBRAPA. **Procedimentos normativos de levantamentos pedológicos**: normas em uso pelo SNLCS. Brasília: Serviço de Produção de Informação, 1995. 101 p.

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

ENVIRONMENTAL SYSTEMS RESEARCH INSTITUTE. **ARCGIS 8.3**. Redlands, 2000. 3 CD-ROM

FELGUEIRAS, C.A.; CÂMARA, G. Modelagem numérica do terreno. In: CÂMARA, G.; DAVIS, C.; MONTEIRO, A.M.V.(Ed.). **Introdução a ciência da geoinformação**. São José dos Campos: INPE, 2005. cap.7, 38p. Disponível em: <<http://www.dpi.inpe.br/livros.html>>. Acesso em: 30 abril 2005.

FORMAGGIO, A.R.; EPIPHANIO, J.C.N.; VALERIANO, M.M.; OLIVEIRA, J.B. Comportamento espectral (450-2.450 nm) de solos tropicais de São Paulo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v. 20, p. 467-474,1996.

GOOSEN, D. **Interpretacion de fotos aereas y su importancia en levantamiento de suelos**. Roma: FAO, 1968. 55 p. (FAO. Boletim sobre Suelos, 6).

INSTITUTO DE CIÊNCIAS MATEMÁTICAS E DE COMPUTAÇÃO. Disponível em: <<http://www.icmc.usp.br/ambiente/saocarlos/geral.html>>. Acesso em: 08 nov. 2005.

IPPOLITI, R.G.A.; COSTA, L.M.; SHAEFER, C.E.G.R.; FERNANDES FILHO, E.I.; GAGGERO, M.R. Análise digital do terreno: ferramenta na identificação de pedoformas em microbacia na região de “Mar de Morros” (MG). **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.29, n. 2, p. 269-276, maio/abr. 2005.

IRVIN, B.J.; VENTURA, S.J.; SLATER, B.K. Fuzzy and isodata classification of landform elements from digital terrain data in Pleasant alley. **Geoderma**, Amsterdam, v. 77, n. 2-4, p. 137-154, Jun. 1997.

JOAQUIM, A.C.; BELLINASSO, I.F.; DONZELLI, J.L.; QUADROS, A.D.; BARATA, M.Q.S. Potencial e manejo de solos cultivados com cana-de-açúcar. In: SEMINÁRIO COPERSUCAR DE TECNOLOGIA AGRONÔMICA, 6., 1994, Piracicaba. **Anais...** Piracicaba: Centro de Tecnologia Copersucar, 1994, p.1-10.

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.

LEMOS, R.C. de; SANTOS, R.D. dos. **Manual de descrição e coleta de solo no campo**. 3. ed. Campinas: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 1996. 84 p.

LEPSCH, I.F.; BUOL, S.W.; DANIELS, R.B. Soil-landscape relations in Occidental Plateau of São Paulo State, Brazil: I. Geomorphic surfaces and soil mapping units. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 41, n. 1, p. 104-115, Jan./Fev. 1977.

MADEIRA NETTO, J.S. Spectral reflectance properties of soils. **Photo Interprétation**. Paris, v. 34, n. 2, p. 59– 70. Oct. 1996.

McBRATNEY, A.B.; HART, G.A.; McGARRY, D. The use of region partitioning to improve the representation of geostatistically mapped soil attributes. **Journal of Soil Science**, Oxon, v. 42, n. 3, p. 513-531, Sep. 1991.

McBRATNEY, A.B.; SANTOS, M.L.M.; MINASNY, B. On digital soil mapping. **Geoderma**, Amsterdam, v. 117, n. 1/2, p.3-52, Nov. 2003.

MIKLOS, A.A **Biodynamique d'une couverture pédologique dans la region de Botucatu (Brésil-SP)**. 1992. 438 p. Thèse (Doctorat en Science du Sol) – Université Pierre & Marie Curie, Université Paris VI, Paris, 1992.

MIRANDA, L.H.F.; IPPOLITI, C.A.; OLIVEIRA, C.M.L.; FERNANDES FOLHO, E.I.; ABRAHÃO, W.A.P. **SIGUBÁ: Sistema de informações geográficas do município de Ubá**. Ubá, Prefeitura municipal de Ubá. 1999.

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

ODEH, I.O.A.; CHITTLEBOROUGH, D.J.; McBRATNEY, A.B. Elucidation of soil landform interrelationships by canonical ordination analysis. **Geoderma**, Amsterdam, v. 49, n. 1/2, p. 1-32, Jun. 1991.

