



**UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA – UNB
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM AGRONOMIA
FACULDADE DE AGRONOMIA E MEDICINA VETERINÁRIA**

**MAPEAMENTO PEDOLÓGICO POR MEIO DE SÉRIE HISTÓRICA
LANDSAT-5 TM E BIBLIOTECA ESPECTRAL
NA BACIA DO RIO JARDIM (DF)**

RAÚL ROBERTO POPPIEL

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO EM AGRONOMIA

**BRASÍLIA/DF
FEVEREIRO/2016**



**UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA – UNB
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM AGRONOMIA
FACULDADE DE AGRONOMIA E MEDICINA VETERINÁRIA**

**MAPEAMENTO PEDOLÓGICO POR MEIO DE SÉRIE HISTÓRICA
LANDSAT-5 TM E BIBLIOTECA ESPECTRAL
NA BACIA DO RIO JARDIM (DF)**

RAÚL ROBERTO POPPIEL

ORIENTADOR: MARILUSA PINTO COELHO LACERDA

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO EM AGRONOMIA

PUBLICAÇÃO: 106/2016

**BRASÍLIA/DF
FEVEREIRO/2016**



**UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA – UNB
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM AGRONOMIA
FACULDADE DE AGRONOMIA E MEDICINA VETERINÁRIA**

**MAPEAMENTO PEDOLÓGICO POR MEIO DE SÉRIE HISTÓRICA
LANDSAT-5 TM E BIBLIOTECA ESPECTRAL
NA BACIA DO RIO JARDIM (DF)**

RAÚL ROBERTO POPPIEL

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO SUBMETIDA AO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM AGRONOMIA, COMO PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS À OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE EM AGRONOMIA.

APROVADO POR:

**MARILUSA PINTO COELHO LACERDA, PhD, Professora Associado III.
(Faculdade de Agronomia e Medicina Veterinária - Universidade de Brasília)
(ORIENTADORA) E-mail: marilusa@unb.br / CPF:434.760.586-20**

**EDSON EYJI SANO, PhD, Pesquisador.
(Centro de Pesquisa Agropecuária dos Cerrados – Embrapa CPAC)
(EXAMINADOR EXTERNO) E-mail: edsonsano@gmail.com / CPF:034.617.098-06**

**INARA OLIVEIRA BARBOSA, Doutora, Pesquisadora.
(Departamento Nacional de Produção Mineral – DNPM)
(EXAMINADOR EXTERNO) E-mail:inara.barbosa@denpm.gov.br /CPF:538.956.731-53**

**THAIS RODRIGUES COSER, Doutora, Pós-doutoranda da FAV-UnB
(Faculdade de Agronomia e Medicina Veterinária - Universidade de Brasília)
(EXAMINADOR SUPLENTE) E-mail: thacoser@gmail.com / CPF:689.113.001-87**

BRASÍLIA/DF, 29 de FEVEREIRO de 2016.

FICHA CATALOGRÁFICA

Poppiel, Raúl Roberto

Mapeamento Pedológico por meio de série histórica Landsat-5 TM e Biblioteca Espectral na Bacia do Rio Jardim (DF)/ Raúl Roberto Poppiel; orientação de Marilusa Pinto Coelho Lacerda. – Brasília, 2016.

158 p. : il.

Dissertação de Mestrado (M) – Universidade de Brasília/ Faculdade de Agronomia e Medicina Veterinária, 2016.

1. Gênese dos solos. 2. Modelagem. 3. SIG. 4. Mineralogia. I. Lacerda, M.P.C. II. Pós Doutora.

REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

POPPIEL, R. R. **Mapeamento Pedológico por meio de série histórica Landsat-5 TM e Biblioteca Espectral na Bacia do Rio Jardim (DF)**. Brasília: Faculdade de Agronomia e Medicina Veterinária, Universidade de Brasília, 2016, 158 p. Dissertação de Mestrado.

CESSÃO DE DIREITOS

NOME DO AUTOR: Raul Roberto Poppiel

TÍTULO DA DISSERTAÇÃO: Mapeamento Pedológico por meio de série histórica Landsat-5 TM e Biblioteca Espectral na Bacia do Rio Jardim (DF).

GRAU: Mestre

ANO: 2016

É concedida à Universidade de Brasília permissão para reproduzir cópias desta dissertação de mestrado para única e exclusivamente propósitos acadêmicos e científicos. O autor reserva para si os outros direitos autorais, de publicação. Nenhuma parte desta dissertação de mestrado pode ser reproduzida sem a autorização por escrito do autor. Citações são estimuladas, desde que citada à fonte.

Raúl Roberto Poppiel

CPF: 703.559.901-05

(61) 8165-3529

E-mail: raulpoppiel@gmail.com

*Este trabalho é dedicado aos meus avós,
Eleodora Humeniuk e Raúl Reinko,
e à minha querida mãe, Liliana Reinko.*

AGRADECIMENTOS

Primeiramente agradeço a Deus, por ter me permitido chegar até aqui e alcançado mais esse objetivo na minha vida.

Ao Brasil, à Universidade de Brasília (UnB), à Faculdade de Agronomia e Medicina Veterinária e ao Programa de Pós-Graduação em Agronomia pela oportunidade concedida de realizar o Mestrado.

Aos meus avós, por me ensinarem desde pequeno a valorar o esforço.

Aos meus pais, pela vida, e em especial à minha mãe, maior incentivadora e a quem sempre levo como exemplo de pessoa.

À minha família, pelo amor, carinho, compreensão, exemplo, incentivo e apoio em todos os momentos.

Ao meu companheiro Luis Fernando Pimentel, pelo apoio, carinho e compreensão.

À Professora Dra. Marilusa, pela oportunidade, orientação, compreensão e amizade, simplesmente, toda minha gratidão.

Ao Professor Dr. José Alexandre M. Demattê, pela cessão do laboratório de Sensoriamento Remoto da ESALQ/USP.

Aos Mestres Bruna Gallo, Caio Fungaro, Marcus Sato e Danilo Romero, pelo auxílio na realização da imagem composta e das análises espectroscópicas.

Ao Manuel, pela amizade e pelo auxílio nos trabalhos de campo e nas análises físicas e químicas.

À todos que de alguma forma contribuíram para o desenvolvimento deste trabalho.

LISTA DE ABREVIações

CODEPLAN	— Companhia de Planejamento do Distrito Federal
CTC	— Capacidade de Troca Catiônica
CX	— Cambissolo Háplico
EMBRAPA	— Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária
ENVI	— <i>Environment for Visualizing Images</i>
ETM+	— <i>Enhanced Thematic Mapper Plus</i>
FF	— Plintossolo Pétrico
FLAASH	— <i>Fast Line of sight Atmospheric Analysis of Spectral Hypercubes</i>
FX	— Plintossolo Háplico
GPS	— <i>Global Position System</i>
GX	— Gleissolo Háplico
IBGE	— Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
IC	— Imagem Composta
L5-TM	— Landsat-5 Thematic Mapper
Landsat	— <i>Land Remote Sensing Satellite</i>
LV	— Latossolo Vermelho
LVA	— Latossolo Vermelho-Amarelo
MDS	— Mapeamento Digital de Solos
MDT	— Modelo Digital do Terreno
MESMA	— <i>Multiple Endmember Spectral Mixture Analysis</i>
MNF	— <i>Minimum Noise Fraction</i>
MO	— Matéria Orgânica
NASA	— <i>National Aeronautics and Space Administration</i>
ND	— Número Digital
NDVI	— <i>Normalize Difference Vegetation Index</i>
NIR	— <i>Near Infrared</i>
nm	— Nanômetro
OLI	— <i>Operational Land Imager</i>
OX	— Organossolo Háplico
REM	— Radiação Eletromagnética
RMSE	— <i>Root Mean Square Error</i>
RR	— Neossolo Regolítico
SEMARH	— Secretaria de Meio Ambiente e Recursos Hídricos
SiBCS	— Sistema Brasileiro de Classificação do Solo
SICAD	— Sistema Cartográfico do Distrito Federal
SIG	— Sistema de Informação Geográfica
SIRGAS	— Sistema de Referência Geocêntrico para a América do Sul
SMA	— <i>Spectral Mixture Analysis</i>
SWIR	— <i>Short Wave Infrared</i>

- TFSA** — Terra Fina Seca ao Ar
TM — *Thematic Mapper*
USGS — *United States Geological Survey*
UTM — Sistema Universal Transverso de Mercator
VIPER Tools — *Visualization and Image Processing for Environmental Research Tools*
VIS — *Visible*

SUMÁRIO

CAPITULO GERAL

I. INTRODUÇÃO.....	16
II. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	19
II.1. Relações solo-paisagem	19
II.2. Mapeamento de solos	20
II.2.1. Mapeamento tradicional de solos.....	23
II.2.2. Mapeamento digital de solos.....	27
II.3. Comportamento espectral de solos	31
II.3.1. Constituintes do solo.....	34
II.3.2. Parâmetros do solo que influenciam a reflectância	34
II.3.2.1. Matéria orgânica.....	34
II.3.2.2. Óxidos de ferro	36
II.3.2.3. Cor	37
II.3.2.4. Granulometria.....	38
II.3.2.5. Minerais da fração argila	40
II.3.2.6. Umidade do solo	41
II.4. Espectroscopia de reflectância laboratorial	43
II.5. O sistema Landsat	45
II.6. Bibliotecas espectrais de solos.....	458
III. HIPÓTESE.....	49
IV. OBJETIVOS.....	49
IV.1. Objetivo Geral	49
IV.2. Objetivos específicos	50
V. JUSTIFICATIVA	50
VI. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	51

CAPITULO 1

VII. MAPEAMENTO DIGITAL DOS SOLOS DA BACIA DO RIO JARDIM, DF, UTILIZANDO TÉCNICAS DE SENSORIAMENTO REMOTO	61
VII.1. INTRODUÇÃO.....	64
VII.2. MATERIAL E MÉTODOS	65
VII.2.1. Revisão bibliográfica e levantamento de dados auxiliares	65
VII.2.2. Seleção da área de estudo.....	65
VII.2.3. Caracterização da Área de Estudo	66
VII.2.3.1. Localização	66
VII.2.3.2. Clima.....	67

VII.2.3.3. Geologia	68
VII.2.3.4. Geomorfologia	69
VII.2.3.5. Solos.....	72
VII.2.4. Delimitação da Bacia do Rio Jardim	74
VII.2.5. Caracterização e classificação dos solos representativos da Bacia do Rio Jardim	74
VII.2.6. Processamento digital de imagens Landsat 5-TM	77
VII.2.7. Geração de imagens de solo exposto.....	80
VII.2.8. Geração de imagem composta de solos expostos.....	84
VII.2.9. Obtenção de dados espectroscópicos de solos sob condições de laboratório..	87
VII.2.10. Elaboração da biblioteca espectral de solos da área de estudo.....	88
VII.2.11. Mapeamento espectral de solos da Bacia do Rio Jardim.....	90
VII.2.11.1. Modelo de Análise de Mistura Espectral (SMA).....	90
VII.2.11.2. Modelo de Análise de Mistura Espectral com Múltiplos Endmembers (MESMA)	91
VII.2.12. Validação do mapeamento espectral de solos.....	93
VII.3. RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	96
VII.3.1. Lito-toposequências.....	96
VII.3.1.1. Atributos morfológicos.....	96
VII.3.1.2. Atributos físicos.....	102
VII.3.1.3. Atributos químicos.....	105
VII.3.2. Imagem composta de solos expostos.....	109
VII.3.3. Atributos espectroscópicos.....	114
VII.3.3.1. Curvas espectrais obtidas dos perfis de solos avaliados.....	114
VII.3.3.2. Caracterização das curvas espectrais.....	118
VII.3.4. Biblioteca espectral dos solos da Bacia do Rio Jardim	126
VII.3.5. Mapa digital de solos da Bacia do Rio Jardim	128
VII.3.5.1. Modelo de Análise de Mistura Espectral (SMA)	128
VII.3.5.2. Modelo de Análise de Mistura Espectral com Múltiplos Endmembers (MESMA)	136
VII.4. CONCLUSÕES.....	145
VII.5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	146

ÍNDICE DE TABELAS

CAPITULO GERAL

Tabela 1. Divisão do espectro eletromagnético ou radiação eletromagnética (REM).....	31
Tabela 2. Informações gerais sobre cada satélite Landsat.	45
Tabela 3. Características dos sensores multiespectrais do sistema Landsat.....	47

CAPITULO 1

Tabela 4. Distribuição das classes de declividade para a bacia hidrográfica do Rio Jardim.	72
Tabela 5. Série histórica de imagens Landsat 5-TM da área de estudo.....	78
Tabela 6. Classificação da acurácia de mapeamentos mediante valores de índice Kappa. .	94
Tabela 7. Características morfológicas dos perfis da Lito-topossequência 1–Estanislau.....	98
Tabela 8. Características morfológicas dos perfis da Lito-topossequência 2–Alto Rio Jardim....	99
Tabela 9. Características morfológicas dos perfis da Lito-topossequência 3–São Gonçalo	100
Tabela 10. Características morfológicas dos perfis da Lito-topossequência 4 – Barra Alta	101
Tabela 11. Características morfológicas dos perfis da Lito-topossequência 5 – Cariru.....	101
Tabela 12. Características morfológicas das amostras coletadas com trado.....	102
Tabela 13. Características físicas dos perfis da Lito-topossequência 1 – Estanislau.....	103
Tabela 14. Características físicas e dos perfis da Lito-topossequência 2–Alto Rio Jardim	103
Tabela 15. Características químicas dos perfis da Lito-topossequência 1 – Estanislau.....	106
Tabela 16. Características químicas dos perfis da Lito-topossequência 2–Alto Rio Jardim	107
Tabela 17. Área composta por solo exposto em cada imagem.....	110
Tabela 18. Área de contribuição de cada imagem de solo exposto na imagem composta.	110
Tabela 19. Principais atributos responsáveis pelo agrupamento de classes de solos.....	115
Tabela 20. Tabela com quantificação de acertos e erros entre a verdade de campo e os mapas digitais de distribuição de cada classe de solo gerado pela metodologia SMA.....	134
Tabela 21. Tabela de proporção de confusão entre os mapeamentos digitais de classe individualizada de solo obtidos pela metodologia SMA.	135
Tabela 22. Área de classes de solos que compõem o mapa digital obtido pelo MESMA...	141
Tabela 23. Matriz de erros entre a verdade de campo e o mapa digital de solos da Bacia do Rio Jardim, DF, obtido pela metodologia MESMA.	143

ÍNDICE DE FIGURAS

CAPITULO GERAL

Figura 1. Mapa de levantamento de solos e mapeamento da cobertura do Brasil.....	24
Figura 2. Fluxograma geral de passos comuns à maioria dos protocolos de MDS.....	30
Figura 3. Componentes da radiação eletromagnética medida pelo sensor imageador.....	32
Figura 4. Espectro de reflectância de três amostras de solo antes e depois da remoção da MO.....	35
Figura 5. Espectros de reflectância de solos com diferente composição mineralógica.....	37
Figura 6. Variação da reflectância da hematita em função do tamanho de grãos.....	39
Figura 7. Espectros de reflectância de solos com diferentes teor de Ct+Gb.....	39
Figura 8. Espectros de reflectância da caulinita e da montmorillonita	40
Figura 9. Feições de absorção de uma amostra de gibbsita.	41
Figura 10. Coeficiente de absorção da água a 20° C	41
Figura 11. Curvas espectrais de amostras de solo com diferentes conteúdos de umidade .	42
Figura 12. Interação da radiação eletromagnética solar com solo seco e solo úmido	43
Figura 13. Comparação das bandas espectrais dos sensores TM, ETM+, OLI e TIRS.	47

CAPITULO 1

Figura 14. Mapa de localização da área de estudo, Bacio do Rio Jardim, DF	66
Figura 15. Mapa Geológico da Bacia do Rio Jardim.....	69
Figura 16. Mapa Geomorfológico da Bacia do Rio Jardim	70
Figura 17. Mapa de Declividade da Bacia do Rio Jardim extraído do MDT.	71
Figura 18. Mapa de Solos da Bacia do Rio Jardim. Fonte: Adaptado de Embrapa (1978) ..	74
Figura 19. Localização das Lito-topossequências da Bacia do Rio Jardim, DF	75
Figura 20. Metodologias para a detecção de áreas com solo exposto por meio do programa ENVI em imagens Landsat 5-TM	80
Figura 21. Espectros de reflectância da água limpa, vegetação sadia e solo exposto seco	81
Figura 22. Escatergrama bidimensional representando a Linha do Solo	82
Figura 23. Valores limiares do NDVI e ND57 para cada imagem de satélite na obtenção das máscaras de solo exposto	83
Figura 24. Recorte de uma das imagens do satélite L5-TM de 2009 utilizadas no estudo e correspondente máscara aplicada sobre a vegetação, água e palhada	84
Figura 25. Fluxograma da metodologia para gerar a imagem composta de solos expostos	86
Figura 26. Geometria dos equipamentos para a obtenção dos dados espectroscópicos. ...	88

Figura 27. Agrupamento de espectros por classe	89
Figura 28. Método de avaliação qualitativa de curvas espectrais de solos.....	89
Figura 29. Classes texturais do solo e valores dos limites das frações granulométricas ...	104
Figura 30. Imagem composta de solos expostos em composição RGB 345 (a) e 745 (b) .	109
Figura 31. Espectros coletados da imagem composta de solos expostos obtida.	112
Figura 32. Linha do solo obtida da imagem composta.	112
Figura 33. Imagem composta com solo exposto	113
Figura 34. Curvas espectrais obtidas dos horizontes A dos solos avaliados.	117
Figura 35. Espectros de Latossolos Vermelhos (LV) estudados	119
Figura 36. Espectros de Latossolos Vermelho-Amarelos (LVA) estudados.....	120
Figura 37. Espectros de Neossolos Regolíticos (RR) estudados.....	121
Figura 38. Espectro de Cambissolo Háplico (CX) estudado	122
Figura 39. Espectro de Plintossolo Háplico (FX) estudado.....	123
Figura 40. Espectro de Plintossolos Pétricos Concrecionários (FX) estudados.....	124
Figura 41. Espectro de Gleissolo Háplico (GX) estudado.....	125
Figura 42. Espectro de Organossolo Háplico (OX) estudado	126
Figura 43. Biblioteca espectral dos solos estudados, obtida por sensor laboratorial <i>FieldSpec® Pro</i> , na faixa de 350 a 2.500 nm.....	127
Figura 44. Biblioteca espectral dos solos estudados, reamostrada nos intervalos espectrais das bandas do L5-TM (nm), na faixa de 450 a 2.350 nm.	128
Figura 45. Imagens obtidas mediante o modelo SMA para o LV	129
Figura 46. Imagens obtidas mediante o modelo SMA para LVA.....	130
Figura 47. Imagens obtidas mediante o modelo SMA para CX e RR.	131
Figura 48. Imagens obtidas mediante o modelo SMA para FX e FF.	132
Figura 49. Mapas de classes de solos da Bacia do Rio Jardim gerados pelo modelo SMA	133
Figura 50. Imagens obtidas mediante aplicação do modelo MESMA.	137
Figura 51. Valores de fração e do erro médio quadrático obtidos pelo modelo MESMA ...	138
Figura 52. Imagem fração obtida mediante o modelo MESMA.....	139
Figura 53. Imagem fração obtida mediante o modelo MESMA, indicando pixels das classes CX e FF-II modelados com os maiores valores de erro.	139
Figura 54. Mapa digital espectral de solos da Bacia do Rio Jardim, DF, obtido pelo modelo MESMA.	140

MAPEAMENTO PEDOLÓGICO POR MEIO DE SÉRIE HISTÓRICA LANDSAT-5 TM E BIBLIOTECA ESPECTRAL NA BACIA DO RIO JARDIM (DF)

RESUMO GERAL

A demanda por levantamentos detalhados de solos tem crescido mundialmente, em função do aumento populacional e de práticas agrícolas cada vez mais intensivas. A execução de levantamentos de solos no Brasil é necessária para subsidiar o planejamento dos recursos naturais e de atividades agropecuárias, assim como para monitor os impactos ambientais produzidos pelas atividades desenvolvidas. Os mapeamentos pedológicos disponíveis foram gerados particularmente nas décadas de 70 e 80, em escalas de pouco detalhamento. Nas últimas décadas, novas alternativas foram encontradas para otimizar os mapeamentos convencionais, principalmente mediante o uso de técnicas de sensoriamento remoto e metodologias quantitativas para predição espacial dos solos e de seus atributos, destacando-se o mapeamento digital de solos. No Distrito Federal (DF), a principal fonte de informações pedológicas se encontra em escala 1:100.000, e muitas vezes não atende aos diversos estudos pedológicos, em razão da escala de pouco detalhamento. Diante desta situação, este trabalho teve, como objetivo principal, individualizar classes de solos da Bacia do Rio Jardim, no DF, por meio de técnicas de sensoriamento remoto. Por meio de análises morfológicas, físicas, químicas e espectroscópicas, foram caracterizadas as principais classes de solos da bacia estudada, gerando-se uma biblioteca espectral de solos da referida bacia. Para o mapeamento digital de solos foi elaborada uma imagem composta de solos expostos a partir de série histórica de imagens Landsat 5-TM de 1984 a 2009. Por meio da biblioteca espectral dos solos e imagem composta dos solos expostos da área estudada, foram realizados processamentos digitais com utilização de técnicas de análises espectrais, gerando-se o mapa digital de solos da Bacia do Rio Jardim, DF.

Palavras Chaves: Relação solo-paisagem, Mapeamento de solos, Reflectância do solo, Fatores de formação do solo, Landsat, Espectroscopia.

PEDOLOGICAL MAPPING BY LANDSAT-5 TM HISTORICAL SERIES AND SPECTRAL LIBRARY IN THE JARDIM RIVER BASIN (FEDERAL DISTRICT)

GENERAL ABSTRACT

The demand for detailed soil surveys has increased worldwide due to population growth and agricultural practices increasingly intensive land use. The execution of soil surveys in Brazil is necessary to support the planning of natural resources and agricultural activities, as well as monitoring of environmental impacts produced by the activities developed. Available pedological maps were generated particularly in the 70s and 80s in small detail scales. In last decades new alternatives were found to optimize conventional mappings, mainly by the use of remote sensing techniques and quantitative methodologies for spatial prediction of soil and its attributes, especially the soil digital mapping. In the Federal District (DF), the main source of soil information is at 1:100,000 scale, and often does not fit to the various soil studies, because of the small scale. In this situation, this study aimed to the individualization of the occurrence of soil classes in the Jardim River Basin, in the Federal District, by remote sensing techniques. By means of morphological, physical, chemical and spectroscopic analysis we characterized the main occurrence of soil classes in the studied basin, generating a spectral library of soils of the Jardim River Basin, DF. For the digital mapping of soils, we prepared a composite image of exposed soils from Landsat 5-TM image processing of a historical serie from 1984 to 2009. By means of spectral library of soils and composite image of bare soil in the study area, we conducted digital processing with techniques of spectral analysis, generating the soil digital mapping of the Jardim River Basin, DF.

Keywords: soil-landscape relationship, soil mapping, soil reflectance, soil formation factors, Landsat, Spectroscopy.

I. INTRODUÇÃO GERAL

Os solos são cada vez mais reconhecidos como grandes contribuintes às atividades desenvolvidas nos ecossistemas diversificados, como a produção de alimentos e regulação do clima, o que influencia diretamente sobre as economias locais, regionais e mundiais. Por isso, atualmente, a demanda por informações atualizadas e detalhadas sobre este recurso tem denotado uma importância crescente, já que dele depende, em grande medida, a sobrevivência e o bem-estar da população atual e das gerações futuras (Sanchez et al., 2009).

A recuperação dos solos é muito lenta e representa um recurso não renovável e cada vez mais escasso, devido ao fato de estar submetido a constantes processos de degradação de origem natural ou antrópica (Mendonça-Santos et al., 2015).