OLIVEIRA, J.B. **Carta pedológica semi-detalhada do Estado de São Paulo: Folha de Brotas – SF 22-Z-B-III-4**. Campinas: Instituto Agrônômico, 1981a. 1 mapa. Escala 1:100.000.

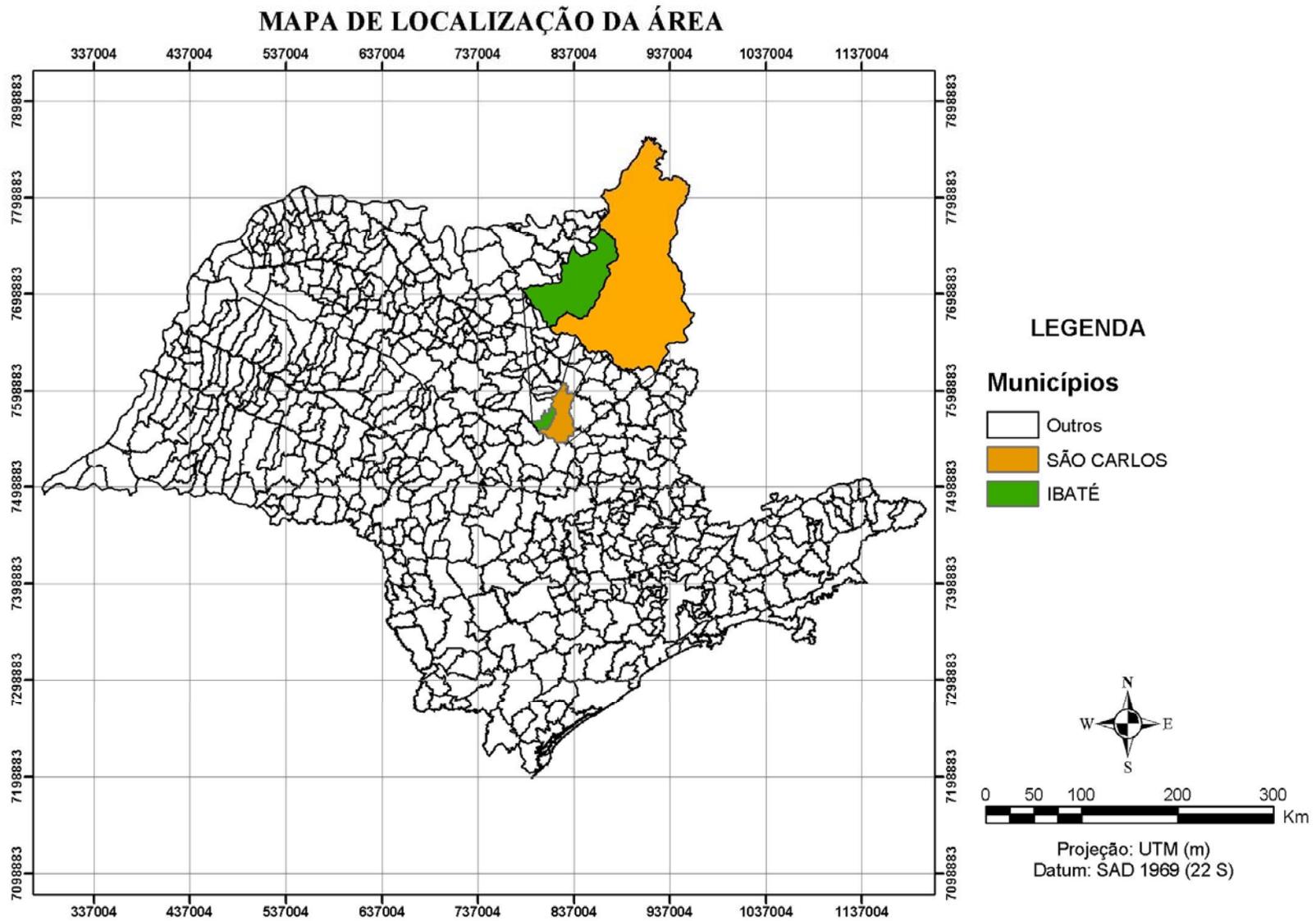
OLIVEIRA, J. B. **Carta pedológica semi-detalhada do Estado de São Paulo: Folha de São Carlos – SF 23-Y-A-I**. Campinas: Instituto Agrônômico, 1981b. 1 mapa. Escala 1:100.000.