O solo é um recurso fundamental para satisfazer às necessidades de alimentos, forragem, fibras e energia da população humana em rápido crescimento. No entanto, uma solução intermediária seria a denominada "intensificação sustentável da produção agrícola", a qual se tornou prioridade para muitas agências de pesquisa agrícola. Por exemplo, a Organização das Nações Unidas para Alimentação e Agricultura (FAO) prevê que a produção agrícola do Brasil crescerá mais rapidamente do que em qualquer outro país do mundo na década de 2010 (aumento em torno de 40% em 2019) (OECD-FAO, 2009). Este aumento da pressão sobre a utilização intensiva do solo requer planejamento e gestão sustentáveis, a fim de evitar ou minimizar os processos de degradação.

Deste modo, informações sobre o recurso solo são necessárias para a formulação de políticas relacionadas à gestão e planejamento dos recursos naturais, assim como para monitoramento dos impactos ambientais produzidos pelas atividades desenvolvidas (Mulder et al., 2011).

A demanda por levantamentos detalhados de solos tem crescido mundialmente, juntamente com inovações tecnológicas e científicas potencialmente úteis no auxílio destas atividades, uma vez que o método tradicional de levantamentos de solos tem se mostrado caro, demorado e realizado em escalas atualmente não adequadas (McBratney et al., 2003).

Considerando a situação do mapeamento de solos do Brasil, os estados brasileiros contam, na sua maioria, com mapas de reconhecimentos de solos com escalas de cerca de 1:500.000, como os mapas de Zoneamento Agroecológico e de Aptidão Agrícola; ou exploratórios, com escala cartográfica menor ou iguais a 1:1.000.000, como os do Projeto RADAMBRASIL (McBratney et al., 2003). Apenas uma pequena parte do território brasileiro apresenta mapas semidetalhados, com escalas maiores que 1:100.000, e detalhados, maiores que 1:20.000 (Mendonça-Santos e Santos, 2006).

No Brasil, nem os órgãos governamentais responsáveis pelo ordenamento do território, nem os produtores agrícolas, florestais e pecuários, têm, à sua disposição, informação suficiente para a adequada execução de seus projetos agropecuários.

O mapa de solos (em escala adequada) de uma área constitui uma ferramenta indispensável para: definição de técnicas conservacionistas a serem adotadas na área; detecção de áreas com maior risco de erosão e compactação; auxílio na escolha de áreas para implantação agrícola e de assentamentos; recomendação de áreas e de épocas adequadas para o manejo da cultura em função do solo; determinação de locais mais ou menos produtivos baseada nas informações dos solos; definição de áreas para produção agrícola ou reserva permanente; otimização do planejamento de amostragem em agricultura de precisão. Também é base para determinação de métodos de avaliação do uso das terras como a aptidão agrícola, capacidade de uso da terra, grupos de manejos e ambientes de produção (Bellinaso, 2009). Por todos esses aspectos, é preciso destacar que, em 1963, autores como Vink já afirmavam que os mapas de solos são de enorme importância para o progresso e o desenvolvimento de um país.

O conhecimento adequado da variabilidade espacial dos solos implica em um número elevado de trabalhos e amostragem de campo, o que resulta em grandes quantidades de análises químicas e físicas em auxílio à perfeita classificação dos solos, acarretando altos custos e elevado tempo de realização das mesmas (Demattê e Campos et al., 2004). Então, a questão que permanece é como planejar atividades agropecuárias em larga escala sem mapas detalhados de solos?

A utilização da espectroscopia de reflectância no visível (450-760 nm) – infra-vermelho próximo (760-1.200 nm) – infra-vermelho de ondas curtas (1.200-2.500 nm) tem mostrado bons resultados, uma vez que permite que vários componentes de um determinado material sejam analisados ao mesmo tempo, proporcionando uma técnica rápida e de baixo custo para análise de solos, com pouca ou nenhuma preparação da amostra (Stark et al., 1986; Chang et al., 2001).

A energia refletida pelos alvos terrestres pode ser medida por um sensor, o qual pode localizar-se em uma variedade de plataformas, tais como satélites (orbital), aeronaves (aéreo), no campo ou em laboratório (terrestre). No entanto, cada tipo de sensor tem características diferentes, de acordo com o nível de aquisição de dados. Em vista disto, o aparelho utilizado em laboratório e trabalhos de campo, conhecido como espectrorradiômetro, abrange diferentes faixas do espectro eletromagnético (geralmente de 380 a 2.500 nm), sendo utilizado na espectroscopia de reflectância no VIS-NIR-SWIR. Nesse sentido, estudos de solo normalmente envolvem avaliações no intervalo de 400 a 2.500 nm (Epiphanyo et al., 1992; Madeira Netto e Baptista, 2000; Madeira Netto, 2001).

No que se refere ao comportamento espectral, cada uma das amostras de solo tem uma “assinatura espectral” ou “curva espectral”, que é uma propriedade cumulativa derivada de suas características intrínsecas heterogêneas, tais como mineralogia, materiais orgânicos, distribuição de partículas e composição química que constituem o solo (Demattê, 2002). Conseqüentemente, podem ser criadas bibliotecas de curvas espectrais de diferentes solos de uma região que irão auxiliar estudos pedológicos.

Historicamente, o sensoriamento remoto pode ser dividido em dois períodos: o primeiro, entre 1860 e 1960, o qual era baseado na utilização de fotografias aéreas, e o período de 1960 até hoje, caracterizado pela multiplicidade de sistemas sensores (Novo, 2010). A partir de meados da década de 1980, com o lançamento do sensor *Thematic Mapper* (TM) a bordo do satélite Landsat 5, instaurou-se novas possibilidades de aplicação das técnicas de sensoriamento remoto, incluindo mapeamento de solos e quantificação dos seus atributos (Coleman et al., 1993; Ziadat et al., 2003; López-Granados et al., 2005), assim como também de parâmetros biofísicos (biomassa vegetal) (Borges et al. 2010).

O sensoriamento remoto tem sido considerado uma importante ferramenta nos mais diversos aspectos relacionados com agronomia e, em particular, com os estudos de solos. Nesta área, melhor entendimento tem sido buscado nas relações existentes entre as curvas espectrais e os atributos dos solos que permitam sua discriminação e caracterização. Logo, com o advento de novos sensores e com a intensificação da utilização da tecnologia na agricultura de precisão e nos estudos dos solos, a avaliação do comportamento espectral poderá auxiliar mais rapidamente a obtenção de informações acerca deste recurso (Demattê e Garcia, 1999).

Independentemente da radiometria e do sensoriamento remoto terem sido reconhecidos como uma tecnologia potencialmente eficaz e eficiente nos estudos de solos, reduzindo o tempo necessário ao mapeamento e os custos envolvidos, ainda não são usados rotineiramente em levantamentos de solos. Isso se deve ao fato de que os conhecimentos que se tem sobre como aplicar os avanços em sensoriamento remoto para o mapeamento do solo, ainda estão em desenvolvimento (Ben-Dor et al., 2008).

Apesar destas modernas técnicas de avaliação do solo, mediante espectroscopia de reflectância e sensoriamento remoto, serem consideradas um instrumento potente, confiável e aplicável à agricultura em regiões tropicais, torna-se necessária a comprovação de sua eficácia por comparação dos atributos obtidos de forma convencional, derivada de observações de campo e de análises laboratoriais.

No Distrito Federal (DF), o mapeamento pedológico disponível, realizado pelo Serviço Nacional de Levantamento de Solos (Embrapa, 1978), em escala 1:100.000, ainda é a principal fonte de informações pedológicas; no entanto, muitas vezes não atende aos diversos estudos pedológicos, em razão da escala de pouco detalhamento. Todavia, estudos sobre a

distribuição de solos dentro do DF vêm sendo realizados por diversos autores, em escalas de trabalho não maiores que 1:50.000 (Reatto et al., 2000, 2003, 2004; Barbosa et al., 2009, 2010; Nolasco-Carvalho et al., 2009; Lacerda e Barbosa, 2012).

Nesse cenário, a falta de informações de solos em escalas apropriadas no DF, particularmente em áreas de uso intensivo do solo, como a Bacia do Rio Jardim, dificulta o fornecimento de suporte adequado aos planejamentos de uso, manejo, conservação, prevenção e recuperação de áreas agrícolas.

Assim, o objetivo deste trabalho foi o mapeamento digital de solos da Bacia do Rio Jardim, no DF, por meio de técnicas de sensoriamento remoto, a fim de subsidiar dados para planejamento, gestão e monitoramento do uso agrícola sustentável nesta importante área agrícola do DF.

II. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

II.1. Relações solo-paisagem

A Pedologia é a subdisciplina da Ciência do Solo que estuda a distribuição, morfologia, gênese e classificação dos solos como um componente natural da paisagem.

Para Grunwald (2006), o solo constitui o material que se forma na interface entre a atmosfera e a litosfera e que é capaz de suportar plantas. Compõe-se do mineral não consolidado ou material orgânico sobre a superfície da terra, que tem sido submetido e que mostra os efeitos dos fatores ambientais do clima, macro e micro-organismos, condicionados pelo relevo, que atuam sobre o material de origem ao longo de um período de tempo.

Desta forma, os solos ocorrem formando um conjunto de componentes significativamente diferentes, dispostos como unidades vizinhas e com limites marcados pela substituição gradual das características diferenciais destes componentes, que se correlacionam com o ambiente (Ranzani, 1969).

Comumente, as propriedades do solo variam tridimensionalmente de lugar para lugar, conforme os aspectos topográficos do terreno. O solo pode ser entendido como um corpo natural resultante da interação de seus fatores formadores, tais como o clima, os organismos, o material parental ou de origem, que sofrem modificações com o passar do tempo, e que estão intimamente relacionados com a sua posição no relevo (Estados Unidos, 1993). A sucessão de solos, segundo posições de relevo, foi denominado por Jenny em 1941, como *catena* ou *topossequência* (Ranzani, 1969).

Essa variabilidade faz com que existam solos muito produtivos a pouco férteis, o que dá lugar a paisagens diferentes (vegetações com características diferenciadas em altura ou densidade) (Mendonça-Santos et al., 2015).

Portanto, pode-se concluir que o relevo é um dos fatores de formação do solo que exerce uma grande influência sobre a sua gênese e a sua distribuição na paisagem, apresentando assim uma forte relação com os limites das unidades de mapeamento de solos (Sousa-Lima et al., 2014).

II.2. Mapeamento de solos

De acordo com Mendonça-Santos et al. (2015), o mapeamento dos solos é útil para:

- Fornecer informações para facilitar a gestão do território (por exemplo, para fins agrícolas ou ecológicos de zoneamentos ambientais, para escolha das melhores áreas para obras de engenharia civil, entre outros) por meio da identificação dos recursos naturais e a capacidade do solo;
- Prover informações estratégicas sobre o estado atual do solo (por exemplo, para o desenvolvimento de políticas nacionais e pesquisas científicas);
- Extrapolar os resultados de estudos locais e redes de monitoramento do solo para outras áreas ou regiões;
- Demonstrar como a variabilidade do solo em âmbito local e nacional faz parte de um padrão global (transnacional).

Por isso, as técnicas utilizadas nos inventários de solos podem ser muito diversas, dependendo do objetivo do mapeamento.

Na execução de levantamentos pedológicos, o planejamento prévio e as considerações em torno de conceitos básicos e essenciais constituem uma etapa importante, compreendendo um conjunto de decisões sobre escalas cartográficas de trabalho de campo e de apresentação final ou publicação dos mapas produzidos, em função do nível de detalhe ou generalização, necessários para atender aos objetivos específicos de cada tipo de levantamento (Embrapa, 1995).

Um levantamento pedológico constitui um prognóstico da distribuição geográfica dos solos como corpos naturais, determinados por um conjunto de relações e propriedades observáveis na natureza. Ademais, identifica solos que passam a ser reconhecidos como unidades naturais, prevê e delinea suas áreas nos mapas, em termos de classes definidas de solos (Embrapa, 1995).

Os levantamentos de solos englobam trabalhos prévios de escritório (mapas preliminares), levantamentos a campo (amostragem e observação), análises laboratoriais e interpretação dos dados com a elaboração do mapa e relatório técnico final (Ranzani, 1969).

Segundo Embrapa (1995), um levantamento identifica e separa unidades de mapeamento, sendo constituído, na sua forma final, por um mapa e um texto explicativo que define, descreve e interpreta, para diversos fins, as classes de solos componentes de unidades de mapeamento.

As unidades de mapeamento compreendem grupamentos de áreas de solos, criados para possibilitar a representação cartográfica e mostrar a distribuição espacial dos solos e suas relações com a paisagem (Estados Unidos, 1993). Portanto, as características e propriedades de uma unidade de mapeamento são definidas pelas unidades taxonômicas que a compõem, representadas por classes de solos definidas e conceituadas segundo parâmetros de classificação (Embrapa, 1995).

Por todos esses aspectos, pode-se perceber que o objetivo principal de um levantamento pedológico é subdividir áreas heterogêneas em parcelas mais homogêneas, que apresentem a menor variabilidade possível, em função dos parâmetros de classificação e das características utilizadas para distinção dos solos (Embrapa, 1995).

Nos países em desenvolvimento como o Brasil, existem amplas possibilidades de se fundamentar o crescimento econômico no potencial de uso dos solos. Para isto, é imprescindível o conhecimento de sua aptidão em relação aos diversos tipos de exploração agropecuária e florestal, preservação, expansão de áreas urbanas e industriais e locação de rodovias e ferrovias, mediante um planejamento “ideal” da ocupação, a qual deve encontrar-se em harmonia com o meio ambiente (Embrapa, 1995).

Grunwald (2006) sugere que os solos podem ser vistos como unidades funcionais utilizados para fins diversos (por exemplo, agricultura de precisão, desenvolvimento urbano, lazer, etc.) e por vários usuários. Assim, a compreensão da distribuição espacial e temporal dos solos e suas características são pré-requisitos para otimizar lucros econômicos, minimizar impactos negativos sobre o solo e a qualidade da água.

Já Jenny (1941) considerava as propriedades do solo como um sistema dinâmico e funcionalmente inter-relacionado. Ou seja, se uma propriedade se altera, as outras também se modificam. Assim, para distinguir o solo de outros sistemas naturais, as propriedades devem possuir certos limites dentro de uma gama de valores máximos e mínimos definidos. Quando uma ou mais propriedades (pH, teor de argila, porosidade, densidade, matéria orgânica, umidade, entre outras) sofre uma mudança, o sistema assume um “estado” diferente e dá origem a um novo tipo de solo. Deste modo, estas propriedades estão correlacionadas com variáveis independentes que definem o sistema solo, habitualmente denominadas de “fatores formadores do solo”.

O solo pode ser considerado como um manto tridimensional com diferentes graus de organização interna: lateral, vertical e temporal. Assim, o grau em que as variáveis se relacionam umas com as outras é expresso no conceito de ordem, e as variáveis do solo e da paisagem irão variar em sincronia para estabelecer as fronteiras entre as unidades espaciais. Portanto, essa separação é muitas vezes difícil de se conseguir na prática (McKenzie et al., 2008).

As variações do solo entre as unidades podem ser bruscas ou graduais, as quais podem ser representadas com certa facilidade por meio de métodos qualitativos de pesquisa. Por exemplo, as análises em catena ou topossequência são usadas para descrever as variações graduais dentro de extensas unidades da paisagem. Portanto, uma das vantagens significativas destes métodos quantitativos é a capacidade de representar as variações contínuas e descontínuas do solo (McKenzie et al., 2008).

Desta maneira, a segmentação da paisagem contínua em horizontes, perfis e unidades espaciais, requer estruturas que permitam a simplificação e previsão. Isto supõe que existam melhores locais do que outros para a delimitação de fronteiras, tanto lateralmente como verticalmente. Nesse sentido, com o advento das novas tecnologias digitais, surge a oportunidade de representar a paisagem de uma forma contínua, retratando as variações naturais mais próximas da realidade (McKenzie et al., 2008).

Para facilitar o entendimento, pode-se mencionar que existem, basicamente, duas técnicas para mapeamento de solos.

A primeira técnica, chamada de clássica ou tradicional, emprega o método *clorpt*, que estabelece que, o Solo (S) é resultado da interação de cinco fatores: clima (cl), organismos (o), relevo (r), material de origem (p) e tempo (t); geralmente, com base na interpretação de fotografias aéreas e verificação a campo dos solos e das características associadas à paisagem. Ademais, é preciso considerar que este método qualitativo foi formalizado por Jenny (1941) e tem sido amplamente utilizado por vários autores (McBratney et al., 2003; Lagacherie, 2008; Florinsky, 2012), representado pela equação 1:

$$S = f(\text{cl, o, r, p, t}) \quad \text{Eq. 1}$$

A segunda técnica, denominada de mapeamento digital de solos (MDS), utiliza o método *scorpan*, adaptado por McBratney et al. (2003). Este é uma modificação da metodologia descrita por Jenny (1941) para explicar as relações quantitativas entre o solo e outros fatores ambientais especialmente referenciados. Então, considera-se que as classes ou os atributos do solo (S) são uma função do: *s*: solo – propriedades do solo em um ponto dado; *c*: clima – condições climáticas do ambiente em um ponto dado; *o*: organismos – incluindo vegetação, fauna e atividades humanas; *r*: relevo – topografia e variáveis morfométricas; *p*: material de origem – incluindo litologia; *a*: idade – fator tempo; *n*: espaço – posição no espaço. Portanto, esta técnica fica definida na equação 2:

$$S = f(\text{s, c, o, r, p, a, n}) \quad \text{Eq. 2}$$

Compreende-se então que a letra *f* significa “função” ou “dependente”, e que, o modelo *scorpan* foi feito para predizer, explicitamente, as classes de solos e os seus atributos, em uma posição geográfica específica (coordenadas X e Y) e tempo determinado.

Além de tudo, é muito importante conhecer, não somente “como um determinado solo é”, ou “por que ele é daquele jeito”, mas também saber “onde ele está localizado”. É nesse aspecto que os mapas de solos são úteis, já que qualquer projeto que envolva o uso dos solos será beneficiado por um prévio mapeamento e classificação de seus solos.

II.2.1. Mapeamento tradicional de solos

Os solos representam uma parte funcional significativa da paisagem. Portanto, aquela pode ser entendida por meio das relações existentes entre o solo e as feições da superfície terrestre, que provocam variações das propriedades do solo conforme a topografia varia. A distribuição espacial das diferentes classes de solos que ocorrem em uma área, dependentes da sua disposição no relevo, é normalmente visualizada a partir de mapas pedológicos. Esta distribuição espacial dos atributos do solo ao longo da paisagem é explicada pelo modelo solo-paisagem (Daniels et al., 1971), a qual constitui uma importante ferramenta para atividades de mapeamento e de planejamento de uso de solos.

Um profissional experiente observa as características da paisagem, como o relevo, a geomorfologia, a vegetação e a geologia local, e então usa essa informação para estimar as demais variáveis do solo e delinear as unidades de mapeamento. Logo após, o topógrafo ou pedólogo identifica as unidades e seleciona locais representativos para amostragem e descrição dos perfis dos solos (Dobos e Hengl, 2009).

Os pontos de amostragem localizam-se num transecto que percorre o território por uma área onde a topografia (com declividade variável) e a geologia variam, resultando em mudanças das propriedades do solo. Nos casos em que a paisagem for mais homogênea, os pontos de amostragem podem situar-se aleatoriamente. Desta forma, em cada ponto, são examinadas as características do solo, seja por intermédio da escavação de uma trincheira (para observar o perfil do solo) ou, por meio do uso de um trado, para extrair amostras de solo. Mediante ambas as técnicas, realizam-se amostragens de até cerca de 2 m de profundidade (se a rocha matriz não surgir antes). Por conseguinte, cada ponto de amostragem é georreferenciado e as características do solo são anotadas em folhas de registro, muitas vezes em forma de símbolos ou notas (Mendonça-Santos et al., 2015).

Tradicionalmente, o mapeamento do solo envolve a determinação de atributos morfológicos, como por exemplo, textura, estrutura e consistência derivada de observações de campo, e características físicas, químicas e biológicas derivadas de análises laboratoriais. Frequentemente, as amostras de pequeno porte são coletadas mediante o uso de brocas ou

cavidades escavadas no solo, sendo logo referenciadas como observações pontuais (Grunwald, 2006).

Para Cline (1949), o mapeamento tradicional de solos fundamenta-se no conceito de solos como um corpo natural, com características próprias, que compõem as paisagens, sendo essas unidades de referência, estabelecidas artificialmente pelo homem, para atender aos diversos esquemas de classificação taxonômica de solos. Assim, um corpo natural, para ser considerado como solo, deve conter matéria viva e ser capaz de suportar as plantas (Estados Unidos, 1993).

Segundo Wilding (1985), “o levantamento tradicional de solos pode ser pensado como um exercício de modelagem que envolve métodos científicos e elementos de arte”. Desse modo, um levantamento de campo implica, geralmente, em desenvolvimento de um modelo mental, intuitivo, determinístico e que assume a existência de uma forte correlação entre os tipos de solos e os ambientes onde eles ocorrem. Para tanto, o modelo poderá ser revisto, reformulado, e assim, um novo relacionamento solo-paisagem poderá surgir. Isto é análogo a quando um pintor transfere uma imagem mental de um sujeito para um quadro (McBratney et al., 2000).

Na prática, os métodos tradicionais de levantamentos de solos são executados mediante observações de campo e interpretação, basicamente de caráter qualitativo. Por este motivo, esses métodos se diferenciam, principalmente, quanto aos objetivos a que se destinam e quanto à extensão das áreas que abrangem, podendo ser exploratório, de reconhecimento ou até ultra-detalhado (Embrapa, 1995) (Figura 1).

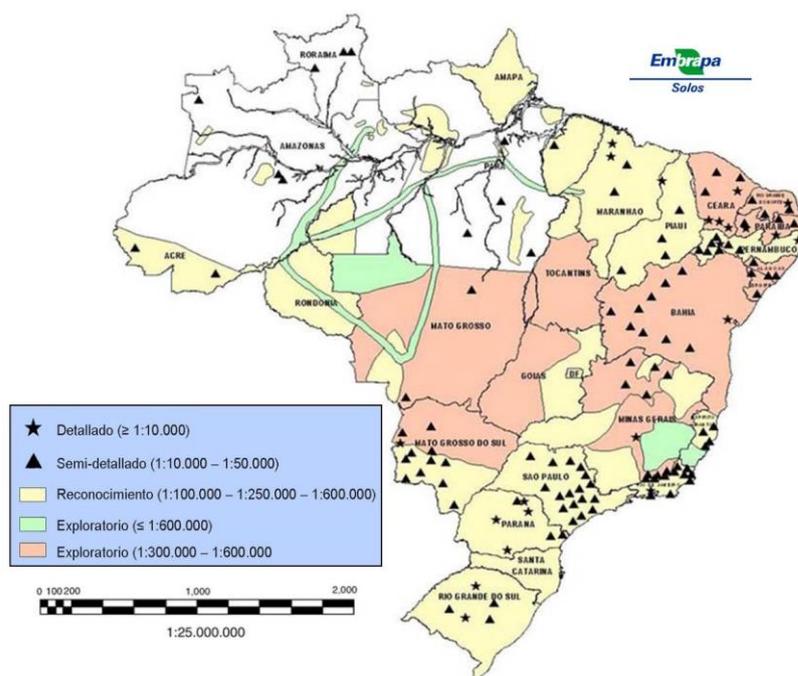


Figura 1. Mapa de levantamento de solos e mapeamento da cobertura do Brasil, atualizado até 2005. Fonte: Mendonça-Santos e Santos (2006).

Os levantamentos exploratórios são executados, normalmente, onde há necessidade de informações de natureza qualitativa do recurso solo para a identificação de áreas de maior ou menor potencial, prioritárias para o desenvolvimento regional. São apropriados para áreas de grande extensão territorial, realizando-se menos de 0,04 obs/Km² em uma escala que varia entre 1:2.500.000 e 1:750.000. No Brasil, têm sido realizados com o propósito de subsidiar políticas administrativas em escala 1:1.000.000, tal como o Projeto RADAMBRASIL (DNPM, 1975). Os levantamentos de reconhecimento são executados para fins de avaliação qualitativa e semiquantitativa de solos, visando à estimativa do potencial de uso agrícola e não agrícola. A densidade de observações varia entre 0,04 a 2,0 obs/Km² e escalas que vão desde 1:750.000 até 1:250.000 (Embrapa, 1995).

Nos levantamentos semi-detalhados, as classes de solos são identificadas no campo por observações a pequenos intervalos no interior das áreas de padrões diferentes. Portanto, este tipo de levantamento é utilizado para fornecer as bases de seleção de áreas com maior potencial para uso intensivo da terra, e para a identificação de problemas localizados, nos planejamentos gerais de uso e conservação dos solos; a escala de publicação varia entre 1:100.000 a 1:25.000, e a área mínima mapeável oscila entre 2,5 a 40 ha (Embrapa, 1995).

Já nos levantamentos detalhados, são separadas unidades de mapeamento bastante homogêneas com menores variações. Para isto, as classes de solos são identificadas no campo, por meio de observações sistemáticas ao longo de topossequências. Por conseguinte, este tipo de levantamento é utilizado para prover de uma base de dados adequada, que possa mostrar as diferenças significativas de solos, sendo empregadas em projetos conservacionistas, áreas experimentais, uso da terra e práticas de manejo em áreas de uso agrícola, pastoril ou florestal intensivo, entre outros; a escala de publicação varia entre 1:25.000 a 1:10.000 e a área mínima mapeável oscila entre 0,4 a 2,5 ha (Embrapa, 1995).

Nos levantamentos ultra-detalhados, são separadas as unidades de mapeamento com pequenas variações, muito homogêneas. Para tal, é percorrida toda a área no campo com intervalos bem estreitos entre as observações. Por isso, este tipo de levantamento é utilizado para planejamento e localização de explorações muito pequenas, como por exemplo, parcelas experimentais, áreas urbanas e industriais, projetos especiais de irrigação, entre outros; a escala de publicação é maior que 1:10.000, e a área mínima mapeável é menor que 0,4 ha (Embrapa, 1995).

O número de observações varia quanto à escala cartográfica, objetivos (definição e composição das unidades de mapeamento) e precisão das informações apresentadas. De acordo com Breimer et al. (1986), o trinômio precisão-escala-objetivo determinam o tipo de levantamento que será realizado e, em consequência, a composição de unidades de mapeamento, métodos de prospecção, qualidade e escala do material cartográfico, sensores remotos básicos, frequência de amostragem e características taxonômicas a serem utilizadas.

Em função disso, o profissional tenta agrupar os pédons contíguos (unidade básica de referência taxonômica, tridimensional, com limites e dimensões arbitrárias que se superpõem as de outros pédons), que atendam a determinados critérios ou que possuam um conjunto similar de características. Este agrupamento de pédons semelhantes (chamado de polipédons) conduz finalmente à delimitação de uma área de solos, constituída por um polígono desenhado na paisagem e que representa uma área com (presumivelmente) o mesmo tipo de solo. Como resultado, os valores médios representativos podem ser atribuídos a toda a área delimitada, constituindo polígonos homogêneos. Apesar disso, estas áreas possuem limites discretos e a transição de uma unidade de solo para outra acontece de maneira abrupta (Dobos e Hengl, 2009).

Sendo assim, o mapeamento tradicional constitui uma delimitação das áreas de ocorrência de cada classe de solo na região ou área levantada. Os métodos mais frequentes para fins de coleta de dados, descrição de características dos solos no campo e verificação de limites entre unidades de mapeamento, compreendem: investigações ao longo de transeções, levantamentos de áreas-piloto, estudos de toposseqüências, sistema de malhas e método do caminhar livre (Embrapa, 1995).

O método de transeções consiste de observações por meio de trajetos planejados para detectar características dos solos e o máximo de variações da paisagem. As observações são efetuadas a intervalos regulares (transeções por pontos) ou sempre que há mudanças de classes de solos ou outras características importantes (transeções por linhas) (Embrapa, 1995).

Os levantamentos de áreas-piloto constam de investigações minuciosas de áreas menores, representativas de uma determinada feição fisiográfica e, posteriormente, extrapolada para o restante da área. Já no método de prospecção ao longo de toposseqüências, os solos e suas variações são correlacionados com as superfícies geomórficas em que ocorrem, sendo possível estabelecer correlações entre solos e relevo (Embrapa, 1995).

Para projetos de uso intensivo de solos (levantamentos detalhados e ultra-detalhados), a coleta de amostras, observações de campo e estudo da variabilidade dos solos são feitos mediante utilização de sistema de malhas. Neste método, as caracterizações se processam em espaços pré-fixados, de modo a formar um reticulado denso (malha) em toda a extensão da área (Embrapa, 1995).

Por último, mediante o método do caminhar livre, pedólogos usam a própria experiência, o conhecimento sobre a área, a fotointerpretação e as correlações para definir os pontos de observação e amostragem representativos, de modo a fornecer o máximo de informações para o mapeamento e caracterização dos solos (Embrapa, 1995).

A grande limitação do método tradicional de mapeamentos de solos se vincula à escala do mapa de base e à incapacidade para representar as variações espaciais de forma contínua, sendo a seleção de dados difícil (Boettinger et al., 2010).

A quantidade de dados sobre solo e informações necessárias para justificar o produto do mapeamento, como a interpolação de dados de áreas similares e a incorporação de dados mais antigos, são desafios que precisam de mais discussão. Muitas vezes, esses dados foram coletados com técnicas obsoletas ou imprecisas, devendo ser cruzados com os padrões atuais para seu uso, mas, o maior obstáculo na utilização de dados antigos é a falta de georreferenciamento (Hartemink, et al., 2008).

Métodos tradicionais de levantamento de solos são geralmente empíricos, com base no modelo conceitual desenvolvido pelo pedólogo, sendo necessária a localização e coleta de amostras para confirmar a interpretação que o pedólogo teve em relação à distribuição de solos na paisagem. A desvantagem deste procedimento se fundamenta em que não é considerado um delineamento estatístico prévio, podendo, a amostragem de solos, não ser representativa da área mapeada (Howell et al., 2008).

Portanto, estes métodos têm eficiência variável, pois utilizam as relações existentes entre as propriedades do solo e as características ambientais observáveis como base para o mapeamento. Conseqüentemente, esses modelos de previsão empíricos são qualitativos, complexos e raramente transmitidos de maneira clara.

Então, pode-se concluir que os métodos tradicionais são caros, consomem tempo, e podem também resultar em poluentes ambientais, em função da grande quantidade de análises laboratoriais necessárias, com utilização de substâncias químicas (Nanni e Demattê, 2006b).

II.2.2. Mapeamento digital de solos

Atualmente, os levantamentos e mapeamentos de solos contam com recursos modernos, auxiliados por tecnologias como o sensoriamento remoto (sensores e câmaras instaladas em aviões e satélites utilizados para obter imagens) para prever a distribuição espacial dos solos. Esta técnica baseia-se no uso de variáveis ambientais quantitativas para realizar o Mapeamento Digital do Solo (MDS). Demanda menor tempo e custos envolvidos do que normalmente seria requerido por outros métodos, surgindo assim, como uma potente ferramenta para aquisição e tratamento das informações dos solos (McKenzie e Ryan, 1999).

O MDS teve seu início por volta de 1970, se expandindo significativamente durante a década de 1980, principalmente devido aos avanços na área de Tecnologia da Informação e de Sensoriamento Remoto (Sanchez et al., 2009).

Lagacherie (2008) define o MDS como a “criação e a disseminação de sistemas de informação espacial de solos, utilizando modelos numéricos para a inferência das variações

espaciais e temporais das propriedades e tipos de solos, a partir das observações destes e das variáveis ambientais correlacionadas, como as variáveis geomorfométricas elevação e declividade, dentre outras”.

Um mapa digital de solos é essencialmente um banco de dados espacial de propriedades do solo, baseado em amostragem e modelagem estatística/matemática da paisagem. A amostragem de campo é utilizada para determinar a distribuição espacial das propriedades do solo, as quais são quantificadas em laboratório. Então, esses dados são utilizados para estimar as propriedades dos solos em áreas desconhecidas, que não foram amostradas (Ten Caten e Quoos, 2009).

Deste modo, os dados gerados podem ser usados para desenvolver modelos e para realizar recomendações de manejos específicos dos solos, sendo disponibilizado para os usuários finais (Sanchez et al., 2009).

A grande expansão da computação e tecnologias da informação está disponibilizando vastas quantidades de dados e ferramentas em todos os campos de atuação. Ciências do solo não são exceção, com a contínua criação de bases de dados de abrangências regionais, nacionais, continentais e mundiais propiciando o desenvolvimento de novas técnicas e ferramentas no campo da geoestatística para compreender esse enorme volume de dados (McBratney et al., 2003).

O aumento no número e capacidade de ferramentas como o Sistema de Informação Geográfica (SIG ou GIS, do inglês *Geographic Information System*), Sistemas de Posicionamento Global (GPS), Espectroscopia, Sensoriamento Remoto e fontes de dados, como os fornecidos por Modelos Digitais do Terreno (MDT) estão fornecendo subsídios para atividades de levantamentos pedológicos. Esta revolução metodológica vem acontecendo em um momento em que há uma demanda global crescente sobre dados de solos e informações para o monitoramento e modelagem ambiental (McBratney et al., 2003).

O SIG pode ser definido como um sistema informático para realização de análises geográficas. Os vários elementos tais como estradas, rios e corpos d'água, curvas de nível, tipos de solo ou pontos de avaliação da qualidade da água, são representados num SIG de forma digital mediante pontos, linhas (arcos), polígonos (áreas) ou células (quadriculas).

Esses elementos estão “georreferenciados” mediante coordenadas geográficas de latitude e longitude, e também, associados a informações descritivas ou atributos dos objetos (por exemplo, nomes, propriedade, profundidade, tipo de solo), armazenados em forma de tabelas numa base de dados. Os dados espaciais e seus atributos, associados no mesmo sistema de coordenadas, podem ser examinados simultaneamente e se sobreporem para a elaboração de mapas (Mendonça-Santos et al., 2015).

Por todos esses aspectos, o MDS se apresenta como alternativa ao mapeamento tradicional, proporcionando um método mais eficiente e econômico (McBratney et al., 2003),

com redução de tempo e custos de execução, densidade de observações e frequência de amostragem, além do menor número de análises laboratoriais (Embrapa, 1995).

A principal aplicação desta abordagem é a predição, por meio de modelos matemáticos e geoestatísticos, de classes e atributos dos solos e o mapeamento digital, de forma contínua e espacial das unidades taxonômicas (Caten et al., 2011). Esta técnica baseia-se na análise das características quantitativas, especialmente distribuídas, dos fatores de formação do solo por meio de equações matemáticas, como a análise de regressão múltipla, enfoques geoestatísticos híbridos, lógica *Fuzzy*, árvores de decisão, redes neurais artificiais e outros (Florinsky, 2012).

O MDS pode ser dividido em três abordagens: 1º— funções de pedotransferência; 2º— enfoques geoestatísticos; e 3º— fatores formadores do solo (scorpan). Uma função de pedotransferência descreve uma função matemática onde uma propriedade do solo é prevista por outra, geralmente mais fácil de medir, onde trabalhos sobre a previsão das características hidráulicas do solo dominam o campo de pesquisa. A abordagem geoestatística, introduzida por Krige (1952), emprega dados que foram recolhidos e analisados para interpolar mapas de atributos do solo, enquanto que o enfoque Scorpan (McBratney et al., 2003) considera a relação entre os fatores formadores do solo e suas características morfológicas.

O principal foco do MDS para a predição quantitativa dos solos são as abordagens Scorpan e geoestatística (Behrens e Scholten, 2006). A hipótese básica do MDS é que, uma vez que se conheça a distribuição espacial das condições do solo, em função das suas inter-relações com outros elementos da paisagem (covariáveis), pode-se prever geograficamente as propriedades específicas (nas áreas não amostradas) de maneira contínua no espaço. As incertezas associadas revelam a confiabilidade das estimativas das predições realizadas (Mendonça-Santos et al., 2015).

As covariáveis do solo são os dados geográficos que se encontram disponíveis em grandes áreas e que podem ser usados como entrada nos procedimentos de mapeamento digital de solos. Representam os fatores ambientais que regem a formação do solo como o material de origem, relevo, organismos, clima e tempo. A primeira fonte de covariáveis é o MDT, que provê de atributos quantitativos da topografia para a parametrização da morfologia do relevo. Adicionam-se as imagens de sensoriamento remoto e os mapas existentes (Madeira Netto et al., 2007).

MacMillan (2008) afirmou que, independentemente da abordagem, dos objetivos e dos métodos que são empregados, o processo de MDS envolve basicamente seis passos (Figura 2), detalhados a seguir.

O primeiro passo consiste em definir o objetivo do mapeamento: identificar claramente a área e a escala de trabalho, sobre a qual será feita a predição de atributos específicos do solo ou a distribuição espacial das classes de solos. O segundo passo é identificar e obter

dados de entrada relevantes para se alcançar o objetivo proposto, incluindo pontos com informação de referência sobre classes ou propriedades de solos e variáveis que podem ser usadas como preditoras, tais como atributos do terreno derivados do MDT, imagens de sensoriamento remoto e mapas existentes.

O terceiro passo refere-se ao desenvolvimento de equações para prever propriedades dos solos ou de regras de classificação. O quarto passo consiste em aplicar as equações ou as regras de classificação previamente desenvolvidas.

O quinto passo corresponde à avaliação do sucesso ou acurácia da predição das propriedades ou classes, comparando-se o resultado com dados de referência coletados em pontos de observação. Dependendo do resultado, pode-se retornar às etapas anteriores para revisar ou adequar os objetivos, variáveis ou as próprias equações. Uma vez alcançado um grau de acurácia aceitável, o sexto e último passo, que é a geração dos mapas finais, pode ser finalmente executado.

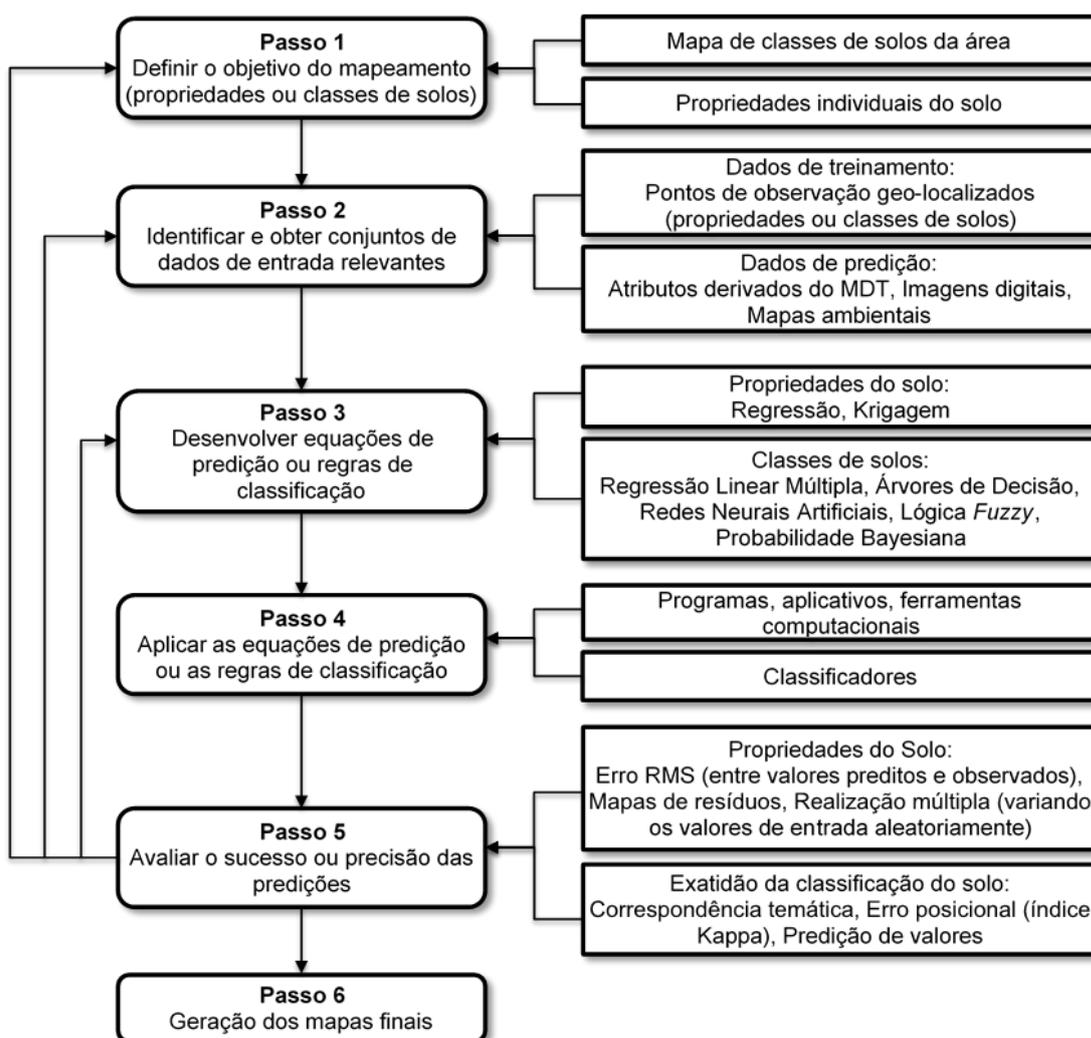


Figura 2. Fluxograma geral de passos comuns à maioria dos protocolos de MDS. Adaptado de MacMillan (2008).

Assim, o MDS fornece uma estimativa da variabilidade espacial do solo mais clara e detalhada. Enquanto o mapeamento tradicional de solos é limitado pela escala do mapa base e pela incapacidade de representar variação espacial contínua, o MDS é limitado pela resolução dos dados espaciais.

Contudo, cabe destacar que a maioria das abordagens para mapeamento digital são limitadas pela disponibilidade de dados dos solos (Roecker et al., 2010).

II.3. Comportamento espectral de solos

Para relacionar observações remotas com propriedades dos solos, é necessária uma fundamentação sobre as interações da luz com a matéria. Assim, a radiação eletromagnética (REM) que se propaga pelo espaço vazio, como a luz solar (Tabela 1), apresenta dualidade do comportamento da sua natureza, *onda* e *energia*, e que pode ser explicada pelos modelos denominados de ondulatório (*onda*) e corpuscular (*energia*) (Meneses e Almeida, 2012).

Tabela 1. Divisão do espectro eletromagnético ou radiação eletromagnética (REM). Fonte: Meneses e Almeida (2012).

Intervalo Espectral	Comprimento de onda
Raios cósmicos	0,01 A°
Raios gama	0,01 – 0,1 A°
Raios X	0,1 – 10 A°
Ultravioleta	100 nm – 380 nm
Visível (VIS)	380 – 760 nm
Violeta	380 – 455 nm
Azul	455 – 482 nm
Verde	498 – 530 nm
Amarelo	576 – 580 nm
Laranja	587 – 597 nm
Vermelho	617 – 760 nm
Infravermelho próximo (NIR)	760 – 1200 nm
Infravermelho de ondas curtas (SWIR)	1200 – 3000 nm
Infravermelho médio (MWIR)	3000 – 5000 nm
Infravermelho termal (TIR)	5000 nm – 1 mm
Micro-ondas	1 mm – 100 cm
Rádio	1 m – 10 km
Áudio	10 – 100 km
Corrente alternada	> 100 km

Obs: A° = 10⁻¹⁰ m; nm = 1 µm; nm = 10⁻⁹ m; µm = 10⁻⁶ m.

Em negrito, os intervalos espectrais usados pelos sensores remotos.

Teoricamente, a radiança total que é refletida por um solo exposto e é registrada por um sensor (L_t), é função de três fatores: a energia radiante refletida diretamente pela interface ar-solo (L_s), a energia radiante refletida pelo solo como espalhamento volumétrico (L_v), e pela energia radiante refletida (espalhada) diretamente pela atmosfera (L_p) (Jensen, 2009; Meneses e Almeida, 2012) (Figura 3). Esta relação pode ser expressa pela equação 3:

$$L_t = L_p + L_s + L_v \quad \text{Eq. 3}$$

O espalhamento (L_p), difusão ou dispersão, corresponde à mudança aleatória da direção de propagação da radiação solar incidente devido à sua interação elástica com os componentes atmosféricos. Esse processo ocasiona um efeito aditivo da energia refletida que o sensor recebe, resultando numa diminuição do contraste da reflectância entre dois alvos (Meneses e Almeida, 2012). Dependendo das relações entre o comprimento de onda da radiação incidente (λ) e o tamanho das partículas atmosféricas (diâmetro) que causam o espalhamento, este fenômeno pode ser dividido em três categorias: espalhamento Rayleigh, espalhamento Mie e espalhamento não-seletivo (Richards e Jia, 2006; Schowengerdt, 2007).

O espalhamento Rayleigh ocorre quando o diâmetro das partículas (moléculas de gases atmosféricos) é menor do que o comprimento de onda (menores comprimentos de onda do visível). O espalhamento Mie ocorre quando a onda eletromagnética (maiores comprimentos de onda do visível) é de tamanho comparável ao tamanho das partículas atmosféricas (gotas de água, aerossóis). Finalmente, o espalhamento não-seletivo ocorre quando o tamanho das partículas (nuvens, neblina, névoas) é muito maior que o comprimento de onda da faixa espectral que vai do visível ao termal (400 nm a 14.000 nm) (Meneses e Almeida, 2012).

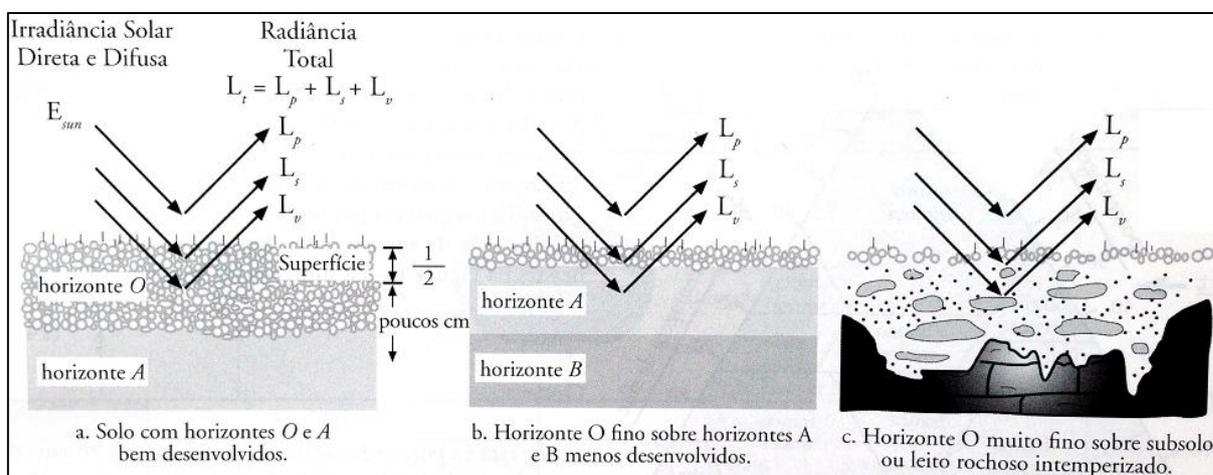


Figura 3. Componentes da radiação eletromagnética medida pelo sensor imageador. Fonte: Jensen (2009).

Por outro lado, uma parte da radiação solar direta incidente sobre o solo exposto pode ser capaz de penetrar, uns poucos mm ou até mesmo um ou dois cm no perfil do solo. Esta parte pode ser refletida como espalhamento volumétrico (L_v). Consequentemente, a quantidade de fluxo radiante volumétrico espalhado ou refletido de volta para a atmosfera é função do comprimento de onda (λ) da REM incidente, do tipo e da quantidade de constituintes orgânicos/minerais, da forma e da densidade dos minerais, da textura e estrutura e da quantidade de umidade no solo (Jensen, 2009).