OLIVEIRA, J.B. **Carta pedológica semi-detalhada do Estado de São Paulo: Folha de Descalvado – SF 23-V-C-IV**. Campinas: Instituto Agrônômico, 1982. 1 mapa. Escala 1:100.000.

OLIVEIRA, J.B.; PRADO, H. **Levantamento pedológico semidetalhado do Estado de São Paulo: quadricula de São Carlos. II. memorial descritivo**. Campinas: Instituto Agrônômico, 1984. 188 p. (IAC. Boletim Técnico, 98).

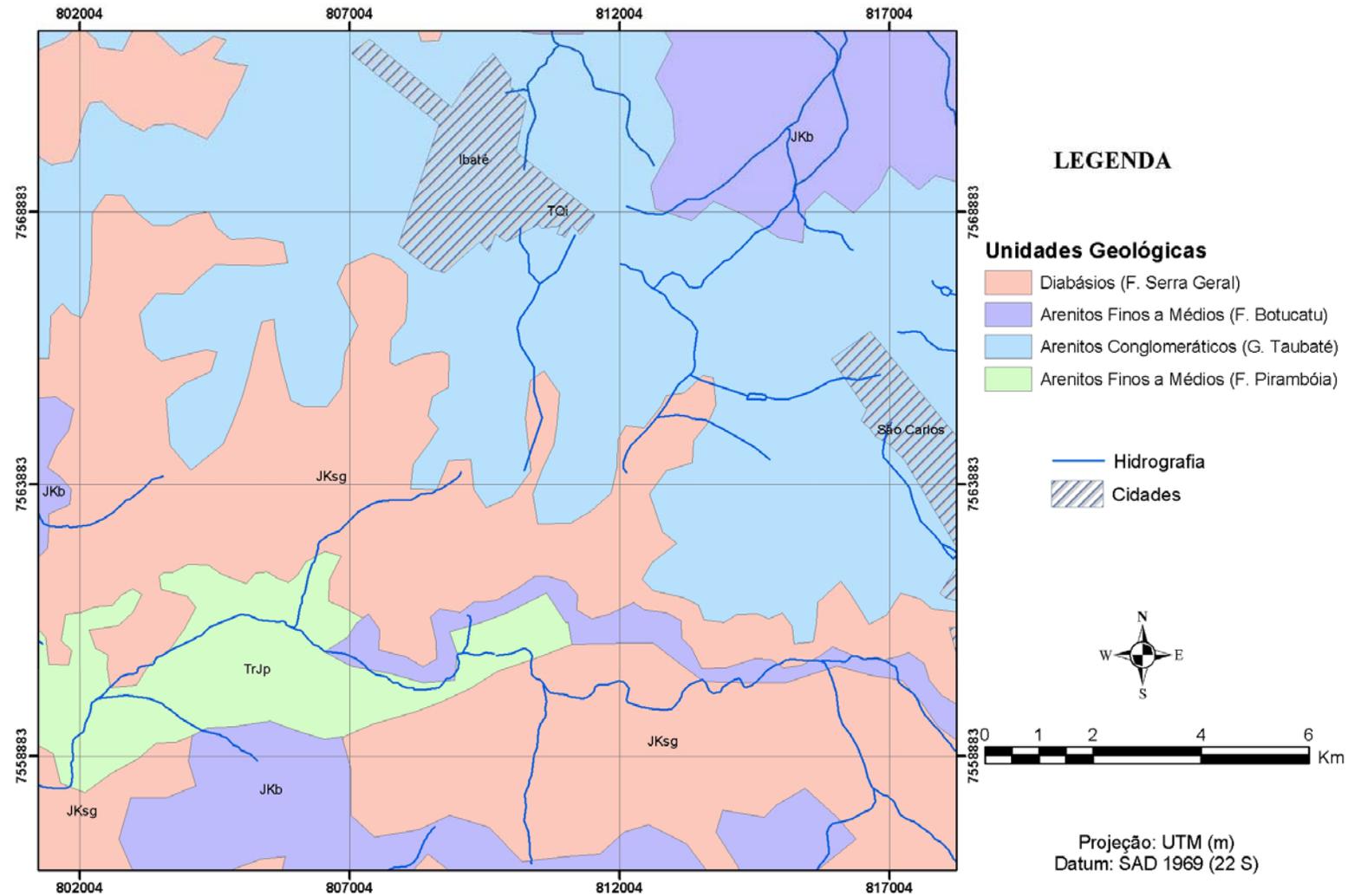
- OLIVEIRA, J. B.; JACOMINE, P.K.T.; CAMARGO, M.N. **Classes gerais de solos do Brasil**. Jaboticabal: FUNEP, 1992. 201 p.
- OLIVEIRA, J.B.; CAMARGO, M.N.; ROSSI, M.; CALDERANO FILHO, B. **Mapa pedológico de reconhecimento do Estado de São Paulo**. Campinas: Instituto Agronômico de Campinas, 1999. 1 mapa. Escala 1:500.000
- PRADO, H. do. **Manual de classificação de solos do Brasil**. 2. ed. Jaboticabal: FUNEP, 1995. 197 p.
- RAIJ, B.van.; ANDRADE, J.C.; CANTARELLA, H.; QUAGGIO, J.A. **Análise química para avaliação da fertilidade de solos tropicais**. Campinas: Instituto Agronômico, 2001. 285 p.
- REIS, T.E.S.; BARROS, O.N. F.; REIS, L.C. Utilização de sistema de informações geográficas para obtenção das cartas de solo e de declividade do município de Bandeirantes-PR. **Geografia**, Londrina, v. 13, n. 1, p. 1-17, jan./jul. 2004.
- RESENDE, M.; CURI, N.; KER, J.C.; REZENDE, S.B. **Mineralogia de solos brasileiros: interpretação e aplicações**. Lavras: Editora UFLA, 2005. 192 p.
- SINGH, A.N.; DWIVEDI, R.S. The utility of LANDSAT imagery as an integral part of the data base for small-scale soil mapping. **International Journal of Remote Sensing**, London, v. 7, n. 9, p.1099-1108, May 1986.
- SOIL SURVEY STAFF. **Keys to Soil Taxonomy**. 8th. ed. Blacksburg: USDA, 1998. 422 p. (SMSS Technical Monograph)
- USERY, E.L.; POCKNEE, S.; BOYDELL, B. Precision farming data management using geographic informations systems. **Photogrammetric Engineering & Remote Sensing**. Bethesda, v. 61, n. 11, p. 1383–1391, Nov. 1995.
- VENKATARATNAM, L. Delineation and mapping of agricultural soil limitation/hazards in arid and semi-arid tropics using Landsat data: an Indian experience. In: INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON REMOTE SENSING ENVIRONMENT, 14., Ann Arbor, 1980. **Proceedings...** Ann Arbor: Environmental Research Institute of Michigan, 1980. p. 905-914.
- VETTORAZZI, C.A.; COUTO, H.T.Z. Análise da exatidão de classificação em mapas de solos obtidos através da interpretação de imagens orbitais em duas escalas. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 6., Manaus, 1990. **Anais...** São José dos Campos: INPE, 1990. p. 769-775.
- WANGLU, P.; DANIEL, B.W.; JAY, C.B.; MATTHEW, G.K. Delineating patterns of soil drainage class on bare soils using remote sensing analyses. **Geoderma**, Amsterdam, v. 115, n. 3/4, p. 261– 279, Aug. 2003.
- WESTIN, F.C.; FRAZEE, C.J. Landsat data, its use in a soil survey program. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 40, n. 1, p. 81-89, Jan./Feb. 1976.