Portanto, a energia refletida pelas superfícies pode ser entendida como a porção de energia incidente, suprimindo-se as porções que foram absorvidas ou transmitidas (ou espalhadas volumetricamente) (Figura 3). A reflectância espectral [$\rho\lambda(\%)$], que é função do comprimento de onda (λ), pode ser definida matematicamente como a razão entre a energia no comprimento de onda (λ) refletida pelo objeto [$E_R(\lambda)$] e a energia no comprimento de onda (λ) incidente sobre o objeto [$E_I(\lambda)$], conforme equação 4 (Madeira Netto e Baptista, 2000).

$$\rho\lambda(\%) = \frac{E_R(\lambda)}{E_I(\lambda)} \quad \text{Eq. 4}$$

Similarmente, de acordo com Meneses e Almeida (2012), a reflectância [$\rho\lambda(\%)$] pode ser definida como a razão entre a quantidade de energia radiante [$E_R(\lambda)$] que deixa uma unidade de área no terreno (*Radiância*) pela quantidade de energia incidente [$E_I(\lambda)$] naquela área (*Irradiância*), medida no mesmo instante de tempo. Dessa forma, em termos de unidade, a irradiância é medida em $Wm^{-2}\mu m^{-1}$ e a radiância em $Wm^{-2}sr^{-1}\mu m^{-1}$ – energia radiada num período de tempo (W), por unidade de área da superfície do terreno (m^2), por unidade de ângulo sólido/cônico (sr^{-1}), e por unidade de comprimento de onda (μm^{-1}). O Esterradiano (sr), ou esferorradiano, é a unidade de medida de ângulo sólido, em que $1 sr = 57$ graus plano. Como resultado, o valor dessa razão é adimensional, sendo expresso em porcentagem ($> 0\%$ e $< 100\%$).

Quando se obtém estes dados por meio de imageamento orbital, a imagem resultante é uma representação digital dos valores da radiância (medidas pelo sensor imageador), e não uma imagem de reflectância (devem-se converter os valores digitais para radiância e em seguida calcular a reflectância).

Finalmente, pode-se dizer que estes sensores imageadores decompõem a radiação incidente em diferentes comprimentos de onda (por exemplo, do visível ao infravermelho de ondas curtas), sendo que, a intensidade relativa de energia refletida pelo objeto pode ser medida, de uma maneira estreita ou contínua, ao longo do espectro eletromagnético (Novo, 2010), fornecendo um conjunto de dados numéricos ou gráficos conhecidos como curvas ou assinaturas espectrais.

II.3.1. Constituintes do solo

Os principais componentes dos solos que interagem com a REM são: sólidos inorgânicos, matéria orgânica, ar e água. Portanto, os espaços porosos entre as partículas de materiais sólidos são ocupados ou pela água do solo ou pelo ar do solo, em concentrações relativas variadas (Brady e Weil, 2013).

Os componentes inorgânicos da maioria dos solos constituem-se de minerais cristalinos e não cristalinos. Dentre os principais constituintes mineralógicos dos solos de regiões tropicais estão a caulinita, a gibbsita, o quartzo, a goethita e a hematita (Epiphanyo et al., 1992).

O material orgânico do solo constitui-se de húmus (composto estável) e de substâncias húmicas (material em decomposição) como raízes, resíduos de plantas e organismos que vivem no solo (Brady e Weil, 2013).

Epiphanyo et al. (1992) consideram que as concentrações relativas, os arranjos e as inter-relações dos materiais pedológicos são os responsáveis pelas diversas maneiras de reflexão da energia solar pelos diferentes solos.

Os minerais do solo provenientes do intemperismo das rochas são classificados como "minerais primários" e "minerais secundários", dependendo da origem. Os minerais primários são incorporados aos solos mediante a desintegração das rochas como resultado do intemperismo mecânico, enquanto que, os minerais secundários são formados por meio do intemperismo químico dos minerais primários (Brady e Weil, 2013).

Os minerais primários ocorrem predominantemente nas frações areia (0,05 mm) e silte (0,002 a 0,05 mm) e os mais comumente encontrados nos solos são silicatos e aluminossilicatos (quartzo, feldspatos e filossilicatos ferromagnesianos). Por outro lado, os minerais secundários encontram-se predominantemente na fração argila (0,002 mm), sendo os mais comuns os alumino-silicatos, os óxidos e os hidróxidos de ferro e alumínio, e secundariamente, os carbonatos, os sulfatos e os fosfatos (Buol et al., 1989).

Portanto, pode-se considerar como principais fatores que influenciam no comportamento espectral dos solos, a constituição mineral, a matéria orgânica, a textura e a estrutura e a umidade (Epiphanyo et al., 1992).

II.3.2. Parâmetros do solo que influenciam a reflectância

II.3.2.1. Matéria orgânica

O conteúdo de matéria orgânica (MO) do solo e a composição dos constituintes orgânicos são fatores de forte influência sobre a reflectância dos solos, no intervalo de comprimentos de onda de 400 a 2.500 nm (Hoffer e Johannsen, 1969).

Normalmente, é utilizada a denominação de "MO" do solo, para misturas complexas de compostos de carbono com características físicas e químicas variáveis. Nesse sentido, a

MO pode ser classificada em três categorias: húmus, ácidos fúlvicos e ácidos húmicos. A proporção desses compostos pode variar em função dos fatores de formação, tais como as condições climáticas, os organismos que deram origem à matéria orgânica e a composição dos materiais inorgânicos, entre outros (Madeira Netto, 2001).

O acúmulo de substâncias húmicas escuras nos solos reduz o coeficiente de brilho, ocasionando um matiz acinzentado o que tende a aproximar a coloração do acromático (redução dos coeficientes de cor). Dessa forma, a MO é o principal componente responsável pela redução da reflectância na faixa de 650 a 750 nm. A presença de mais que 1,7% de MO oblitera as características espectrais dos óxidos de ferro. Sendo assim, a remoção da MO com peróxido de hidrogênio (H_2O_2), provoca um aumento significativo da reflectância (albedo) e um aplainamento na forma dos espectros (Madeira Netto e Baptista, 2000).

Madeira Netto et al. (1993b) demonstraram que o efeito da extração da MO na reflectância é muito diferente para solos com teores de óxidos de ferro diferentes. Tal fato é apresentado nos espectros de solos com porcentagens diferentes de conteúdo orgânico, mas que possuem também presença de porcentagens diferentes de óxidos de ferro (Figura 4).

Quando o teor de ferro está próximo de zero, a reflectância aumenta no intervalo de 400 a 2.500 nm (Figura 4a). Para solos com um teor alto de óxidos de ferro e nenhum mineral opaco, a eliminação da MO aumenta a reflectância nos comprimentos de onda menores (600 nm), e diminui para o restante do espectro (Figura 4b). Finalmente, para solos ricos em óxidos de ferro, geralmente opacos (magnetita e ilmenita), a reflectância diminui em quase todo o espectro após a remoção da MO (Figura 4c).

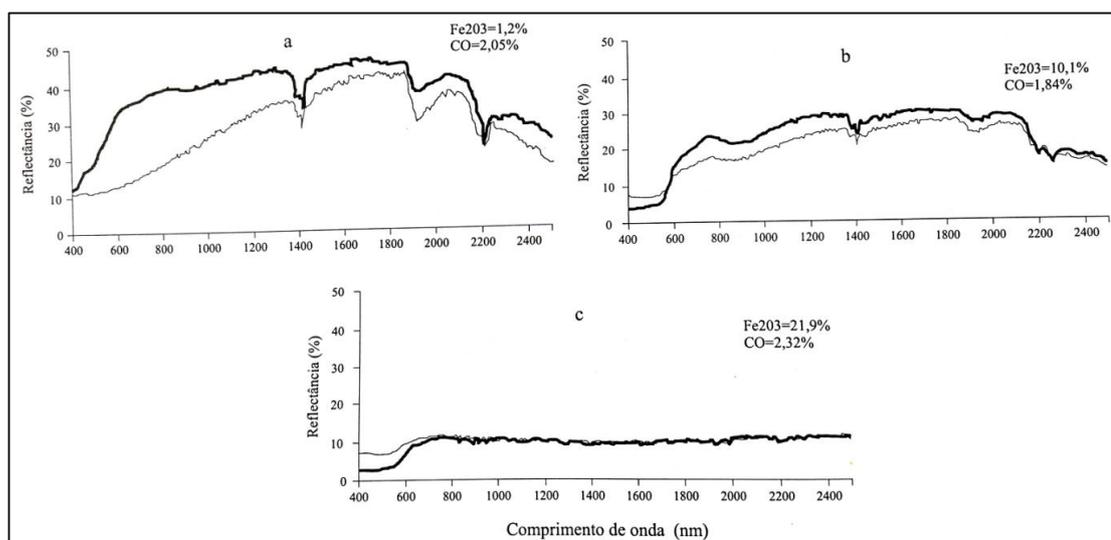


Figura 4. Espectro de reflectância de três amostras de solo (a, b e c), antes e depois da remoção da MO. As linhas mais escuras representam os espectros com MO, e as mais finas, os espectros após a remoção da MO. Fe_2O_3 = hematita; CO = carbono orgânico. a) Amostra praticamente sem óxidos de ferro; b) amostra com teores elevados em óxidos de ferro e praticamente sem minerais opacos; c) amostra com teores elevados em óxidos de ferro em minerais opacos. Fonte: Madeira Netto (2001).

II.3.2.2. Óxidos de ferro

Os óxidos de ferro são de grande ocorrência nos solos das regiões tropicais e subtropicais, resultado de reações de oxidação de minerais primários ricos em ferro, interferindo nos atributos químicos e físicos dos solos e influenciando, também, sobre o seu comportamento espectral (Figura 5a). O tipo e quantidade relativa de óxidos de ferro influenciam a cor dos solos (vermelhos ou amarelos) ricos em argilas sesquioxídicas, devido à absorção seletiva da energia da REM na região do visível, para promover a transição dos elétrons nas camadas orbitais dos elementos metálicos (Epiphany et al., 1992; Dalmolin et al., 2005).

Os sesquióxidos, de ocorrência comum nos solos intensamente intemperizados, apresentam espectros de reflectância dominados por feições devidas ao ferro férrico (Fe^{3+}). A goethita (FeOOH) e a hematita (Fe_2O_3) são as mais freqüentes ocorrências desses minerais de ferro, encontrados em solos tropicais. Eles resultam da oxidação do ferro presente como Fe^{2+} em minerais primários nos processos de formação de solos (Baptista e Meneses, 2009).

Portanto, a predominância de um ou outro desses minerais está relacionada a fatores pedoclimáticos, sendo a compreensão de sua ocorrência de grande importância nos estudos de solos tropicais, principalmente para se inferir o caráter pedohídrico da cobertura (Madeira Netto, 2001).

Esses sesquióxidos de ferro tornam-se diferenciados por suas feições espectrais, principalmente nos comprimentos de onda do visível e do infravermelho próximo.

De acordo com Sherman e Waite (1985), as principais transições eletrônicas da hematita e goethita, na faixa do visível e do infravermelho próximo, são do tipo campo cristalino, sendo responsáveis pelas cores desses minerais, vermelho para a hematita e bruno-amarelo para goethita.

Estes óxidos apresentam bandas de absorção bem definidas, centradas em 530 nm para a hematita e em 480 nm para a goethita, que são mais intensas quanto maiores forem os teores de ferro (Figura 5b). Quando há a presença de outros óxidos de ferro, geralmente em minerais opacos, como magnetita e ilmenita, ocorrem baixas reflectâncias no visível e no infravermelho próximo, sem feições de absorção (Madeira Netto e Baptista, 2000) (Figura 5c).

Stoner e Baumgardner (1981) relataram que teores de óxidos de ferro maiores que 4% podem mascarar o efeito da matéria orgânica. Dalmolin et al. (2005) afirmaram que, em solos com baixos teores de ferro, a reflectância aumenta ao longo do espectro eletromagnético.

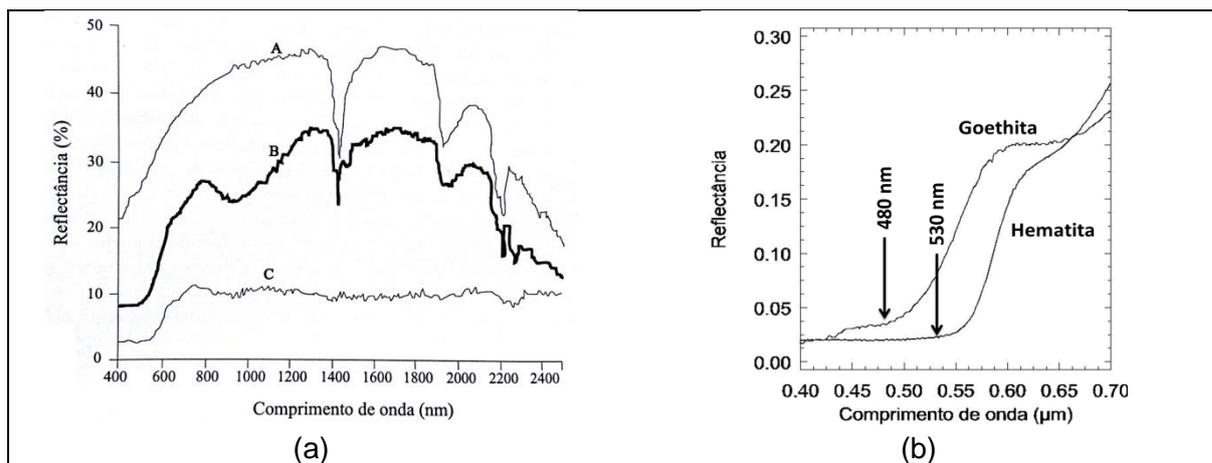


Figura 5. Espectros de reflectância difusa. a) de três amostras de solos representativos dos três tipos principais de composição mineralógica: A – praticamente sem óxidos de ferro; B – teores elevados em óxidos de ferro e praticamente sem minerais opacos; e C – teores elevados em óxidos de ferro em minerais opacos (magnetita e ilmenita). Fonte: Madeira Netto (2001). b) feições de absorção de goethita (WS222 - da biblioteca espectral do USGS, Clark et al., 1993) e de hematita (GDS27 – USGS, Clark et al., 1993).

II.3.2.3. Cor

A cor do solo é um atributo que pode ser facilmente determinado, sendo utilizado para classificação e interpretação de solos. Sua importância reside no fato de que a cor se mostra relacionada com a composição mineralógica (óxidos de ferro), conteúdo de MO e composição textural (Schulze et al., 1993; Schwertmann, 1993).

No campo, o pedólogo determina qualitativamente as cores pela comparação direta entre a cor de uma amostra de solo e as de uma carta padronizada (tabela Munsell), observando-se o matiz (comprimento de onda da luz), o valor (brilho ou tonalidade) e o croma (intensidade ou pureza da cor em relação ao cinza). Entretanto, os parâmetros da cor podem ser quantitativamente determinados a partir de espectros de reflectância, via sensoriamento remoto (colorímetros, espectrofotômetros e espectrorradiômetros), resultando em uma maior precisão por se darem em condições controladas e não subjetivas (Dalmolin et al., 2005; Botelho et al., 2006).

A cor do solo é dependente da luz incidente, da percepção do observador ou instrumento de medida, e também, da energia refletida pelo solo, podendo ser calculada a partir do espectro de reflectância (radiometria). Esta técnica quantifica pequenas diferenças na cor do solo, as quais são imperceptíveis à observação visual, eliminando a subjetividade do modelo tradicional (Fernandez e Schulze, 1987; Campos e Demattê, 2004).

Kämpf e Schwertmann (1983) encontraram estreita relação entre a cor dos solos e teor e tipo de óxidos de ferro presentes no solo. A hematita e a goethita são os óxidos de ferro mais comuns, onde solos com hematita são mais vermelhos e com goethita livres de hematita

são amarelos. Quando o solo apresenta os dois óxidos de ferro domina a cor vermelha da hematita. Já a ausência de óxidos de ferro confere ao solo cor cinza (cor de redução). Portanto, na camada superficial essa relação pode ser mascarada devido à presença de matéria orgânica (cor escura) (Kämpf e Schwertmann, 1983; Fernandes et al., 2004). Os solos ricos em quartzo e pobres em matéria orgânica e óxidos de ferro apresentam cores claras e esbranquiçadas (Azevedo e Dalmolin, 2004).

Sherman e Waite (1985) mostraram que a diferença entre as cores, da goethita e hematita é determinada pela posição da transição eletrônica de efeito de campo cristalino $2(6A1) \Rightarrow 2(4T1)$, que ocorre em 480 nm para goethita e 530 nm para hematita (Figura 5b).

Torrent et al. (1980) comprovaram a utilidade do índice de avermelhamento, baseados na notação Munsell, para predizer o conteúdo de hematita em alguns solos vermelhos da Espanha. Santana (1984), por sua vez, sugeriu o uso do fator de avermelhamento, cuja forma de cálculo proporciona maior peso ao matiz, em comparação com o valor e o croma. Já Fontes e Weed (1996) verificaram correlação significativa ($r = -0,95$, $p < 0,001$) entre o índice de avermelhamento e a relação goethita/(goethita+hematita) para algumas argilas de solos brasileiros bastante intemperizados.

II.3.2.4. Granulometria

A reflectância, assim como outras propriedades importantes do solo, é influenciada pela textura (granulometria) e estrutura do solo. A granulometria do solo refere-se à distribuição de tamanhos de partículas minerais no solo. Por um lado, o arranjo físico e a agregação destas partículas proporcionam ao solo uma estrutura. Por outro lado, a textura e a estrutura determinam a quantidade de espaços porosos disponíveis num solo para serem ocupados por água e por ar (Epiphanyo et al., 1992).

De uma maneira geral, solos de textura arenosa tendem a ter maior reflectância, devido à sua constituição mineralógica (rica em quartzo) e ao fato de geralmente apresentarem baixos teores de MO, óxidos de ferro e menores teores de água (Dalmolin et al., 2005). A diminuição no tamanho das partículas, ou seja, o aumento da proporção de areia fina e areia muito fina, provoca aumento da reflectância em solos de textura arenosa. Nos solos de textura média a fina a reflectância aumenta com o aumento do tamanho das partículas (da fração areia) e a diminuição da proporção de areia fina a muito fina (Sousa et al., 2008).

Madeira Netto (2001) relatou que, quanto menor for o tamanho das partículas, maior será o albedo dos solos, já que partículas menores apresentam superfície mais uniforme, com número menor de poros para reter a luz incidente, enquanto a maior granulometria cria superfícies mais irregulares, com sombreamentos e maior retroespalhamento interno da luz.

A reflectância dos solos argilosos é normalmente inferior à dos solos arenosos, pois formam agregados (estrutura) de maior tamanho que areia, sobrepondo-se à textura e causando a mudança da reflectância esperada (Madeira Netto, 2001).

Além disso, Stoner e Horvath (1978) verificaram que, para a superfície de solos perturbados pelo preparo agrícola, a rugosidade reduz a reflectância, devido ao efeito de sombreamento dos torrões. Nesse caso, a reflectância medida depende das características dos torrões, da geometria de iluminação e do ângulo de visada do sistema sensor (Madeira Netto, 2001) (Figura 6).

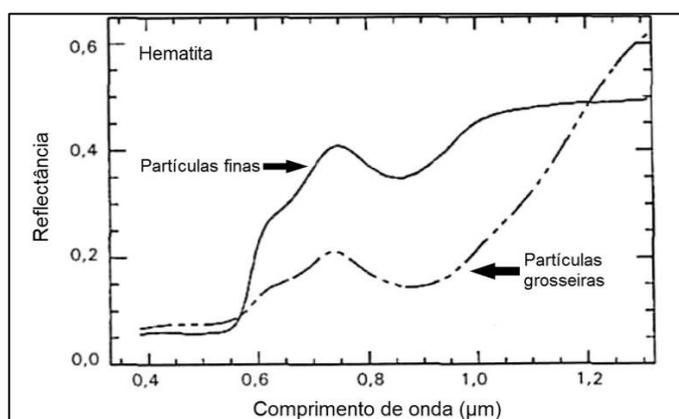


Figura 6. Variação da intensidade de reflectância da hematita em função do tamanho de grãos. Fonte: Madeira Netto e Baptista (2000).

Madeira Netto et al. (1993b) basearam-se nas feições de absorção da caulinita e da gibbsita para determinar a textura de Latossolos. Esses minerais são os principais componentes da fração argila desses solos, onde apresentam boa correlação entre a soma desses minerais e teor de argila. A figura 7 apresenta os espectros de reflectância no intervalo de 1.500 a 2.500 nm de dois solos com teores diferenciados de argila (caulinita + gibbsita), sendo de 82% para a amostra B e de 12% para a amostra A. O mais argiloso apresenta-se mais inclinado, enquanto que o mais arenoso exibe menor inclinação.

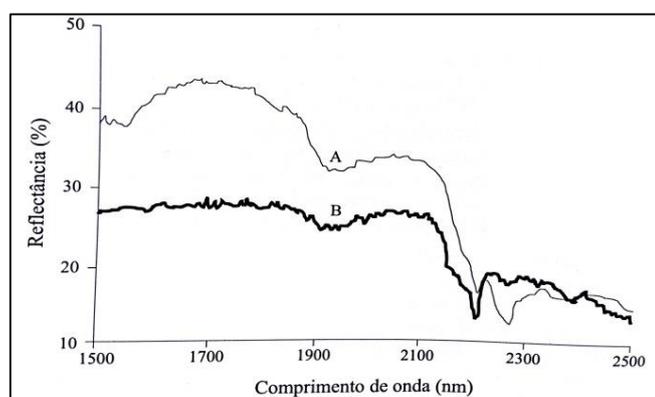


Figura 7. Exemplos de espectros de reflectância de duas amostras de solos, apresentando valores contrastantes da soma de caulinita e gibbsita. Espectro: A – caulinita+gibbsita= 12%; B – caulinita+gibbsita= 82%. Fonte: Madeira Netto (2001).

II.3.2.5. Minerais da fração argila

A composição mineralógica, fortemente dependente do grau de evolução do solo e da intensidade do intemperismo do seu material de origem, é essencial para avaliar o comportamento espectral dos solos, devido às várias feições de absorção e à influência no albedo que os mesmos conferem às curvas espectrais na faixa de 500 a 2.500 nm (Dalmolin et al., 2005).

No que se refere aos argilominerais, a caulinita e a montmorrillonita são os mais frequentes na maioria dos solos. Os espectros de reflectância desses dois minerais apresentam intensas feições de absorção na região do NIR, centradas em 1.400 e 2.200 nm. Estas feições são devidas às vibrações moleculares harmônicas de alongamento de ligações (2s) em 1.400 nm, e as combinações envolvendo o alongamento do grupo OH e as vibrações de dobramento de ligação entre Al-OH (d + s) em 2.200 nm. Portanto, como a montmorrillonita possui ainda água na sua constituição, duas fortes bandas de absorção estão também presentes em 1.900 nm e em 1.400 nm. Quando a banda de absorção da água, próxima de 1.900 nm, for fraca indica presença de água molecular absorvida na caulinita (Madeira Netto e Baptista, 2000; Madeira Netto, 2001) (Figura 8).

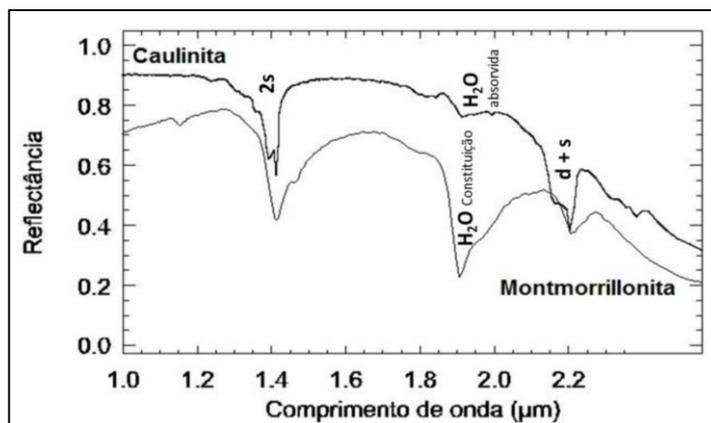


Figura 8. Espectros de reflectância da caulinita ($\text{Al}_2\text{SiO}_5(\text{OH})_4$) e da montmorrillonita ($(\text{Al}, \text{Mg})_2 - 3 \text{Si}_4\text{O}_{10} (\text{OH})_2 \cdot n\text{H}_2\text{O}$), ambos apresentando feição espectral a 1.900 nm, não associada e associada à presença da água estrutural na faixa do NIR, respectivamente. 2s = harmônica de alongamento de OH em 1.400 nm; d + s = dobramento e alongamento entre Al-OH em 2.200 nm. Fonte: Clark et al. (1993).

Diante do exposto, pode-se concluir que a existência das bandas de absorção, em 1.400 nm e 1.900nm, é sinônimo de presença de moléculas de água dissociadas da estrutura do mineral em alguma forma, como a água de hidratação (absorvida ou adsorvida na superfície dos cristais) sem interferência estrutural; ou água capturada no espaço cristalino (inclusões), como ocorre com os minerais hidratados.

Em compensação, solos que foram submetidos a forte intemperismo, como os Latossolos, podem apresentar grande quantidade de gibbsita ($\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$). As suas feições

espectrais (Figura 9) são devidas às vibrações moleculares do grupo OH. No NIR, a gibbsita apresenta vibrações moleculares harmônicas (2s) próximas de 1.550 nm e combinações do tipo d + s próximas a 2.300 nm. Diferem das bandas de absorção da água que se apresentam em 1.400 nm (2s) e em 1.900 nm (d + s).

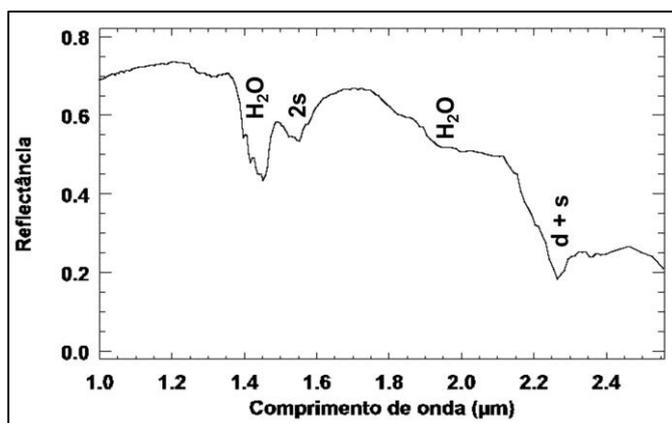


Figura 9. Feições de absorção de uma amostra de gibbsita (WS214 da biblioteca espectral do USGS - Clark et al. (1993) proveniente de Minas Gerais, Brasil.

II.3.2.6. Umidade do solo

A umidade afeta a reflectância do solo por causa das bandas de absorção da água, centradas em 760, 970, 1.190, 1.450 e 1.940 nm (Curcio e Petty, 1951), e provoca diminuições na intensidade de reflectância (devido ao escurecimento dos solos) ao longo de todos os intervalos espectrais (Madeira Netto e Baptista, 2000) (Figura 10). Essas bandas de absorção são devidas às vibrações de alongamento e dobramento de OH e suas combinações.

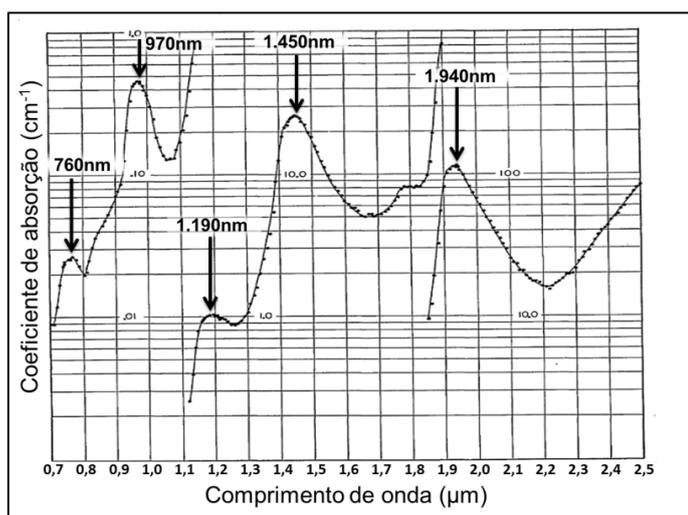


Figura 10. Coeficiente de absorção da água a 20° C. As regiões de máxima absorção ocorrem a 760, 970, 1190, 1.450 e 1.940 nm. Uma pequena banda de absorção é evidente pela ombreira da curva próxima a 850 nm. Fonte: Adaptado de Curcio e Petty (1951).

É importante destacar que o umedecimento do solo não provoca mudança na forma geral da curva espectral, mas ocasiona uma diminuição da reflectância global (Figura 11).

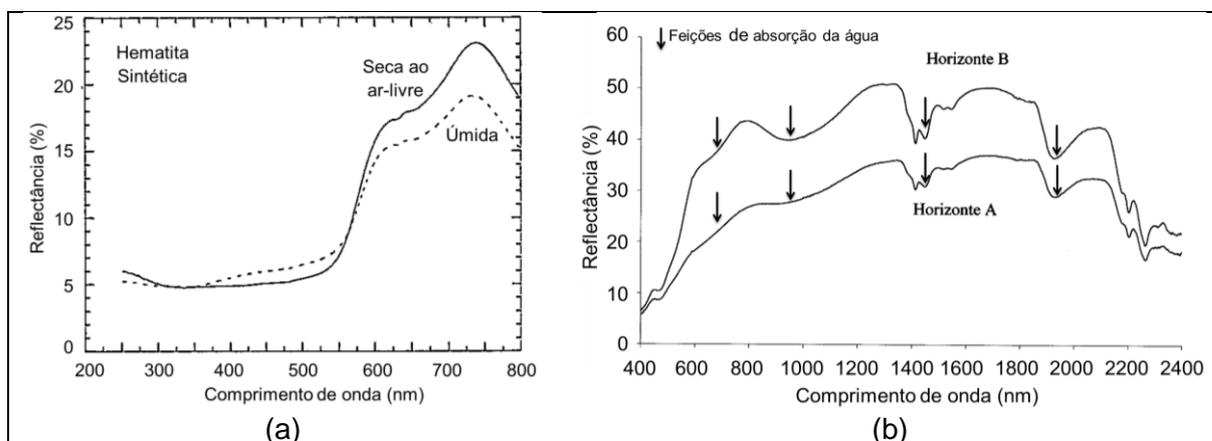


Figura 11. Curvas espectrais de amostras de solo com diferentes conteúdos de umidade. a) Espectro da hematita sintética (Fe_2O_3) seca ao ar livre e úmida. Fonte: Adaptado de Bedidi et al. (1992). b) Espectros dos horizontes A e B de um Latossolo Amarelo ácrico típico, mostrando as feições de absorção da água, centradas em 760, 970, 1.450 e 1.940 nm. Fonte: Adaptado de Dalmolin et al. (2005).

Ademais, é possível estimar o conteúdo de umidade de solos, medindo a intensidade das bandas de absorção da água. Basicamente, as intensidades das absorções são calculadas pela diferença entre a reflectância máxima entre as duas absorções e as reflectâncias nos pontos de mínimas. Para isto, emprega-se a feição centrada em 1.450 nm, que é a mais sensível, com relação linear entre a intensidade dessa banda de absorção e o teor de água nos solos (Bowers e Smith, 1972). Quanto mais profunda é a banda de absorção, maior é o teor de água presente (Madeira Netto, 2001).

Por outro lado, o efeito do escurecimento ocasionado pela umidade nos solos é devido às reflexões totais dentro do fino filme de água higroscópica que recobre as partículas de solo. Assim, uma porção da energia não seria refletida para o espaço, e sim seria re-refletida entre a superfície da partícula e a superfície do filme de água. Essa diferença de reflectância entre seus estados, seco e úmido, poderia ser determinada se alguns fatores fossem levados em conta. Em primeiro lugar, variações no índice de refração devidas aos constituintes do solo dissolvidos; em segundo lugar, mudanças na natureza física das partículas do solo pela presença da água; e finalmente, similaridades nos índices de refração da água e do solo (Epiphanyo et al., 1992).

Enfim, pode-se dizer que a reflectância total por comprimento de onda (λ) para um dado solo seco, sem matéria orgânica e sem óxidos de ferro, é função da média da *energia especular refletida* pelas superfícies das partículas do solo e da *reflectância do volume* do solo advinda dos espalhamentos internos (Jensen, 2009) (Figura 12).

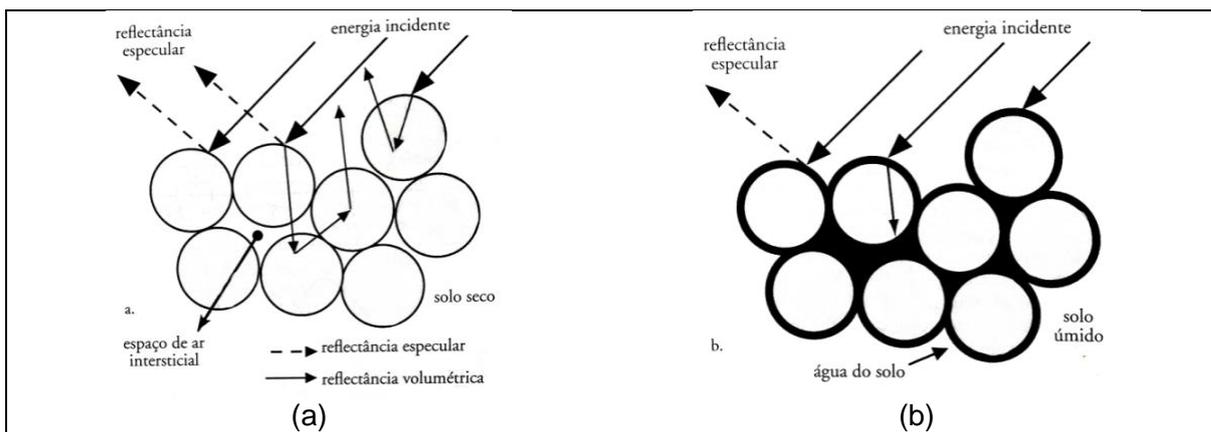


Figura 12. Interação da radiação eletromagnética solar com solo seco (a) e solo úmido (b).
 Fonte: Jensen (2009).

A figura 12 expõe um claro exemplo da interação da REM com o solo. Por um lado, sobre o solo seco (Figura 12-a), a energia radiante incidente pode ser refletida pela superfície do solo ou pode penetrar para dentro das partículas de solo, onde ela pode ser absorvida ou espalhada. Por outro lado, no solo úmido (Figura 12-b), à medida que a umidade aumenta, cada partícula pode ser encapsulada por uma fina membrana de água capilar e, como resultado, os espaços de ar intersticial podem ser preenchidos com água. Portanto, quanto mais fina a textura, maior é a capacidade do solo em manter um alto conteúdo de umidade, quando ocorrem precipitações; e quanto maior é a umidade do solo, maior será a absorção de energia radiante incidente e, deste modo, menor será a quantidade de energia eletromagnética refletida (Jensen, 2009).

II.4. Espectroscopia de reflectância laboratorial

A espectroscopia de reflectância tem sido utilizada na Ciência do Solo desde os anos 50 e 60 (Brooks, 1952; Bowers e Hanks, 1965). No entanto, apenas nos últimos 20 anos, muito provavelmente coincidindo com o estabelecimento da quimiometria e técnicas de estatística multivariada em análises químicas, que sua utilidade e importância foram destacadas (Viscarra Rossel et al., 2008).

Considera-se que o espectro de reflectância óptico do solo, do visível ao infravermelho de ondas curtas (350-2.500 nm), é rico em informações. Portanto, constitui uma propriedade integradora do solo que mede a sua cor, a abundância de óxidos de ferro, minerais de argila e os carbonatos, a quantidade de água e material orgânico e o tamanho das partículas (Viscarra Rossel e Webster, 2011).

Meneses (2001) comentou que a importância da espectroscopia de solos, tanto em condições de campo quanto em laboratório, pode auxiliar na interpretação das imagens de satélite, visando diferenciar e quantificar os tipos de solos, sua composição mineral e orgânica e propriedades texturais por meio das curvas de reflectância.

A espectroscopia compõe uma das mais importantes, senão a mais fundamental área do conhecimento do sensoriamento remoto. Este último pode ser definido como uma técnica de aquisição de dados dos objetos existentes na superfície terrestre, sem que haja contato físico direto entre o sensor e o objeto (Meneses, 2001).

De acordo com Jensen (2009), os sistemas sensores podem ser divididos em dois grupos: imageadores e não-imageadores. O primeiro grupo é aquele que fornece como produto uma imagem do alvo observado (por exemplo, o sensor TM do Landsat 5). O segundo grupo, constituído por radiômetros ou espectrorradiômetros (por exemplo, o *FieldSpec® Pro*), apresentam o resultado em forma de dígitos ou gráficos.

Os espectrorradiômetros possuem elevada resolução espectral, reunindo centenas de bandas com FMHW (largura completa na metade do máximo) de 1 a 3 nm, e intervalo de amostragem espectral (espaçamento entre pontos) de 1 a 2 nm, conferindo assim, alto potencial para a discriminação de qualquer tipo de material da superfície terrestre (Meneses e Ferreira Júnior, 2001; Jensen, 2009).

A medida de reflectância pode ser obtida por espectrorradiômetros, mediante a razão entre, a radiância refletida que deixa a superfície do objeto, calculada para cada comprimento de onda, e a irradiância incidente, vinda da lâmpada, medidas pelos detectores no interior do instrumento. Os elementos de dispersão (filtros, prismas ou grades) colocados dentro dos espectrorradiômetros decompõem a energia incidente em diferentes comprimentos de onda, possibilitando medir a resposta do solo de maneira contínua ao longo do espectro eletromagnético, fornecendo assim, um conjunto de dados numéricos ou gráficos conhecidos como curvas ou assinaturas espectrais (Meneses, 2001; Miguel, 2005).

Tais assinaturas podem ser obtidas na faixa de 400 a 2.500 nm, englobando todo o espectro óptico refletido, trazendo consigo as feições de absorção que são função direta da composição química e física do objeto, resultado da interação da REM com as moléculas e átomos dos materiais (Meneses, 2001; Dalmolin et al., 2005).

Desta maneira, podemos conhecer, em laboratório, o comportamento espectral de um objeto, com total controle da intensidade e geometria da iluminação (tais como ângulo de incidência e potência do fluxo incidente), bem como da configuração da geometria do sensor (altura e ângulo de visada) e dos efeitos atmosféricos (temperatura e vapor d'água). Geralmente, a amostra de solo é preparada para melhorar e padronizar a detecção da substância-alvo (peneirada para a obtenção da Terra Fina Seca ao Ar-TFSA e acondicionada em placas de petri) (Novo, 2010).

Com o surgimento da espectroscopia de reflectância laboratorial, o conceito de criação de bibliotecas de reflectância espectral consolidou-se no âmbito das aplicações do sensoriamento remoto moderno. Os espectros de diferentes alvos, contidos nessas bibliotecas, podem ser utilizados como referências para a identificação e discriminação dos

materiais da superfície terrestre presentes nas imagens de satélites (Galvão, 2001a). Desta forma, a possibilidade de comparação entre imagens e espectros é o princípio de operações das técnicas de classificação espectral atualmente disponíveis. por exemplo, o modelo *Spectral Mixture Analysis* (SMA) e *Multiple Endmember Spectral Mixture Analysis* (MESMA) (Galvão, 2001b).

II.5. O sistema Landsat

Em 1967, a *National Aeronautics and Space Administration* (NASA), encorajada pelo Ministério do Interior americano, iniciou o programa denominado *Earth Resources Technology Satellite* (ERTS) que, em 1975, foi rebatizado para *Land Remote Sensing Satellite* (Landsat). Esse programa resultou no lançamento de oito satélites com uma diversidade de sistemas de sensoriamento remoto, construídos para adquirir informações dos recursos da Terra (Jensen, 2009).

A série de satélites Landsat, que começou em 1972, fornece o maior registro contínuo de dados de sensoriamento remoto para monitoramento e gerenciamento dos recursos terrestres ao longo do tempo (NASA, 2009).

A partir destes satélites (Tabela 2) são fornecidos dados que têm sido utilizados em estudos pedológicos de maneira indireta, procurando-se relacionar os atributos das classes de solos aos atributos da imagem, caracterizadores das unidades da paisagem (Madeira Netto et al., 1993a).

Tabela 2. Informações gerais sobre cada satélite Landsat. Adaptado de Chander et al. (2009) e USGS (2013).

Satélite	Sensor	Lançamento	Desativação	Altitude media (km)	Período orbital (min)	Resolução Temporal (dias)	Cruzamento pelo equador(am)
L1	RBV/MSS	23/07/1972	06/01/1978	920	103,34	18	9:30
L2	RBV/MSS	22/01/1975	27/07/1983	920	103,34	18	9:30
L3	RBV/MSS	05/03/1978	07/09/1983	920	103,34	18	9:30
L4	MSS/TM	16/07/1982	15/06/2001	705	98,20	16	9:45
L5	MSS/TM	01/03/1984	05/06/2013	705	98,20	16	9:45
L6	ETM	05/10/1993	Não alcançou a órbita				
L7	ETM+	15/04/1999	Operacional	705	98,20	16	10
L8	OLI/TIRS	11/02/2013	Operacional	705	98,20	16	10

L= Landsat.

Os satélites Landsat podem ser classificados em quatro grupos, com base nas características dos sensores e das plataformas.

O primeiro grupo é composto pelo Landsat 1 (L1), Landsat 2 (L2) e Landsat 3 (L3), com o sensor *Multispectral Scanner* (MSS) e a câmera *Return Beam Vidicon* (RBV) (Tabela 3). A resolução espacial do sensor MSS era de aproximadamente 79 m (mas muitas vezes

era transformada para tamanho de pixel de 60 m), com quatro bandas que variam desde o comprimento de onda do visível (VIS) ao infravermelho próximo (NIR). No L3, o sensor MSS incluía uma quinta banda no comprimento de onda do infravermelho termal (TIR), com um intervalo espectral de 10.400 a 12.600 nm (Chander et al., 2009).

O segundo grupo inclui o Landsat 4 (L4) e o Landsat 5 (L5), que carregavam o sensor *Thematic Mapper* (TM) (Tabela 3), bem como o MSS, sobre a plataforma *Multimission Modular*. Esta segunda geração de satélites Landsat marcou um avanço significativo em sensoriamento remoto, por meio da adição de um sensor mais sofisticado, melhor aquisição e transmissão de dados, com processamento de dados mais rápido e altamente automatizado. O sensor MSS foi incluído para dar continuidade com as missões Landsat anteriores, mas os dados TM rapidamente tornaram-se a principal fonte de informação utilizada a partir desses satélites. Isso resulta da melhor qualidade de dados (espaciais, espectrais, radiométricos e geométricos) que esse sensor oferece, reforçando o desempenho de dados do MSS. Ademais, o sensor TM apresentava uma resolução espacial de 30 m para as seis faixas refletivas do VIS ao infravermelho de ondas curtas (SWIR), e de 120 m para a banda no TIR (Chander et al., 2009) (Figura 13).

O terceiro grupo é composto pelo Landsat 6 (L6) e Landsat 7 (L7), que incluem os sensores *Enhanced Thematic Mapper* (ETM) e o *Enhanced Thematic Mapper Plus* (ETM+) (Tabela 3), respectivamente. Sensores MSS não foram incluídos nestes satélites. Cabe ressaltar que o Landsat 6 falhou no lançamento e saiu de órbita sem conseguir produzir nenhum dado. Destaca-se que o sensor ETM+ do L7 apresentava uma resolução espacial de 30 m para as seis bandas refletivas do VIS, NIR e SWIR, 60 m para a banda no TIR e incluía uma banda pancromática (PAN) com uma resolução espacial de 15 m (Chander et al., 2009; NASA, 2009) (Figura 13).

O quarto grupo, integrado pelo *Landsat Data Continuity Mission* (LDCM), designado de Landsat 8 (L8), garante a aquisição contínua e a disponibilidade de dados Landsat atualizados. O L8 carrega dois sensores de varredura eletrônica (*push-broom*): o *Operational Land Imager* (OLI) e o *Thermal Infrared Sensor* (TIRS) (Tabela 3), os quais fornecem dados com melhor relação sinal-ruído e 12-bit de resolução radiométrica. O sensor OLI, coleta dados em nove bandas refletivas no intervalo espectral do VIS, NIR e SWIR, com uma resolução espacial de 30 m e de 15 m para a banda PAN. Também inclui duas novas bandas mais refinadas, a banda ultra Azul, para estudos de águas costeiras e aerossóis, e a banda Cirrus, para detecção de nuvens. O sensor TIRS, captura dados em duas bandas termais de onda longa, com resolução de 100 m, sincronizado com o sensor OLI para entregar os dados como um único produto. Os produtos do OLI e do TIRS são entregues com uma resolução radiométrica de 16 bits (USGS, 2013, 2015; Roy et al., 2014) (Figura 13).

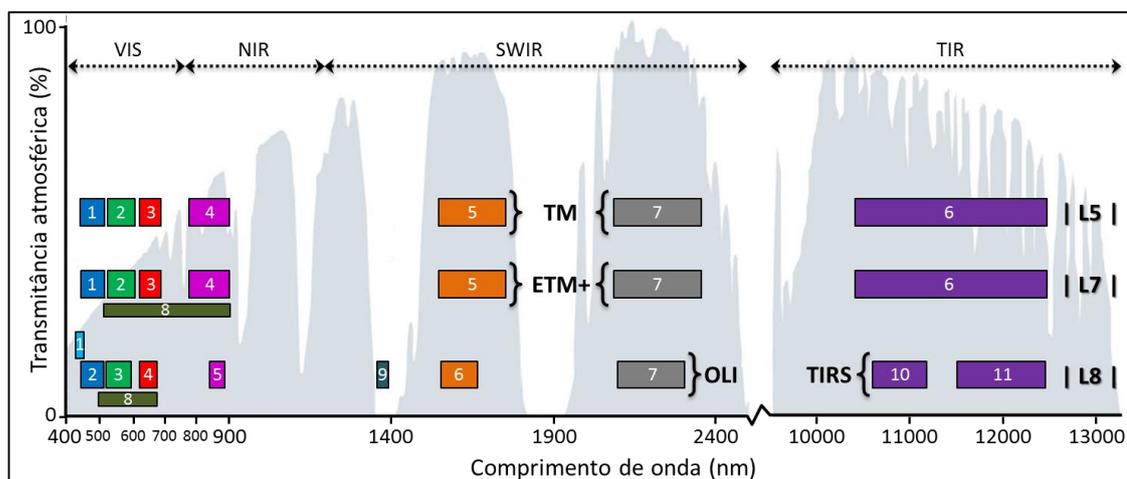


Figura 13. Comparação das posições das bandas espectrais dos sensores TM, ETM+, OLI e TIRS dos satélites Landsat 5, 7 e 8 e a transmissância da atmosfera. Adaptado de USGS (2015).

Tabela 3. Características dos instrumentos imageadores multiespectrais do sistema Landsat. Adaptado de Richards e Jia (2006) e Roy et al. (2014).

Sensor	Bandas espectrais	Resolução espectral (nm)		Resol. Espacial IFOV (m)	Resol. Radiom. (Bits)
RBV	1	475 – 575	Azul	79 x 79	
	2	580 – 680	Vermelho	79 x 79	
	3	689 – 830	NIR	79 x 79	
		505 – 750	PAN	40 x 40	
MSS	4	500 – 600	Verde	79 x 79	7
	5	600 – 700	Vermelho	79 x 79	7
	6	700 – 800	NIR	79 x 79	7
	7	800 – 1100	NIR	79 x 79	6
TM	8	10400 – 12600	TIR	237 x 237	
	1	450 – 520	Azul	30 x 30	8
	2	520 – 600	Verde	30 x 30	8
	3	630 – 690	Vermelho	30 x 30	8
ETM+	4	760 – 900	NIR	30 x 30	8
	5	1550 – 1750	SWIR	30 x 30	8
	7	2080 – 2350	SWIR	30 x 30	8
	6	10400 – 12500	TIR	120 x 120	8
	1	450 – 515	Azul	30 x 30	8
	2	525 – 605	Verde	30 x 30	8
	3	630 – 690	Vermelho	30 x 30	8
	4	775 – 900	NIR	30 x 30	8
OLI	5	1550 – 1750	SWIR	30 x 30	8
	7	2090 – 2350	SWIR	30 x 30	8
	6	10400 – 12500	TIR	60 x 60	8
	8	520 – 900	PAN	15 x 15	8
TIRS	10				
	11				

Continuação Tabela 3.