ANEXOS

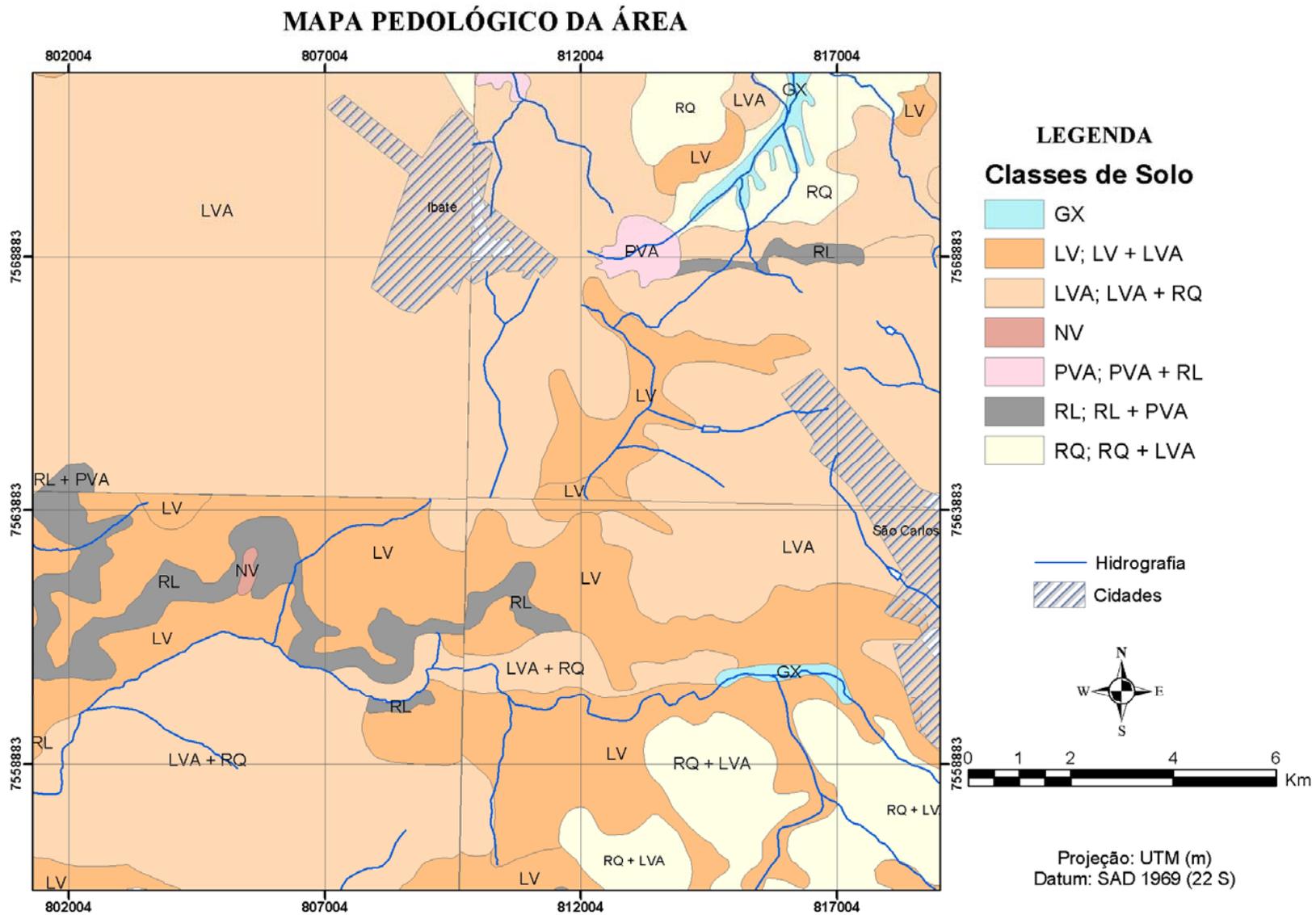


Anexos A - Mapa e localização da área de estudo, situada nos municípios de Ibaté e São Carlos, SP