Sensor	Bandas espectrais	Resolução espectral (nm)		Resol. Espacial IFOV (m)	Resol. Radiom. (Bits)
OLI	1	435 – 451	Azul Costal	30 x 30	16
	2	452 – 512	Azul	30 x 30	16
	3	533 – 590	Verde	30 x 30	16
	4	636 – 673	Vermelho	30 x 30	16
	5	851 – 879	NIR	30 x 30	16
	6	1566 – 1651	SWIR-1	30 x 30	16
	7	2107 – 2294	SWIR-2	30 x 30	16
	8	503 – 676	PAN	15 x 15	16
	9	1363 – 1384	Cirrus	30 x 30	16
TIRS	10	10600 – 11190	TIR-1	100 x 100	16
	11	11500 – 12510	TIR-2	100 x 100	16

NIR= *Near Infrared*; SWIR= *Short Wave Infrared*; TIR= *Thermal Infrared*; PAN= *Panchromatic*.IFOV= *Instantaneous Field of View*.

II.6. Bibliotecas espectrais de solos

O conhecimento do comportamento espectral dos solos é fator de importância para que os produtos de sensores remotos possam ser utilizados de maneira mais eficiente. Deste modo, o uso de sensores terrestres na obtenção de dados espectrais de solos tem possibilitado a caracterização desses e o avanço de técnicas de quantificação de seus atributos. Para isso, a elaboração de bibliotecas espectrais regionais de solos se faz necessária (Bellinaso et al., 2010).

As bibliotecas espectrais tiveram início na década de 80 com Stoner et al. (1980), com solos dos Estados Unidos. Em seguida, vários trabalhos científicos foram publicados sobre o tema. No Brasil, a primeira biblioteca foi elaborada pelo grupo de pesquisadores do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), em 1992 (Epiphanio et al., 1992).

A primeira iniciativa de elaboração de uma Biblioteca Espectral do Brasil (BESB) foi realizada no Departamento de Ciência do Solo da Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz" (ESALQ/USP). Foi iniciada em 1995, idealizada no formato colaborativo de instituições de pesquisa, universidades e outros, cujo intuito é a montagem de uma biblioteca espectral que melhor represente os solos do território brasileiro. Atualmente, esta biblioteca conta com dados de 12 Estados do Brasil, totalizando 5.500 amostras de solo, na faixa espectral do VIS ao SWIR (350 a 2.500 nm). Trata-se de uma quantidade não representativa do Brasil, havendo necessidade de reunir mais dados de solos (LSO/ESALQ/USP, 2015).

Atualmente, está clara a importância do tema, fato comprovado pelos movimentos internacionais que estão desenvolvendo suas bibliotecas espectrais de solos em grande escala:

- Shepherd e Walsh (2002): 1.000 amostras do leste e sul da África;
- Brown et al. (2006): 3.768 amostras dos EUA e 400 do resto do mundo;
- ICRAF/ISRIC (2010): 4.436 amostras de 785 perfis de solo distribuídos através dos cinco continentes;
- Rossel e Webster (2012): 21.500 amostras de 4.000 perfis da Austrália;
- Stevens et al. (2013): banco de dados LUCAS, contendo 20.000 amostras coletadas em mais de 23 países da União Europeia.
- Estados Unidos (2013): 144.833 amostras em 6.017 locais dos Estados Unidos de América (EUA);
- Bibliotecas espectrais Regionais/Nacionais:
 - Brasil (Bellinaso et al., 2010): 233 amostras;
 - Florida (Vasques et al., 2010): 7.120 amostras;
 - República Tcheca (Brodský et al., 2011): mais de 500 amostras;
 - França (Gogé et al., 2012): 2.200 amostras;
 - Dinamarca (Knadel et al., 2012): 2.851 amostras;
 - China (Shi et al., 2014): 1.581 amostras.
- Bibliotecas espectrais locais e bibliotecas espectrais feitas para um objetivo específico de investigação são incalculáveis.

III. HIPÓTESE

A hipótese levantada neste trabalho é a de que o levantamento de uma série histórica de imagens do satélite Landsat 5 TM, com distribuição diferenciada de solos expostos permite a geração de uma imagem composta com a maior proporção de solos expostos ao longo da Bacia do Rio Jardim. A elaboração de uma biblioteca espectral das principais classes de solos de ocorrência nesta área permitirá a individualização dos solos por meio de processamento espectral no programa ENVI (Shimabukuro e Smith, 1991; Kruse et al., 1993). Se a metodologia alcançar boa validação, poderá ser utilizada para a geração do mapa digital de solos da área de estudo e poderá ser extrapolada para todo o DF.

IV. OBJETIVOS

IV.1. Objetivo Geral

O objetivo principal deste trabalho é a individualização de solos da Bacia do Rio Jardim, no Distrito Federal, por meio de técnicas de sensoriamento remoto e biblioteca espectral de solos.

IV.2. Objetivos específicos

- Gerar uma imagem composta de solos expostos da área de estudo, a partir de uma série histórica de imagens do satélite Landsat 5 TM contemplando a maior área possível de solos expostos, por meio de metodologias de sensoriamento remoto;
- Caracterizar as principais classes de solos de ocorrência na área de estudo, por meio de atividades de campo e laboratoriais;
- Obter curvas espectrais das principais classes de solos por meio do sensor terrestre *FieldSpec® Pro* e gerar biblioteca espectral dos solos estudados, e
- Gerar o mapa digital de solos da área de estudos.

V. JUSTIFICATIVA

A Bacia do Rio Jardim é considerada a maior e mais importante região produtora de alimentos do DF, com registro de altos índices de produtividade que resultam no uso variado e intensivo dos seus solos. Estas atividades estão em constante expansão, por vezes sem planejamentos adequados de uso e ocupação das terras, podendo originar problemas ambientais (Carvalho e Lacerda, 2007; Campos et al., 2011).

Nesta área, os levantamentos pedológicos disponíveis estão em escalas de pouco detalhamento (1:100.000 e 1:50.000), sendo, portanto, não adequados para subsidiar projetos de planejamentos, de desenvolvimento e de ocupação agrícolas locais, além das medidas de preservação ambientais que são necessárias.

A população humana encontra-se em contínuo e rápido crescimento, com consumidores cada vez mais exigentes por alimentos de qualidade e pela conservação ambiental, intensificando assim a pressão sobre o uso dos solos. Por essa razão, se torna evidente a importância de se contar com solos utilizados com manejos adequados para a geração de alimentos em quantidade e qualidade, respeitando o meio ambiente.

Em países como Dinamarca (pequena extensão territorial) e Estados Unidos (grande extensão territorial), os solos já estão totalmente mapeados em escalas de detalhamento, 1:5.000 ou maiores e 1:10.000, respectivamente. Portanto, é urgente que o Brasil invista no conhecimento maior de seus solos para alcançar alguns desafios globais, como a segurança alimentar, a produção de bioenergia, as mudanças climáticas e a própria sustentabilidade da agricultura brasileira. Não se pode planejar o uso das terras, realizar zoneamentos e definir políticas públicas para a agricultura, sem o conhecimento atualizado do recurso solo, que juntamente com a água, devem fazer parte da agenda brasileira de prioridades para o setor produtivo e ambiental.

Tendo em vista o exposto, fica evidente a necessidade de se obter uma base de mapas pedológicos em escalas de detalhamento maiores que os mapeamentos existentes do DF,

que sirvam como instrumento de suporte e orientação para o planejamento do uso dos solos e ações promotoras de sustentabilidade da Bacia do Rio Jardim, DF. Desse modo, este trabalho objetiva a individualização dos solos e elaboração de mapas de solos da área de estudo, em escala de detalhamento, para atender as demandas crescentes de uso sustentável dos solos, possibilitando assim o desenvolvimento da economia local e regional.

Para tal, serão utilizadas técnicas de sensoriamento remoto, consideradas eficientes, as quais são menos onerosas, em termos de custos e tempo gastos, em relação às metodologias tradicionais de levantamento e mapeamento de solos. Portanto, pode-se dizer que estas técnicas potencializam a capacidade em conhecer a distribuição espacial dos solos, por possibilitar que um volume maior de informações sobre os fatores de formação do solo seja processado de forma rápida e automatizada.

Finalmente, os dados pedológicos gerados também serão uma fonte de informações para o desenvolvimento de diversos trabalhos de pesquisa, particularmente o estabelecimento de técnicas de manejos dos solos mais adequados, contribuindo para a sustentabilidade destes, da água e do clima.

VI. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AZEVEDO, A. C.; DALMOLIN, R. S. D. **Solos e ambiente: uma introdução**. Santa Maria, RS: Palottii, 2004.
- BAPTISTA, G. M. DE M.; MENESES, P. R. Identificação de sesquióxidos de ferro da fração argila de solos tropicais por meio de decomposição espectral linear dos dados do sensor AVNIR-2 do sistema ALOS. In: Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, 17, 2009, Natal. **Anais...** Natal, 2009 p. 7655–7662.
- BARBOSA, I. O.; LACERDA, M. P. C.; BILICH, M. R. Relações pedomorfogeológicas nas chapadas elevadas do Distrito Federal. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 33, p. 1373–1383, 2009.
- BARBOSA, I. O.; LACERDA, M. P. C.; ROLIM BILICH, M. Soils distribution model based on relation between geology, geomorphology and pedology, at the High Plateau of Distrito Federal, Brazil. **Revista de la Asociación Geológica Argentina**, v. 66, n. 4, p. 569–575, 2010.
- BEDIDI, A.; CERVELLE, B.; MADEIRA NETTO, J. S.; POUGET, M. Moisture effects on visible spectral characteristics of lateritic soils. **Soil Science**, v. 153, n. 2, 1992.
- BEHRENS, T.; SCHOLTEN, T. Digital soil mapping in Germany—a review. **Journal of Plant Nutrition and Soil Science**, v. 169, p. 434–443, 2006. Disponível em: <<http://doi.wiley.com/10.1002/jpln.200521962>>.
- BELLINASSO, H. **Biblioteca espectral de solos e sua aplicacao na quantificacao de atributos e classificacao**. 2010. 264 p. Dissertação (Mestrado em Solos e Nutrição de Plantas). Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz. Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2009.

- BELLINASO, H.; DEMATTÊ, J. A. M.; ROMEIRO, S. A. Soil Spectral Library and its Use in Soil Classification. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 34, p. 861–870, 2010.
- BEN-DOR, E.; TAYLOR, R. G.; HILL, J.; DEMATTÊ, J. A. M.; WHITING, M. L.; CHABRILLAT, S.; SOMMER, S. Imaging Spectrometry for Soil Applications. **Advances in Agronomy**, v. 97, p. 321–392, 2008.
- BOETTINGER, J. L.; HOWELL, D. W.; MOORE, A. C.; HARTEMINK, A. S.; KIENAST-BROWN, S. **Digital soil mapping; bridging research, environmental application and operation**. New York: Springer, 2010. 433 p.
- BORGES, V. P.; OLIVEIRA, A. S.; SILVA, B. B. Mapeamento e quantificação de parâmetros biofísicos e radiação líquida em área de algodoeiro irrigado. **Ciência e Agrotecnologia**, v. 34, p. 485–493, 2010.
- BOTELHO, M. R.; DALMOLIN, R. S. D.; PEDRON, F. DE A.; AZEVEDO, A. C.; RODRIGUES, R. B.; MIGUEL, P. Medida da cor em solos do Rio Grande do Sul com a carta de Munsell e por colorimetria. **Ciência Rural**, v. 36, n. 4, p. 1179–1185, 2006.
- BOWERS, S. A.; HANKS, R. J. Reflection of radiant energy from soils. **Soil Science**, v. 100, n. 2, p. 130–138, 1965.
- BOWERS, S. A.; SMITH, S. J. Spectrophotometric Determination of Soil Water Content. In: Soil Science Society of America, 36, 1972, Madison. **Proceedings...** Madison, p. 978-980, 1972.
- BRADY, N. C.; WEIL, R. R. **The Nature and Properties of Soils**. 14. ed. [S.l.]: Pearson Education, Limited, 2013. p 1050
- BREIMER, R. F.; KEKEM, A. J. VAN; REULER, H. VAN. **Guidelines for soil survey and land evaluation in ecological research**. v. 22. Paris: UNESCO, 1986. 124 p.
- BRODSKÝ, L.; KLEMENT, A.; PENÍŽEK, V.; KODEŠOVÁ, R.; BORŮVKA, L. Building Soil Spectral Library of the Czech Soils for Quantitative Digital Soil Mapping. **Soil and Water Research**, v. 6, p. 165–172, 2011. Disponível em: <<http://agriculturejournals.cz/publicFiles/51680.pdf>>.
- BROOKS, F. A. Atmospheric radiation and its reflection from the ground. **Journal of Meteorology**, v. 9, n. 1, p. 41–52, 1952.
- BROWN, D. J.; SHEPHERD, K. D.; WALSH, M. G.; MAYS, M. D.; REINSCH, T. G. Global soil characterization with VNIR diffuse reflectance spectroscopy. **Geoderma**, v. 132, n. 3–4, p. 273–290, 2006.
- BUOL, S. W.; HOLE, F. D.; MCCracken, R. J. **Soil genesis and classification**. 3. ed. Iowa: Wiley-Blackwell, 1989. 416 p.
- CAMPOS, P. M.; LACERDA, M. P. C.; BILICH, M. R.; ALMEIDA PAPA, R.; SILVA, R. A. B. Adequabilidade do Uso Agrícola das Terras no Núcleo Rural do PAD/DF. In: Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, 15, 2011. Curitiba. **Anais...** Curitiba, INPE, p. 0507–0513, 2011. Disponível em: <<http://www.dsr.inpe.br/sbsr2011/files/p0173.pdf>>.
- CAMPOS, R. C.; DEMATTÊ, J. A. M. Cor do solo: uma abordagem da forma convencional de obtenção em oposição à automatização do método para fins de classificação de solos. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 28, p. 853–863, 2004.

- CARVALHO, F. A.; LACERDA, M. P. C. Caracterização da adequação do uso agrícola das terras no Distrito Federal. In: Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, 13, 2007, Florianópolis. **Anais...** Florianópolis, INPE, 2007. p. 111–117.
- CATEN, A. TEN; DALMOLIN, R. S. D.; PEDRON, F. DE A.; SANTOS, M. DE L. M. Componentes principais como preditores no mapeamento digital de classes de solos. **Ciência Rural**, v. 41, p. 1170–1176, 2011.
- CHANDER, G.; MARKHAM, B. L.; HELDER, D. L. Summary of current radiometric calibration coefficients for Landsat MSS, TM, ETM+, and EO-1 ALI sensors. **Remote Sensing of Environment**, v. 113, p. 893–903, 2009.
- CHANG, C.-W.; LAIRD, D. A.; MAUSBACH, M. J.; HURBURGH, C. R. Near-Infrared Reflectance Spectroscopy–Principal Components Regression Analyses of Soil Properties. **Digital Repository @ Iowa State University**, p. 480–490, 2001. Disponível em: <<https://dl.sciencesocieties.org/publications/sssaj/abstracts/65/2/480>>.
- CLARK, R. N.; SWAYZE, G. A.; GALLAGHER, A.; KING, T.; CALVIN, W. **The US Geological Survey digital spectral library: Version 1 (0.2 to 3.0 µm)**. [S.l.]: USGS. p. 93-592, 1993. Disponível em: <<http://speclab.cr.usgs.gov/>>.
- CLINE, M. G. Basic Principles Of Soil Classification. **Soil Science**, v. 67, n. 2, p. 81–92, 1949.
- 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**, v. 155, n. 4, 1993.
- CURCIO, J. A.; PETTY, C. C. The Near Infrared Absorption Spectrum of Liquid Water. **Journal of the Optical Society of America**, v. 41, n. 5, p. 302, 1951. Disponível em: <<http://www.opticsinfobase.org/abstract.cfm?URI=josa-41-5-302>>.
- DALMOLIN, R. S. D.; GONÇALVES, C. N.; KLAMT, E.; DICK, D. P. Relação entre os constituintes do solo e seu comportamento espectral. **Ciência Rural**, v. 35, p. 481–489, 2005.
- DANIELS, R. B.; GAMBLE, E. E.; CADY, J. G. The Relation Between Geomorphology and Soil Morphology and Genesis. **Advances in Agronomy**. Raleigh, North Carolina: Academic Press, 1971. v. Volume 23. p. 51–88. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0065211308601509>>.
- DEMATTÊ, J. A. M. Characterization and discrimination of soils by their reflected electromagnetic energy. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 37, p. 1445–1458, 2002.
- DEMATTÊ, J. A. M.; CAMPOS, R. C.; ALVES, M. C.; FIORIO, P. R.; NANNI, M. R. Visible-NIR reflectance: A new approach on soil evaluation. **Geoderma**, v. 121, p. 95–112, 2004.
- 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**, v. 23, p. 343–355, 1999.
- DNPM - DEPARTAMENTO NACIONAL DE PRODUÇÃO MINERAL. **Projeto RADAMBRASIL. Mapas Exploratórios de Solo, escala 1:1.000.000**. Brasil, 1975.

- DOBOS, E.; HENGL, T. Soil Mapping Applications. In: TOMISLAV, H.; HANNES, I.; REUTER, B. T. (Org.). **Developments in Soil Science**. 33. ed. [S.l.]: Elsevier, 2009. p. 461–479.
- EMBRAPA – EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA – SERVIÇO NACIONAL DE LEVANTAMENTO E CONSERVAÇÃO DE SOLOS. **Levantamento de reconhecimento dos solos do Distrito Federal**. Rio de Janeiro, RJ: Embrapa-SNLCS, 1978.
- EMBRAPA – EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA – SERVIÇO NACIONAL DE LEVANTAMENTO E CONSERVAÇÃO DE SOLOS. **Procedimentos normativos de levantamentos pedológicos**. Rio de Janeiro, RJ: Embrapa-SPI, 1995.
- EMBRAPA – EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. CENTRO NACIONAL DE PESQUISAS DE SOLOS. **Sistema Brasileiro de Classificação de Solos**. 3. ed. Brasília: Embrapa-CNPq, 2013.
- EPIPHANIO, J. C. N.; FORMAGGIO, A. R.; VALERIANO, M. M.; OLIVEIRA, J. B. **Comportamento espectral de solos do Estado de São Paulo**. INPE: São José dos Campos, SP, 1992. 132 p.
- ESTADOS UNIDOS. DEPARTMENT OF AGRICULTURE. SOIL SURVEY DIVISION. SOIL CONSERVATION SERVICE. SOIL SURVEY STAFF. 2013. **NRCS Rapid Carbon Assessment**. Disponível em: <http://www.nrcs.usda.gov/wps/portal/nrcs/detail/soils/survey/?cid=nrcs142p2_054164>. Acesso em: 10 jul. 2015.
- ESTADOS UNIDOS. DEPARTMENT OF AGRICULTURE. SOIL SURVEY DIVISION. SOIL CONSERVATION SERVICE. SOIL SURVEY STAFF. Soil and Soil Survey. In: SOIL CONSERVATION SERVICE (Org.). **Soil Survey Manual**. 18. ed. Estados Unidos: US Department of Agriculture Washington, DC, 1993. p. 1–10.
- FERNANDES, R. B. A.; BARRÓN, V.; TORRENT, J.; FONTES, M. P. F. Quantificação de óxidos de ferro de Latossolos brasileiros por espectroscopia de refletância difusa. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 28, n. 2, p. 245–257, 2004.
- FERNANDEZ, R. N.; SCHULZE, D. G. Calculation of Soil Color from Reflectance Spectra. **Soil Science Society of America Journal**, v. 51, p. 1277–1282, 1987.
- FLORINSKY, I. V. The Dokuchaev hypothesis as a basis for predictive digital soil mapping (on the 125th anniversary of its publication). **Eurasian Soil Science**, v. 45, p. 445–451, 2012.
- FONTES, M. P. F.; WEED, S. B. Phosphate adsorption by clays from Brazilian Oxisols: relationships with specific surface area and mineralogy. **Geoderma**, v. 72, n. 1–2, p. 37–51, 1996.
- GALVÃO, L. S. Espectros e Imagens. In: MENESES, P. R.; MADEIRA NETTO, J. S. (Org.). **Sensoriamento remoto: reflectância dos alvos naturais**. 1. ed. Brasília, DF: Editora Universidade de Brasília; Planaltina: Embrapa Cerrados, 2001a. p. 251–262.
- GALVÃO, L. S. Métodos para Análise de Espectros de Reflectância. In: MENESES, P. R.; MADEIRA NETTO, J. S. (Org.). **Sensoriamento remoto: reflectância dos alvos naturais**. 1. ed. Brasília, DF: Editora Universidade de Brasília; Planaltina: Embrapa Cerrados, 2001b. p. 225–247.