MAPA GEOLÓGICO DA ÁREA

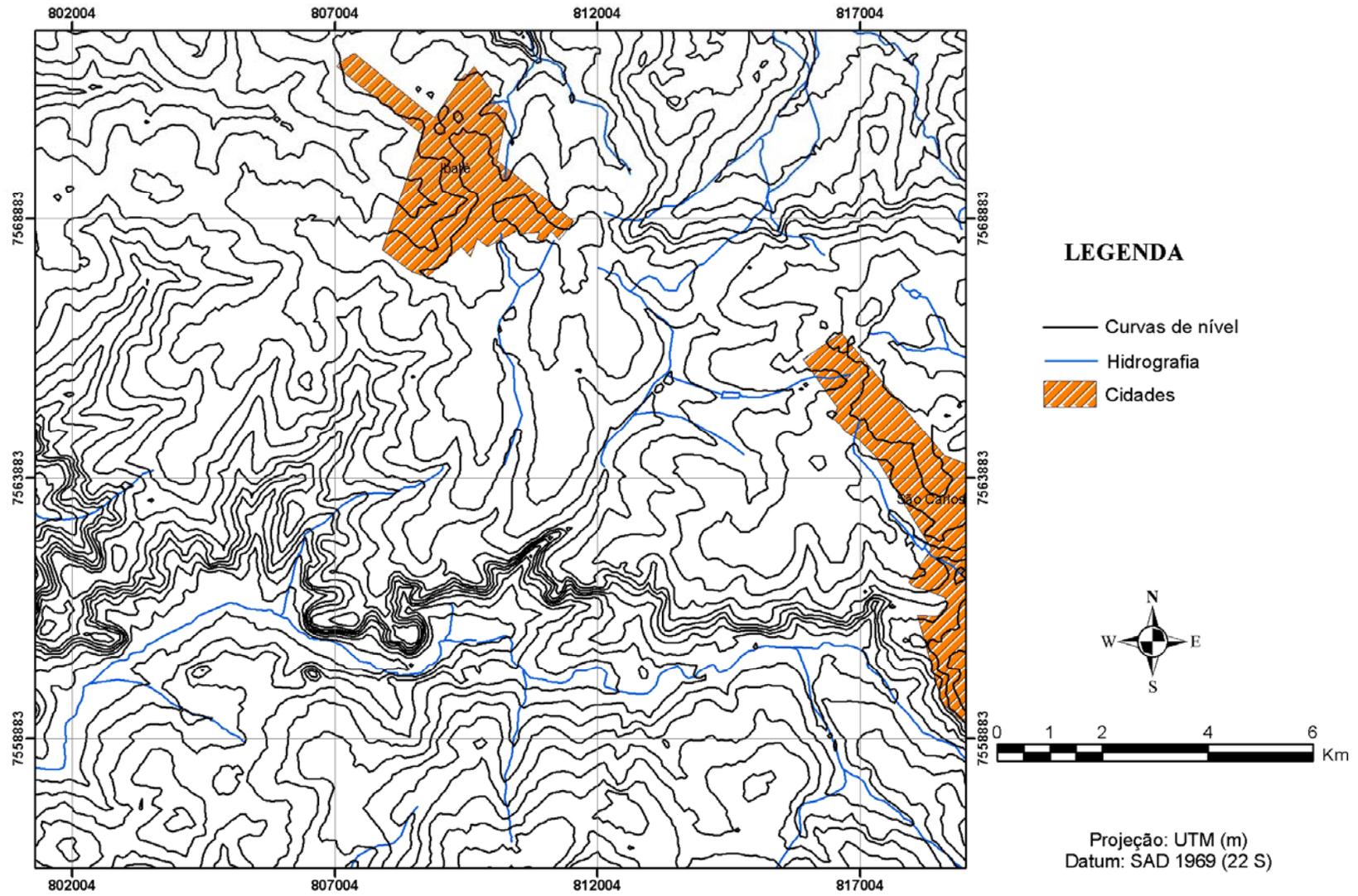


Anexos B - Mapa geológico da área de estudo. Fonte: Bistrichi et al., (1981)