- GOGÉ, F.; JOFFRE, R.; JOLIVET, C.; ROSS, I.; RANJARD, L. Optimization criteria in sample selection step of local regression for quantitative analysis of large soil NIRS database. **Chemometrics and Intelligent Laboratory Systems**, v. 110, n. 1, p. 168–176, 2012.
- GRUNWALD, S. What do we really know about the space-time continuum of soil-landscapes? **Environmental soil-landscape modeling - geographic information technologies and pedometrics**. New York, USA: Taylor & Francis, 2006. p. 3–36.
- HARTEMINK, A. E.; MCBRATNEY, A. B.; MENDONÇA-SANTOS, M. L. **Digital soil mapping with limited data**. 31. ed. Amsterdam: Springer, 2008.
- HOFFER, R. M.; JOHANNSEN, C. J. Ecological potentials in spectral signature analysis, using laboratory leaf and soil spectral reflectance data. In: JOHNSON, P. L. (Org.). **Remote sensing in ecology**. Athens, GA. Estados Unidos: University of Georgia Press, 1969. p. 1–19.
- HOWELL, D.; KIM, Y. G.; HAYDU-HOUDESHELL, C. A. Development and Application of Digital Soil Mapping Within Traditional Soil Survey: What will it Grow Into? In: HARTEMINK, A.; MCBRATNEY, A.; MENDONÇA-SANTOS, M. L. (Org.). **Digital Soil Mapping: An Introductory Perspective**. Netherlands: Springer, 2008. p. 43–51. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1007/978-1-4020-8592-5_4>.
- ICRAF/ISRIC - WORLD AGROFORESTRY CENTRE / WORLD SOIL INFORMATION. 2010. **A Globally Distributed Soil Spectral Library Visible Near Infrared Diffuse Reflectance Spectra**. Disponível em: <<http://www.isric.org/sites/default/files/ICRAF-ISRICSoilVNIRSpectralLibrary.pdf>>. Acesso em: 10 jul. 2015.
- JENNY, H. **Factors of soil formation: a system of quantitative pedology**. New York: Courier Dover Publications, 1941. 191 p.
- JENSEN, J. R. **Sensoriamento remoto do ambiente: uma perspectiva em recursos terrestres**. 2. ed. São José dos Campo, SP: Parêntese Editora, 2009.
- KÄMPF, N.; SCHWERTMANN, U. Relações entre óxidos de ferro e a cor em solos caulíníticos do Rio Grande do Sul. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 7, p. 27–31, 1983.
- KNADEL, M.; DENG, F.; THOMSE, A.; GREVE, M. Development of a Danish national Vis-NIR soil spectral library for soil organic carbon determination. **Digital Soil Assessments and Beyond**, p. 403–408, 2012.
- KRIGE, D. G. A Statistical Approach to Some Basic Mine Valuation Problems on the Witwatersrand. **Journal of the Chemical, Metallurgical and Mining Society of South Africa**, p. 201–215, 1952.
- KRUSE, F. A.; LEFKOFF, A. B.; BOARDMAN, J. W.; HEIDEBRECHT, K. B.; SHAPIRO, A. T.; BARLOON, P. J.; GOETZ, A. F. H. The Spectral Image Processing System (SIPS) - interactive visualization and analysis of imaging spectrometer data. **Remote Sensing of Environment**, v. 44, n. 2–3, p. 145–163, maio 1993.
- LACERDA, M. P. C.; BARBOSA, I. O. Relações pedomorfogeológicas e distribuição de pedoformas na estação ecológica de águas emendadas, Distrito Federal. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 36, p. 709–722, 2012.
- LAGACHERIE, P. Digital soil mapping: A state of the art. In: HARTEMINK, A.; MCBRATNEY,

- A.; MENDONÇA-SANTOS, M. L. (Org.). **Digital Soil Mapping with Limited Data**. Netherlands: Springer, 2008. p. 3–14.
- LÓPEZ-GRANADOS, F.; JURADO-EXPÓSITO, M.; PEÑA-BARRAGÁN, J. M.; GARCÍA-TORRES, L. Using geostatistical and remote sensing approaches for mapping soil properties. **European Journal of Agronomy**, v. 23, n. 3, p. 279–289, out. 2005.
- LSO/ESALQ/USP - LABORATÓRIO DE SENSORIAMENTO REMOTO E GEOPROCESSAMENTO APLICADO A SOLOS/ESCOLA SUPERIOR DE AGRICULTURA “LUIZ DE QUEIROZ”/UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO. **Biblioteca Espectral de Solos do Brasil (BESB)**. Disponível em: <<http://bibliotecaespectral.wix.com/esalq>>. Acesso em: 10 jul. 2015.
- MACMILLAN, R. A. Experiences with applied DSM: Protocol, availability, quality and capacity building. In: HARTEMINK, A. E.; MCBRATNEY, A. B.; MENDONÇA-SANTOS, L. M. (Org.). **Digital Soil Mapping with Limited Data**. 31. ed. Amsterdam: Springer, 2008. p. 113–135.
- MADEIRA NETTO, J. S. Comportamento Espectral dos Solos. In: MENESES, P. R.; MADEIRA NETTO, J. S. (Org.). **Sensoriamento remoto: reflectância dos solos naturais**. 1. ed. Brasília, DF: Editora Universidade de Brasília; Planaltina: Embrapa Cerrados, 2001. p. 127–154.
- MADEIRA NETTO, J. S.; BAPTISTA, G. M. DE M. **Reflectância espectral de solos**. Planaltina, DF: Embrapa Cerrados, 2000. 55 p.
- MADEIRA NETTO, J. S.; POUGET, M.; BEDIDI, A.; CERVELLE, B. Estimativa de teores de hematita em latossolos com imagens TM. In: Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, 7, 1993a. **Anais...** São José dos Campos, INPE, p. 242–248, 1993a.
- MADEIRA NETTO, J. S.; POUGET, M.; BEDIDI, A.; CERVELLE, B. Informações quantitativas sobre a mineralogia dos latossolos a partir da reflectância espectral no visível e infravermelho próximo e médio (400 a 2500 nm). In: Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, 7, 1993b. **Anais...** São José dos Campos, INPE, p. 249–255, 1993b.
- MADEIRA NETTO, J. S.; ROBBEZ-MASSON, J. M.; MARTINS, E. Visible-NIR Hyperspectral Imagery for Discriminating Soil Types in the La Peyne Watershed, France. In: LAGACHERIE, P.; MCBRATNEY, A. B.; VOLTZ, M. (Org.). **Digital Soil Mapping, an introductory perspective**. 31. ed. Amsterdam: Elsevier, 2007. v. 31. p. 219–234.
- MCBRATNEY, A. B.; MENDONÇA-SANTOS, M. DE L.; MINASNY, B. On digital soil mapping. **Geoderma**, v. 117, n. 1–2, p. 3–52, nov. 2003.
- MCBRATNEY, A. B.; ODEH, I. O. A.; BISHOP, T. F. A.; DUNBAR, M. S.; SHATAR, T. M. An overview of pedometric techniques for use in soil survey. **Geoderma**, v. 97, n. 3–4, p. 293–327, set. 2000.
- MCKENZIE, N. J.; GRUNDY, M. J.; WEBSTER, R.; RINGROSE-VOASE, A. J. **Guidelines for surveying soil and land resources**. 2. ed. Melbourne, Australia: CSIRO Publishing, 2008.
- MCKENZIE, N. J.; RYAN, P. J. Spatial prediction of soil properties using environmental correlation. **Geoderma**, v. 89, n. 1–2, p. 67–94, abr. 1999.

- MENDONÇA-SANTOS, M. DE L.; SANTOS, H. G. The State of the Art of Brazilian Soil Mapping and Prospects for Digital Soil Mapping. In: LAGACHERIE, P.; MCBRATNEY, A. B.; VOLTZ, B. T. (Org.). **Digital Soil Mapping An Introductory Perspective**. [S.l.]: Elsevier, 2006. v. 31. p. 39–601.
- MENDONÇA-SANTOS, M. DE L.; VARGAS, R.; COMERMA, J.; KRASILNIKOV, P.; ANGELINI, M.; MUNIZ, O.; SCHAD, P.; GARDI, C.; CASTRO, A.; JONES, A.; GAISTARDO, C. C.; ROJAS, A. E.; MONTANARELLA, L.; BARCELO, S. **Atlas de solos de América Latina e do Caribe**. Luxemburgo: Serviço das Publicações da União Europeia, 2015.
- MENESES, P. R. Fundamentos de Radiometria Óptica Espectral. In: MENESES, P. R.; MADEIRA NETTO, J. S. (Org.). **Sensoriamento remoto: reflectância dos alvos naturais**. 1. ed. Brasília, DF: Editora Universidade de Brasília; Planaltina: Embrapa Cerrados, 2001. p. 15–40.
- MENESES, P. R.; ALMEIDA, T. **Introdução ao processamento de imagens de sensoriamento remoto**. Brasília: CNPq / UnB, 2012. 276 p.
- MENESES, P. R.; FERREIRA JÚNIOR, L. G. Comportamento Espectral de Minerais e Rochas. In: MENESES, P. R.; MADEIRA NETTO, J. S. (Org.). **Sensoriamento remoto: reflectância dos alvos naturais**. 1. ed. Brasília, DF: Editora Universidade de Brasília; Planaltina: Embrapa Cerrados, 2001. p. 63–123.
- MIGUEL, M. R. Comportamento espectral de algumas classes de solos do Rio Grande do Sul. In: Congresso Brasileiro de Ciências do Solo, 30, 2005. **Anais...** Recife, PE: EFPE, p. 635-640, 2005.
- MULDER, V. L.; DE BRUIN, S.; SCHAEPMAN, M. E.; MAYR, T. R. The use of remote sensing in soil and terrain mapping — A review. **Geoderma**, v. 162, n. 1–2, p. 1–19, 15 abr. 2011.
- NANNI, M. R.; DEMATTÊ, J. A. M. Spectral Reflectance Methodology in Comparison to Traditional Soil Analysis. **Soil Science Society of America Journal**, v. 70, n. 2, p. 393-407, mar. 2006.
- NASA - NATIONAL AERONAUTICS AND SPACE ADMINISTRATION. **Landsat 7 Science Data Users Handbook**. USA: NASA, 2009.
- NOLASCO-CARVALHO, C. C.; FRANCA-ROCHA, W.; UCHA, J. M. Mapa digital de solos: uma proposta metodológica usando inferência fuzzy. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 13. Scielo p. 46-65, 2009
- NOVO, E. M. L. DE M. **Sensoriamento remoto: princípios e aplicações**. 4. ed. São Paulo, SP: Blucher, 2010.
- OECD-FAO. **Agricultural Outlook 2009-2018 HIGHLIGHTS**. 15. ed. [S.l.: s.n.], 2009. Disponível em: <<http://www.agri-outlook.org/43040036.pdf>>.
- RANZANI, G. **Manual de levantamento de solos**. Piracicaba: Edgard Blucher Ltda, 1969. 159 p.
- REATTO, A.; CORREIA, J. R.; SPERA, S. T.; CHAGAS, C. S.; MARTINS, E. S.; ANDAHUR, J. P.; GODOY, M. J. S.; ASSAD, M. L. C. L. **Levantamento semi-detalhado dos solos**

- da bacia do rio Jardim-DF, escala 1:50.000.** Planaltina, DF: Embrapa Cerrados, 2000.
- REATTO, A.; MARTINS, E. DE S.; CARDOSO, E. A.; SPERA, S. T.; CARVALHO JR, O. A. C.; SILVA, A. V; FARIAS, M. F. R. **Levantamento de reconhecimento de solos de alta intensidade do Alto Curso do Rio Descoberto, DF/GO, escala 1: 100.000.** Planaltina, DF: Embrapa Cerrados, 2003.
- REATTO, A.; MARTINS, E. DE S.; FARIAS, M. F. R.; SILVA, A. V; CARVALHO, O. A. J.; OLIVEIRA, R. C. J.; RODRIGUES, T. E.; SANTOS, P. L.; VALENTE, M. A. **Mapa pedológico digital - SIG atualizado do Distrito Federal escala 1:100.000 e uma síntese do texto explicativo.** Planaltina, DF: Embrapa Cerrados, 2004.
- RICHARDS, J. A.; JIA, X. **Remote Sensing Digital Image Analysis: An Introduction.** 4. ed. Canberra, Australia: Springer, 2006. 439 p.
- ROECKER, S. M.; HOWELL, D. W.; HAYDU-HOUDESHELL, C. A.; BLINN, C. A. Qualitative Comparison of Conventional Soil Survey and Digital Soil Mapping Approaches. In: BOETTINGER, J. L.; HOWELL, D. W.; MOORE, A. C.; HARTEMINK, A. E.; KIENAST-BROWN, S. (Org.). **Digital Soil Mapping. Progress in Soil Science.** Netherlands: Springer, 2010. v. 2. p. 369–384.
- ROSSEL, R. A. V.; WEBSTER, R. Predicting soil properties from the Australian soil visible-near infrared spectroscopic database. **European Journal of Soil Science**, v. 63, n. 6, p. 848–860, 2012.
- ROY, D. P.; WULDER, M. A.; LOVELAND, T. R.; C.E., W.; ALLEN, R. G.; ANDERSON, M. C.; HELDER, D.; IRONS, J. R.; JOHNSON, D. M.; KENNEDY, R.; SCAMBOS, T. A.; SCHAAF, C. B.; SCHOTT, J. R.; SHENG, Y.; VERMOTE, E. F.; BELWARD, A. S.; BINDSCHADLER, R.; COHEN, W. B.; GAO, F.; HIPPLE, J. D.; HOSTERT, P.; HUNTINGTON, J.; JUSTICE, C. O.; KILIC, A.; KOVALSKYY, V.; LEE, Z. P.; LYMBURNER, L.; MASEK, J. G.; MCCORKEL, J.; SHUAI, Y.; TREZZA, R.; VOGELMANN, J.; WYNNE, R. H.; ZHU, Z. Landsat-8: Science and product vision for terrestrial global change research. **Remote Sensing of Environment**, v. 145, p. 154–172, 5 abr. 2014.
- SANCHEZ, P. A.; AHAMED, S.; CARRÉ, F.; HARTEMINK, A. E.; HEMPEL, J.; HUISING, J.; LAGACHERIE, P.; MCBRATNEY, A. B.; MCKENZIE, N. J.; MENDONÇA-SANTOS, M. DE L.; MINASNY, B.; MONTANARELLA, L.; OKOTH, P.; PALM, C. A.; SACHS, J. D.; SHEPHERD, K. D.; VÅGEN, T.-G.; VANLAUWE, B.; WALSH, M. G.; WINOWIECKI, L. A.; ZHANG, G.-L. Digital Soil Map of the World. **Science**, v. 325, p. 680–681, 2009.
- SANTANA, D. P. **Soil Formation in a Toposequence of Oxisols from Patos de Minas Region, Minas Gerais State, Brazil.** Tese (Doutorado). Purdue University, West Lafayette, 1984. 258 p.
- SCHOWENGERDT, R. A. **Remote Sensing: Models and Methods for Image Processing.** 3. ed. San Francisco, CA: Academic Press, 2007.
- SCHULZE, D. G.; NAGEL, J. L.; VAN-SCOYOC, G. E.; HENDERSON, T. L.; BAUMGARDNER, M. F.; STOTT, D. E. Significance of Organic Matter in Determining Soil Colors. In: BIGHAM, J. M.; CIOLKOSZ, E. J. (Org.). **Soil Color.** 31. ed. Madison: SSSA, 1993. p. 71–90.

- SCHWERTMANN, J. M. Relations Between Iron Oxides, Soil Color, and Soil Formation. In: CIOLKOSZ, E. J.; BIGHAM, U. (Org.). **Soil Color**. Madison: SSSA, 1993. p. 51–69.
- SHEPHERD, K. D.; WALSH, M. G. Development of Reflectance Spectral Libraries for Characterization of Soil Properties. **Soil Science Society of America Proceedings**, v. 66, n. 3, p. 988–998, maio 2002.
- SHERMAN, D. M.; WAITE, T. D. Electronic spectra of Fe³⁺ oxides and oxide hydroxides in the near IR to near UV. **American Mineralogist**, v. 70, n. 11-12, p. 1262–1269, 1985.
- SHI, Z.; WANG, Q.; PENG, J.; JI, W.; LIU, H.; LI, X.; VISCARRA ROSSEL, R. Development of a national VNIR soil-spectral library for soil classification and prediction of organic matter concentrations. **Science China Earth Sciences**, v. 57, n. 7, p. 1671–1680, 2014. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1007/s11430-013-4808-x>>.
- SHIMABUKURO, Y. E.; SMITH, J. A. The least-squares mixing models to generate fraction images derived from remote sensing multispectral data. **Geoscience and Remote Sensing**, v. 29, p. 16–20, 1991.
- SOUSA, J. G. DE A. J.; DEMATTÊ, J. A. M.; GENÚ, A. M. Comportamento espectral dos solos na paisagem a partir de dados coletados por sensores terrestre e orbital. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 32, p. 727–738, 2008.
- SOUSA-LIMA, L. A.; REATTO, A.; ROIG, H. L. Soil Mapping of a Small Watershed in a Brazilian Savanna Biome: A Semi-Automatic Approach. **Journal of Geographic Information System**, v. 6, p. 79–87, 2014.
- STARK, E.; LUCHTER, K.; MARGOSHES, M. Near-Infrared Analysis (NIRA): A Technology for Quantitative and Qualitative Analysis. **Applied Spectroscopy Reviews**, v. 22, n. 4, p. 335–399, 1986.
- STEVENS, A.; NOCITA, M.; TÓTH, G.; MONTANARELLA, L.; VAN WESEMAEL, B. Prediction of Soil Organic Carbon at the European Scale by Visible and Near InfraRed Reflectance Spectroscopy. **PLoS ONE**, v. 8, n. 6, p. e66409-e66422, 19 jun. 2013.
- STONER, E. R.; BAUMGARDNER, M. F. Characteristic Variations in Reflectance of Surface Soils. **Soil Science Society America Journal, Madison**, v. 45, p. 1161–1165, 1981.
- STONER, E. R.; BAUMGARDNER, M. F.; BIEHL, L. L.; ROBINSON, B. F. **Atlas of Soil Reflectance Properties**. West Lafayette, USA: Purdue University, 1980. 89 p.
- STONER, E. R.; HORVATH, E. H. The effect of cultural practices on multispectral response from surface soil. In: International Symposium on Remote Sensing of Environment, 7, 1978, Michigan. **Proceedings...** Michigan, University of Michigan v. 3, p. 2109–2113, 1978.
- TEN CATEN, A.; QUOOS, J. H. Mapeamento Digital de Solos. **InfoGEO**, v. 58, out. 2009.
- TORRENT, J.; SCHWERTMANN, U.; SCHULZE, D. G. Iron oxide mineralogy of some soils of two river terrace sequences in Spain. **Geoderma**. v. 23, p. 191-208, 1980
- USGS - UNITED STATES GEOLOGICAL SURVEY. **Landsat 8 (L8) data Users Handbook**. 1. ed. Sioux Falls, South Dakota, USA: Department of the Interior, 2015. Disponível em: <<https://landsat.usgs.gov/documents/Landsat8DataUsersHandbook.pdf>>.

- USGS - UNITED STATES GEOLOGICAL SURVEY. **Landsat—A Global Land-Imaging Mission**. Sioux Falls, South Dakota, USA: Department of the Interior, 2013.
- VASQUES, G. M.; GRUNWALD, S.; HARRIS, W. G. Spectroscopic Models of Soil Organic Carbon in Florida, USA . **Journal of Environmental Quality**, v. 39, p. 923–934, 2010.
- VINK, A. P. A. **Planning of soil surveys in land development**. Wageningen, Netherlands: Veenman & Zonen, 1963. 53 p.
- VISCARRA ROSSEL, R. A.; JEON, Y. S.; ODEH, I. O. A.; MCBRATNEY, A. B. Using a legacy soil sample to develop a mid-IR spectral library. **Soil Research**, v. 46, n. 1, p. 1–16, 2008. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1071/SR07099>>.
- VISCARRA ROSSEL, R. A.; WEBSTER, R. Discrimination of Australian soil horizons and classes from their visible–near infrared spectra. **European Journal of Soil Science**, v. 62, n. 4, p. 637–647, 1 ago. 2011. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1111/j.1365-2389.2011.01356.x>>.
- WILDING, L. P. Spatial variability: its documentation, accommodation and implication to soil surveys. In: NIELSEN, D.R. e BOUMA, J., (eds). **Soil spatial variability**. Las Vegas (NV): PUDOC, 1985. p. 166–194.
- ZIADAT, F. M.; TAYLOR, J. C.; BREWER, T. R. Merging Landsat TM imagery with topographic data to aid soil mapping in the Badia region of Jordan. **Journal of Arid Environments**, v. 54, p. 527–541, 2003.

MAPEAMENTO DIGITAL DOS SOLOS DA BACIA DO RIO JARDIM, DF, UTILIZANDO TÉCNICAS DE SENSORIAMENTO REMOTO¹

Raúl Roberto Poppiel² & Marilusa Pinto Coelho Lacerda³

¹ Projeto desenvolvido com apoio financeiro da CAPES e FINATEC

² Aluno do Programa de Mestrado e Doutorado em Agronomia, Área de concentração em Produção Sustentável e linhas de pesquisa em Solo, água e qualidade ambiental, da Faculdade de Agronomia e Medicina Veterinária, da Universidade de Brasília, Campus Universitário Darcy Ribeiro, Instituto Central de Ciências Ala Sul, Caixa Postal 4.508, CEP: 70.910-970, Brasília, DF, raulpoppiel@gmail.com

³ Professora Associado III da Faculdade de Agronomia e Medicina Veterinária da Universidade de Brasília, marilusa@unb.br

RESUMO

O conhecimento dos solos e de sua variabilidade espacial são essências para a aplicação de um manejo racional, promovendo alta produtividade e baixo impacto ambiental. Dentre as informações mais utilizadas para o planejamento e tomadas de decisão na agricultura, tem-se o mapa pedológico, o qual é fonte de informações de uma série de atributos como textura e condições químicas e morfológicas. Em contrapartida, estes mapas são escassos ou apresentam-se em escala inadequada para subsidiar o planejamento agrícola sustentável. O objetivo deste trabalho foi o mapear digitalmente das classes de solos da Bacia do Rio Jardim (DF), mediante técnicas de sensoriamento remoto, com a finalidade de fornecer informações de solos de maior confiabilidade e representatividade da bacia estudada. Foram selecionados perfis de solos em cinco lito-toposequências representativas, localizadas na Superfície Geomorfológica de Planos Intermediários do DF. Amostras de solo do horizonte A foram coletadas em 37 pontos e obtidas as leituras de reflectância. Espectros de 34 amostras foram agrupadas, em função dos seus principais atributos, em 13 grupos e calculadas as médias. Uma biblioteca espectral de solos foi elaborada com esses 13 espectros médios e reamostrados nos intervalos espectrais das bandas do sensor Landsat 5-TM. Dez imagens do satélite Landsat 5-TM do período de 1984 a 2009 foram selecionadas para gerar uma imagem composta de solo exposto. Modelos de análise da mistura espectral (SMA e MESMA) foram aplicados na imagem composta utilizando 13 *endmembers* da biblioteca espectral, para o mapeamento de classes de solos da bacia estudada. Para computar as verdades de campo, foi utilizada uma malha retangular com células de 1.400 x

1.400 m. O desempenho do MESMA foi avaliado por meio do índice Kappa. Os solos das cinco lito-topossequências apresentaram características morfológicas semelhantes, diferindo principalmente no atributo de cor. Os solos estudados foram classificados no 2º e 4º nível categórico do Sistema Brasileiro de Classificação de Solos. A imagem composta apresentou 74% da área composta por solo exposto. Os espectros de classes de solos caracterizados tiveram variações no padrão de reflectância principalmente em função da variação na coloração dos solos, pelos teores de óxidos de ferro e matéria orgânica. O mapa gerado pelo modelo SMA apresentou alta confusão, devido às limitações desta metodologia. O mapa digital de classes de solos obtido pelo modelo MESMA apresentou índice Kappa de 73%, mostrando uma distribuição fidedigna da distribuição das classes de solos da área avaliada.

Palavras Chaves: Lito-topossequências, Espectrorradiometria, Série histórica, Landsat-5 TM, Mapeamento digital de Solos, SMA, MESMA.

SOIL DIGITAL MAPPING OF JARDIM RIVER BASIN, FEDERAL DISTRICT, USING REMOTE SENSING TECHNIQUES.

ABSTRACT

Knowledge of soils and their spatial variability are scarce for the application of a rational management, promoting high productivity and low environmental impact. Among the information most used for planning and decision-making in agriculture, there is the soil map, which is a source of information on a number of attributes such as texture and chemical and morphological conditions. On the other hand, these maps are scarce or present in inadequate scale to support sustainable agricultural planning. The objective of this work was to map digitally soil classes of Jardim River Basin (DF) by remote sensing techniques, with the purpose of providing information more reliable soil and representativeness of the study area. Soil profiles we selected in five representative litho-toposequences located in Geomorphological Surface of Plans Intermediates, DF. Soil samples from horizon A we collected at 37 points and obtained reflectance readings. Spectra of 34 samples we grouped according to their main attributes, in 13 groups and calculated the average. A soil spectral library we elaborated with these 13 average spectra and resampled in the spectral ranges of the Landsat 5-TM bands. Ten images of the satellite Landsat 5-TM from 1984 to 2009 we selected to generate a composite image of bare soil. Analysis models of spectral mixture (SMA and MESMA) we applied to the composite image using 13 endmembers spectral library for the soil classes mapping of the study area. To compute the field truths, we used a rectangular grid of cells with 1.400 x 1.400 m. The performance of the MESMA we assessed using the kappa index. The soils of the five litho-toposequences showed similar morphological characteristics, differing mainly in color attribute. The soils were classified in 2nd and 4th category level of the Brazilian System of Soil Classification. The composite image showed 74% of the area composed of bare soil. Soil spectra classes we characterized showed standard reflectance variations mainly due to the variation in the color of the soil, the content of iron oxides and organic matter. The map we generated by the SMA model showed high confusion because of the limitations of this methodology. The digital map of soil classes obtained by the MESMA model presented Kappa index of 73%, showing an accurate distribution of the distribution of soil classes of the evaluated area.

Keywords: Lito-toposequences, Spectroradiometry, Historical series, Landsat-5 TM, Digital Soil Mapping, SMA, MESMA.

VII.1. INTRODUÇÃO

Mapeamento de solos é imprescindível à conservação e ao gerenciamento dos recursos naturais; sua execução requer conhecimento pedológico, compilação de dados ambientais como clima, geologia, vegetação e relevo e análise e interpretação de imagens (Nolasco-Carvalho et al., 2009).

O conhecimento detalhado dos domínios pedológicos de uma determinada região pode fornecer dados importantes para o planejamento e conservação de recursos naturais (Resende et al., 2007).

Os solos do DF são representativos dos solos do Cerrado (Cline e Buol, 1973), porem, apresentam levantamentos antigos e poucos detalhados como o realizado pelo Serviço Nacional de Levantamento de Solos (Embrapa, 1978), na escala 1:100.000.

Atualmente, com a crescente preocupação ambiental, existe uma necessidade de monitoramento dos recursos naturais e da introdução de sistemas de produção agrícolas sustentáveis. Portanto, as informações sobre solos devem ser conciliáveis com essa realidade. Para que isso seja possível, é preciso que novos mapas sejam confeccionados em escala compatível com a necessidade (Demattê et al., 2004). Porém, o método tradicional é demorado, caro e requer análises laboratoriais subseqüentes (McBratney et al., 2003). Desta forma, novos métodos que tornem os levantamentos de solos mais rápidos e menos onerosos são necessários (Demattê e Terra, 2014).