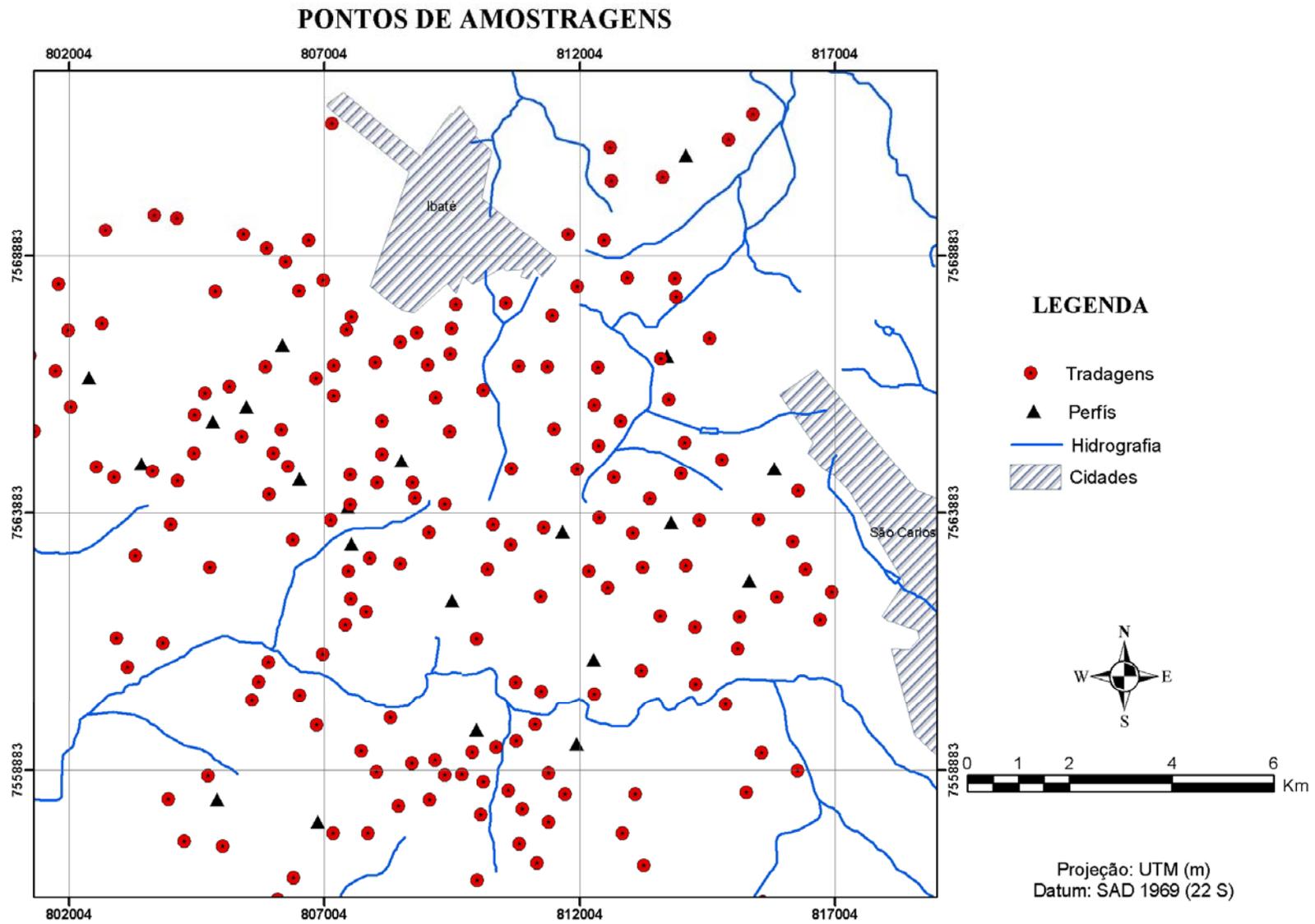


Anexos C - Mapa de solos da área de estudo, semi-detalhado (quadrículas de Descalvado, São Carlos e Brotas) e reconhecimento do Estado de São Paulo. Fonte: IAC (OLIVEIRA, 1981a, b, 1982; OLIVEIRA, 1999)

MAPA PLANIALTIMÉTRICO DA ÁREA

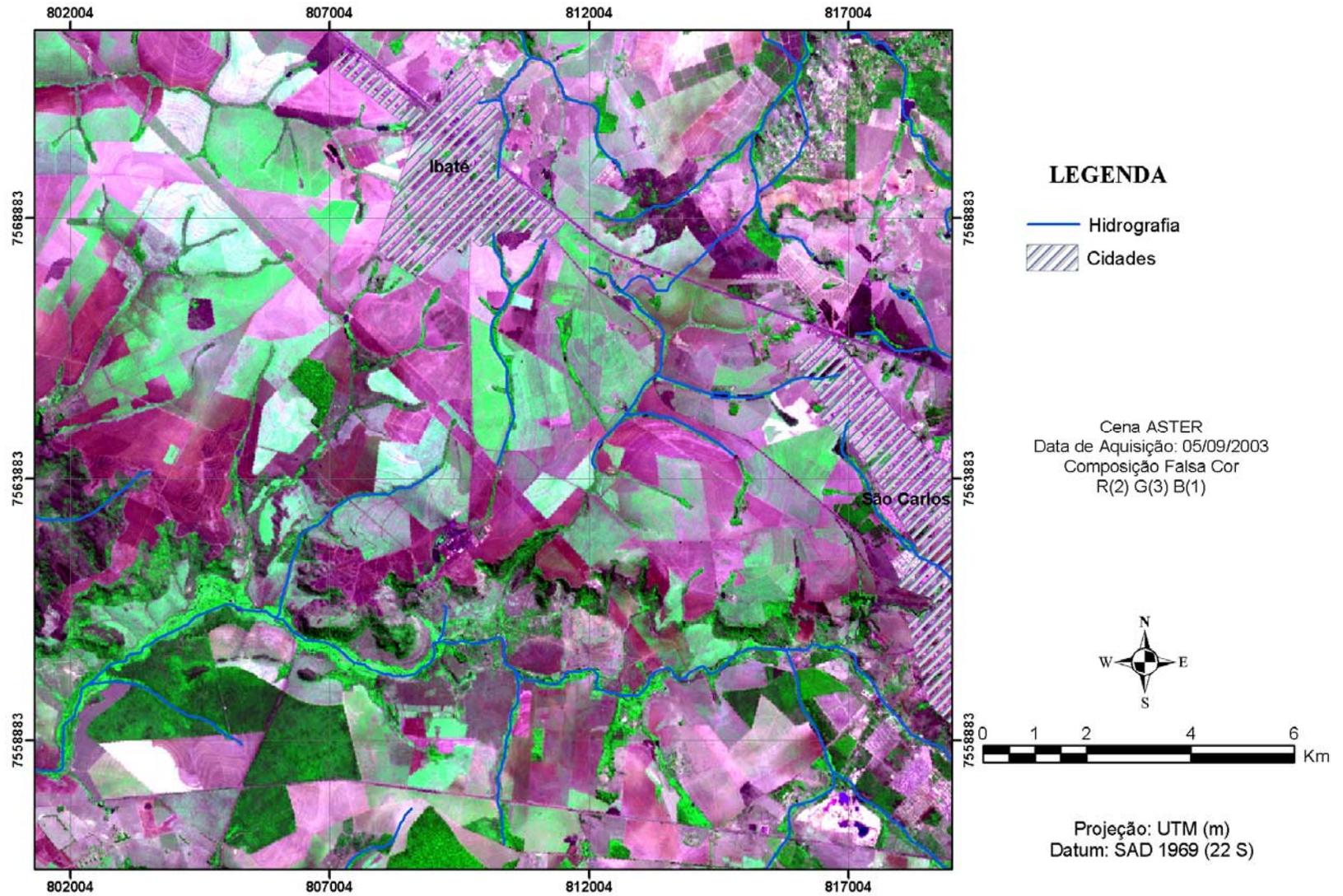


Anexos D - Carta planialtimétrica da área de estudo



Anexos E - Pontos de amostragem de terra para fins pedológicos na área de estudo

IMAGEM ASTER



Anexos F - Imagem do sensor ASTER da área de estudo, composição colorida falsa cor R (630-690 nm) G (760-860 nm) B (520-600 nm)

Livros Grátis

(<http://www.livrosgratis.com.br>)

Milhares de Livros para Download:

[Baixar livros de Administração](#)

[Baixar livros de Agronomia](#)

[Baixar livros de Arquitetura](#)

[Baixar livros de Artes](#)

[Baixar livros de Astronomia](#)

[Baixar livros de Biologia Geral](#)

[Baixar livros de Ciência da Computação](#)

[Baixar livros de Ciência da Informação](#)

[Baixar livros de Ciência Política](#)

[Baixar livros de Ciências da Saúde](#)

[Baixar livros de Comunicação](#)

[Baixar livros do Conselho Nacional de Educação - CNE](#)

[Baixar livros de Defesa civil](#)

[Baixar livros de Direito](#)

[Baixar livros de Direitos humanos](#)

[Baixar livros de Economia](#)

[Baixar livros de Economia Doméstica](#)

[Baixar livros de Educação](#)

[Baixar livros de Educação - Trânsito](#)

[Baixar livros de Educação Física](#)

[Baixar livros de Engenharia Aeroespacial](#)

[Baixar livros de Farmácia](#)

[Baixar livros de Filosofia](#)

[Baixar livros de Física](#)

[Baixar livros de Geociências](#)

[Baixar livros de Geografia](#)

[Baixar livros de História](#)

[Baixar livros de Línguas](#)

[Baixar livros de Literatura](#)
[Baixar livros de Literatura de Cordel](#)
[Baixar livros de Literatura Infantil](#)
[Baixar livros de Matemática](#)
[Baixar livros de Medicina](#)
[Baixar livros de Medicina Veterinária](#)
[Baixar livros de Meio Ambiente](#)
[Baixar livros de Meteorologia](#)
[Baixar Monografias e TCC](#)
[Baixar livros Multidisciplinar](#)
[Baixar livros de Música](#)
[Baixar livros de Psicologia](#)
[Baixar livros de Química](#)
[Baixar livros de Saúde Coletiva](#)
[Baixar livros de Serviço Social](#)
[Baixar livros de Sociologia](#)
[Baixar livros de Teologia](#)
[Baixar livros de Trabalho](#)
[Baixar livros de Turismo](#)