Uma das técnicas que podem auxiliar neste aspecto é o sensoriamento remoto em todos os níveis de aquisição de dados, como o orbital, utilizando-se sensores multiespectrais (Demattê et al., 2004), assim como também, informações obtidas por sensores terrestres e em laboratório (espectrorradiômetros) (Coleman et al., 1993; Fiorio e Demattê, 2009).

Dentre as técnicas de sensoriamento remoto, a espectrorradiometria de solos tem a finalidade de medir, nos comprimentos de onda do VIS-NIR-SWIR, a energia eletromagnética refletida pelos solos e representá-la em forma de curva espectral, permitindo a identificação e avaliação de suas características (Madeira Netto, 2001). É através da análise do comportamento dos espectros que se extraem importantes informações sobre as propriedades dos solos (Demattê, 2002; Demattê et al., 2014). Assim, a possibilidade de identificar variações espectrais vinculadas a feições de absorção específica, forma, intensidade e inclinação da curva espectral faz da espectrorradiometria de reflectância uma importante ferramenta para o estudo dos solos (Madeira Netto, 2001; Demattê, 2002).

Desta forma, o sensoriamento remoto possibilita o levantamento de informações a respeito dos solos de maneira rápida, barata, eficiente e não poluente, quando comparada as técnicas convencionais de laboratório e campo (Bellinaso et al., 2010; Demattê e Terra, 2010). O estudo dos solos por sensoriamento remoto baseia-se no fato de que a interação entre os

seus atributos físicos, químicos e mineralógicos com a REM ocorre em comprimentos de onda específicos, possibilitando identificá-los e caracterizá-los (Andronikov e Dobrolvshiy, 1991).

Portanto, estudos pedológicos que associam as informações obtidas do sensoriamento remoto com dados pedomorfogeológicos e campanhas de campo, representam uma alternativa eficaz e fidedigna para o mapeamento de solos (McKenzie e Ryan, 1999; McBratney et al., 2003; Scull et al., 2003; Mulder et al., 2011).

Nesse contexto, o objetivo do presente estudo foi o mapear digitalmente as classes de solos da Bacia do Rio Jardim (DF), mediante técnicas de sensoriamento remoto, com a finalidade de fornecer informações atualizadas de solos de maior representatividade na bacia estudada.

VII.2. MATERIAL E MÉTODOS

VII.2.1.Revisão bibliográfica e levantamento de dados auxiliares

Inicialmente, foi realizado o levantamento de dados bibliográficos e auxiliares tais como mapa pedológico, em escala 1:100.000 (Embrapa, 1978), mapa geológico, em escala 1:100.000 (Freitas-Silva e Campos, 1998b), e dados planialtimétricos tais como curvas de nível, redes de drenagem e pontos cotados em escala 1:10.000 (CODEPLAN, 1991). Foram também pesquisadas bibliografias específicas sobre sensoriamento remoto, geoprocessamento e técnicas de mapeamento digital, entre outros.

Em função da resolução espacial de 30 metros das imagens multiespectrais Landsat que foram utilizadas para a realização desta pesquisa, a escala aproximada de trabalho corresponde a 1:50.000 (INPE, 2012).

VII.2.2.Seleção da área de estudo

A região leste do DF foi a região selecionada para este estudo, visto que esta apresenta classes de solos variadas de grande importância agrícola para a região, considerados como solos representativos da região do Planalto Central Brasileiro (Motta et al., 2002). Trata-se de uma região do DF que necessita de mapeamentos de solos em escala de maior detalhamento para subsidiar o planejamento sustentável do uso das terras e que atenda a demanda crescente do uso cada vez mais intensivo dos solos. Os mapeamentos pedológicos existentes no DF, elaborados por Embrapa (1978) e Reatto et al. (2002), apresentam escalas 1:100.000 e 1:50.000, respectivamente, sendo esta última a escala de mapeamento dos solos somente na Bacia do Rio Jardim. Esta região do DF apresenta diversas propriedades rurais distribuídas em vários núcleos rurais, com produção intensiva e predominante de grãos, além de áreas de olericultura e pecuária.

Após a aquisição dos mapas auxiliares de solos, geologia e geomorfologia, e de dados planialtimétricos, os mesmos foram manipulados no programa ArcGIS 10 (ESRI, 2014) para avaliar as relações entre as classes de solos, relevo e geologia desta região do DF. Esta apresenta várias classes de solos desenvolvendo-se a partir de litologias pertencentes ao Grupos Paranoá, Canastra e Bambuí.

Posteriormente foi efetuado o levantamento bibliográfico das características do meio físico da região da Bacia do Rio Jardim, tais como clima, geologia, geomorfologia, solos e declividade, entre outros.

VII.2.3. Caracterização da Área de Estudo

VII.2.3.1. Localização

Esta investigação foi conduzida na Bacia Hidrográfica do Rio Jardim, considerada como uma importante região agrícola do DF, a qual é responsável pela produção da maior parte dos grãos (milho, soja, trigo e feijão), frutas e hortaliças, além de carne bovina e de aves, ovos e leite (Carneiro et al., 2007). A bacia se localiza na porção sudeste do DF, entre as coordenadas UTM (fuso 23 S) 216.000 m a 245.000 m e 8.261.000 m a 8.228.000 m (*datum* SIRGAS 2000), pertencente ao Bioma Cerrado (Figura 14). Dentro desta bacia, encontra-se o Núcleo Rural Tabatinga, caracterizado por áreas de agricultura, muitas delas sob pivô central, com sistema de plantio direto.

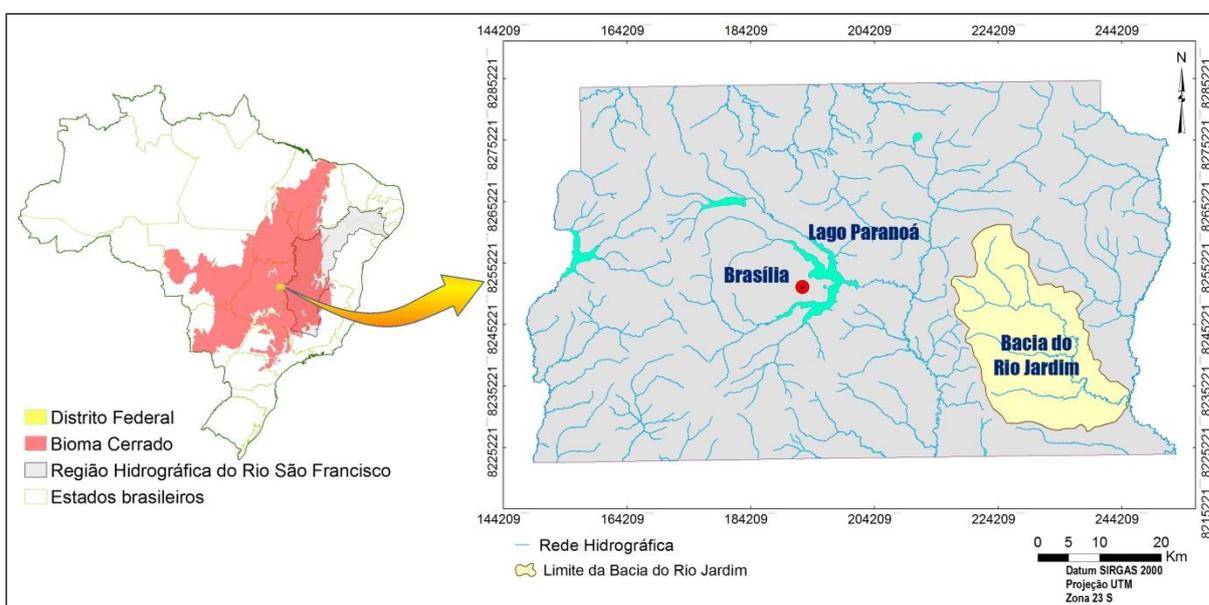


Figura 14. Mapa de localização da área de estudo, Bacia do Rio Jardim, em relação ao Distrito Federal. Fonte: IBGE (2011).

A bacia conta com uma área de drenagem de aproximadamente 53.000 ha, o que representa em torno de 50% da área de contribuição da Bacia do Rio Preto, inserida dentro dos limites do DF (Reatto et al., 2000). Segundo Damacena et al. (2010), a altimetria varia de 830 a 1.175 metros, formando parte do Planalto Central Brasileiro.

A bacia do Rio Jardim se subdivide em três áreas principais, Alto, Médio e Baixo Jardim, e é drenada por meio de uma rede de cursos de água afluentes, destacando-se como principais os Córregos Taquarí, Cariru e Lamarão. Além destes, outros trinta e um cursos d'água de menor porte também deságuam no Rio Jardim (Dolabella, 1996).

VII.2.3.2. Clima

O DF se localiza na região central do Brasil, o qual está inserido no Domínio Morfoclimático do Cerrado, caracterizando-se por apresentar extensos chapadões recobertos por vegetação de Cerrado de alta biodiversidade, adentrados por Matas de Galerias que acompanham os riachos de pequeno porte e córregos. A região é marcada pelo predomínio de climas tropicais úmidos, com duas estações bem definidas, chuva no verão e seca no inverno (IBRAM, 2012).

De acordo com a classificação climática de Köppen (1918), as áreas com cotas altimétricas entre 1.000 e 1.200 metros possuem clima Tropical de Altitude do tipo Cwa (inverno seco e verão quente), com temperatura média do ar, para o mês mais frio (julho), ligeiramente inferior a 18 °C, e com média superior a 22 °C nos meses mais quentes (setembro e outubro). Já as áreas que possuem cotas superiores a 1.200 metros apresentam temperaturas que não chegam a 22 °C, mas que superam os 10 °C durante os quatro meses mais quentes, correspondente ao clima Tropical de Altitude do tipo Cwb (inverno seco e verão temperado) (CODEPLAN, 1984; SEMARH, 2012). Já as áreas com cotas altimétricas abaixo de 1.000 m enquadram-se na classificação climática Aw. Esta classificação caracteriza-se por temperaturas para o mês mais frio superiores a 18 °C, verão chuvoso e inverno seco, sendo que, para o mês mais seco, as precipitações são inferiores a 60 mm. De acordo com Reatto et al. (2000), a bacia se enquadra nesta última classificação, com os dados pluviométricos da área, de novembro a março, variando entre 150 a 300 mm/mês, e temperaturas máximas de 30 °C e mínimas de 18 °C, também dentro desses meses.

A média anual das precipitações oscila entre 1.200 a 1.800 milímetros (Costa et al., 2012). A estação seca é bastante rigorosa e estende-se, aproximadamente, de maio a setembro, chegando a ocorrer ausência de chuvas nesses meses, em alguns anos extremamente secos. Por outro, a estação chuvosa vai de outubro a abril e apresenta maior pluviosidade no período de dezembro a março, quando se concentram mais de 80% do total anual de chuvas (Embrapa, 1978).

VII.2.3.3. Geologia

A região do DF está geologicamente inserida na Plataforma Sul-Americana, que em conjunto com a Plataforma da Patagônia e a Cordilheira dos Andes, constituem as três grandes regiões tectônicas do Continente Sul Americano (Almeida e Hasui, 1984; Schobbenhaus e Campos, 1984).

No DF são encontrados quatro conjuntos litológicos denominados de Grupos Paranoá, Canastra, Araxá e Bambuí (Freitas-Silva e Campos, 1998b; SEMARH, 2012).

A bacia do Rio Jardim desenvolveu-se sobre rochas dos Grupos Paranoá, Canastra e Bambuí, contribuindo respectivamente com cerca de 5, 25 e 70% de sua área total (Freitas-Silva e Campos, 1998b). Os dois primeiros Grupos geológicos apresentam idade Meso/Neoproterozóica, entre 1.100 e 900 milhões de anos, e o último Grupo, idade Neoproterozóica, entre 850 e 600 milhões de anos, aflorando apenas no alto curso da Bacia do Rio Jardim.

De acordo com Freitas-Silva e Campos (1998b) e Campos (2004), o Grupo Paranoá é representado por três unidades, da base para topo: **MNPpr3** – Metarritmito Arenoso, constituído por uma alternância de quartzitos finos a médios com níveis de metassiltitos argilosos, metalamitos siltosos e metalamitos micáceos; **MNPpq3** – Quartzito Médio, esta unidade, por sua elevada resistência aos processos de intemperismo, sustenta as áreas de chapadas mais elevadas do DF. Os litotipos presentes são quartzitos finos a médios, por vezes grosseiros, de coloração branca ou cinza clara (cinza mais escuro quando frescos), bem selecionados, mineralogicamente maduros, muito silicificados, o que origina um aspecto maciço na maioria das ocorrências no DF; **MNPpr4** – Metarritmito Argiloso, dá origem a um relevo mais movimentado com vales encaixados. O mesmo é representado por metarritmitos homogêneos com camadas centimétricas regulares de metassiltitos, metalamitos e quartzitos finos de coloração cinza, amarelada, rosada ou avermelhada devido aos diferentes graus de intemperismo.

O Grupo Canastra é constituído por unidades com filitos variados: **MNPcf** – fengita filitos, clorita filitos, quartzo filitos, fengita-clorita-filitos e lentes de quartzitos.

O Grupo Bambuí representa uma unidade de grande expressão na Bacia do Rio Jardim, aflorando em drenagens e cortes de estradas, sendo recoberto, na sua maior área, por uma espessa camada de Latossolos. Compõe-se pela unidade **NPbt-TOPO** – siltitos argilosos, folhelhos e camadas de arcóseos (Figura 15).

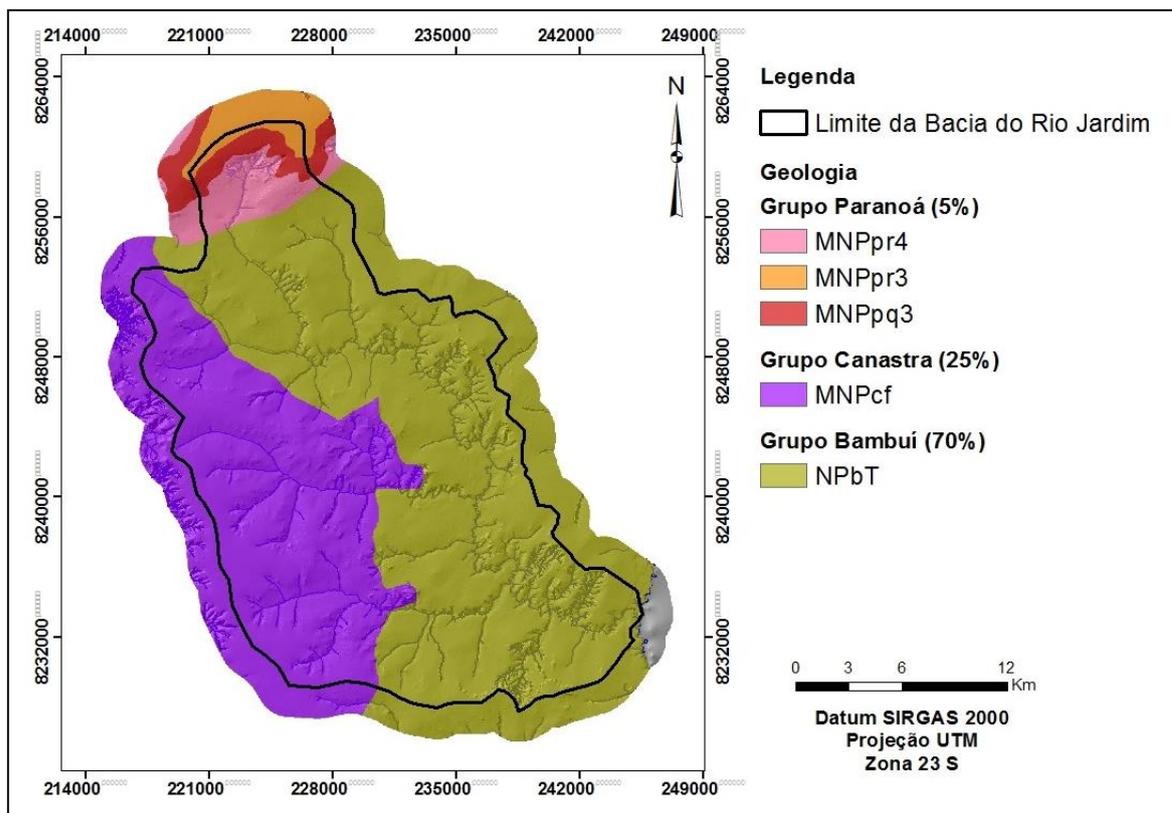


Figura 15. Mapa geológico da Bacia do Rio Jardim. Fonte: Freitas-Silva e Campos (1998b).

VII.2.3.4. Geomorfologia

O DF situa-se em uma das porções mais elevadas do Planalto Central do Brasil, onde se encontram as cabeceiras de afluentes dos três maiores rios brasileiros, o Rio Maranhão (afluente do Rio Tocantins), o Rio Preto (afluente do Rio São Francisco) e os rios São Bartolomeu e Descoberto (tributários do Rio Paraná) (Freitas-Silva e Campos, 1998b).

Segundo King (1956) e Braun (1971), as porções mais elevadas do Planalto Central, correspondem a remanescentes dos aplainamentos resultantes dos ciclos de erosão Sul-Americanos e Velhas que se desenvolveram bilhões de anos atrás. Assim, para explicar as características geomorfológicas da paisagem, vários estudos específicos foram desenvolvidos, tais como Belcher (1954), Penteadó (1976), IBGE (1977), Embrapa (1978), Brasil (1982), CODEPLAN (1984), Novaes Pinto e Carneiro (1984) e Novaes Pinto (1987, 1988).

A SEMARH (2012), propôs a integração e adaptação das propostas de Novaes Pinto (1994) e Martins e Baptista (1998). A compartimentação geomorfológica foi dividida em cinco unidades, sendo Plano Intemrediário a de maior destaque dentro da Bacia do Rio Jardim (Figura 16). Desta forma, tem-se a seguinte classificação:

- **PE** – Plano Elevado – padrão de relevo plano a suave ondulado, baixa densidade de drenagens, predominância de Latossolos, declividades inferiores a 10% e cotas

superiores a 1.100 m. A pedogênese supera a erosão e transporte no balanço morfodinâmico.

- **PI** – Plano Intermediário – padrão de relevo plano a suave ondulado, baixa densidade de drenagem, ampla predominância de Latossolos, declividades inferiores a 12% e cotas entre 950 e 1.050 m. A pedogênese supera a erosão e transporte no balanço morfodinâmico.
- **VD** – Vale Dissecado – padrão de relevo ondulado a forte ondulado, elevada densidade de drenagem, ampla predominância de Cambissolos, declividades superiores a 20% e cotas inferiores a 800 m. A erosão supera a pedogênese na morfogênese.
- **R** – Rebordo – padrão de relevo ondulado, moderada densidade de drenagem, predominância de Cambissolos, declividades entre 10 e 20% e cotas entre 950 e 1.100 m. A erosão supera a pedogênese no balanço morfodinâmico.
- **RI** – Rampa Íngreme – padrão de relevo forte ondulado a escarpado, alta densidade de drenagem, ampla predominância de Latossolos, declividades superiores a 25% e cotas entre 800 e 1.100 m. A erosão e transporte superaram fortemente a pedogênese no balanço morfodinâmico.

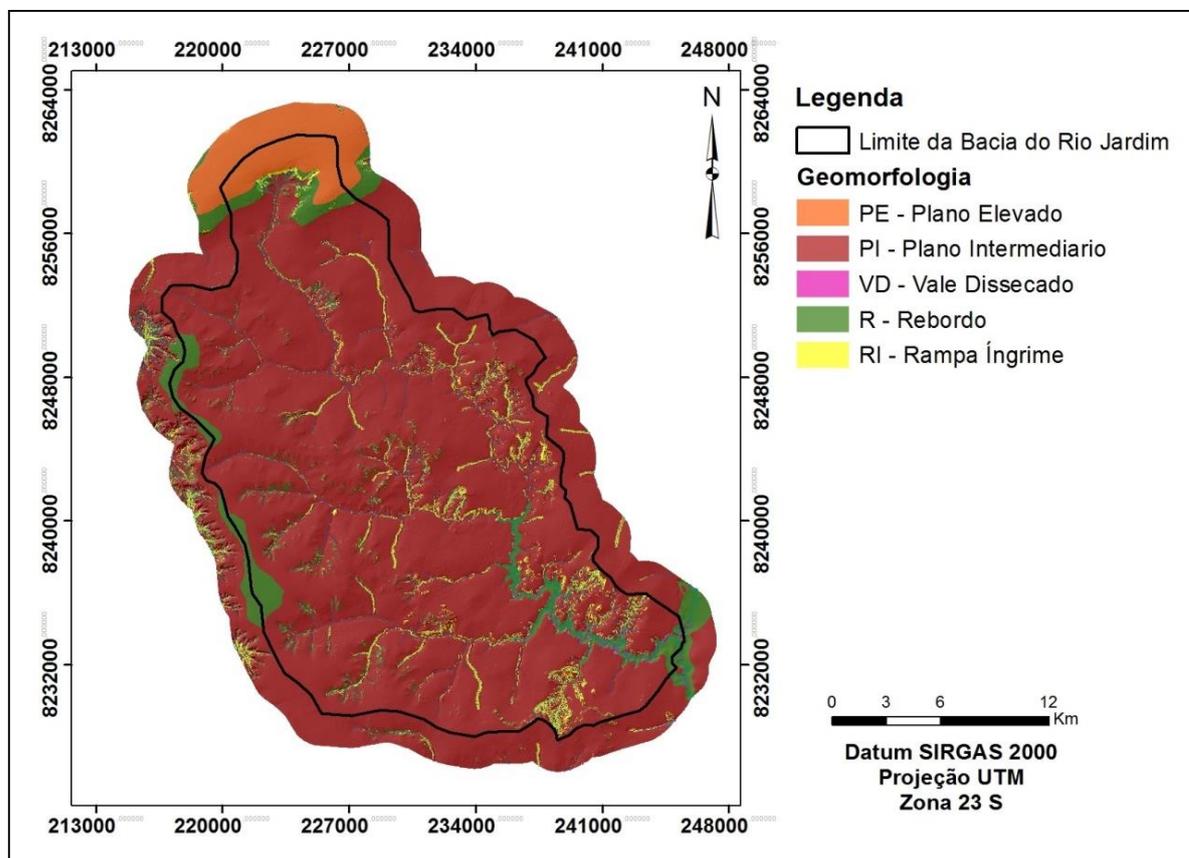


Figura 16. Mapa geomorfológico da Bacia do Rio Jardim. Fonte: Adaptação das propostas de Novaes Pinto (1994) e Martins e Baptista (1998) pela SEMARH (2012).

Por outro lado, conforme o levantamento de solos da Bacia do Rio Jardim realizado por Reatto et al. (2000), são reconhecidas, com base no Sistema Brasileiro de Classificação de Solos – SiBCS (Embrapa, 2013), as seguintes classes de relevo e declividades correspondentes (Figura 17 e Tabela 4):

Plano: topografia horizontalizada, onde os desnivelamentos são muito pequenos, com declividades variáveis de 0 a 3%.

Suave ondulado: topografia pouco movimentada, constituída por conjunto de colinas (elevações de até 50 m) e/ou outeiros (elevações de 50 a 100 m), apresentando declives suaves, variáveis de 3 a 8%.

Ondulado: topografia pouco movimentada, constituída por conjunto de colinas e/ou outeiros, apresentando declives moderados, variáveis de 8 a 20%.

Forte ondulado: topografia movimentada, formada por outeiros e/ou morros (elevações de 100 a 200 m) e raramente colinas, com declives fortes, variáveis de 20 a 45%.

Montanhoso: topografia muito movimentada, com predomínio de formas acidentadas, usualmente constituídas por morros, montanhas, maciços montanhosos e alinhamentos montanhosos, apresentando desnivelamentos relativamente grandes e declives fortes e muito fortes, variáveis de 45 a 75%.

Escarpado: predomínio de formas abruptas, compreendendo superfícies muito íngremes e escarpas, tais como aparados, itaimbés, frentes de cuevas, falésias e vertentes de declives muito fortes, usualmente ultrapassando 75%.

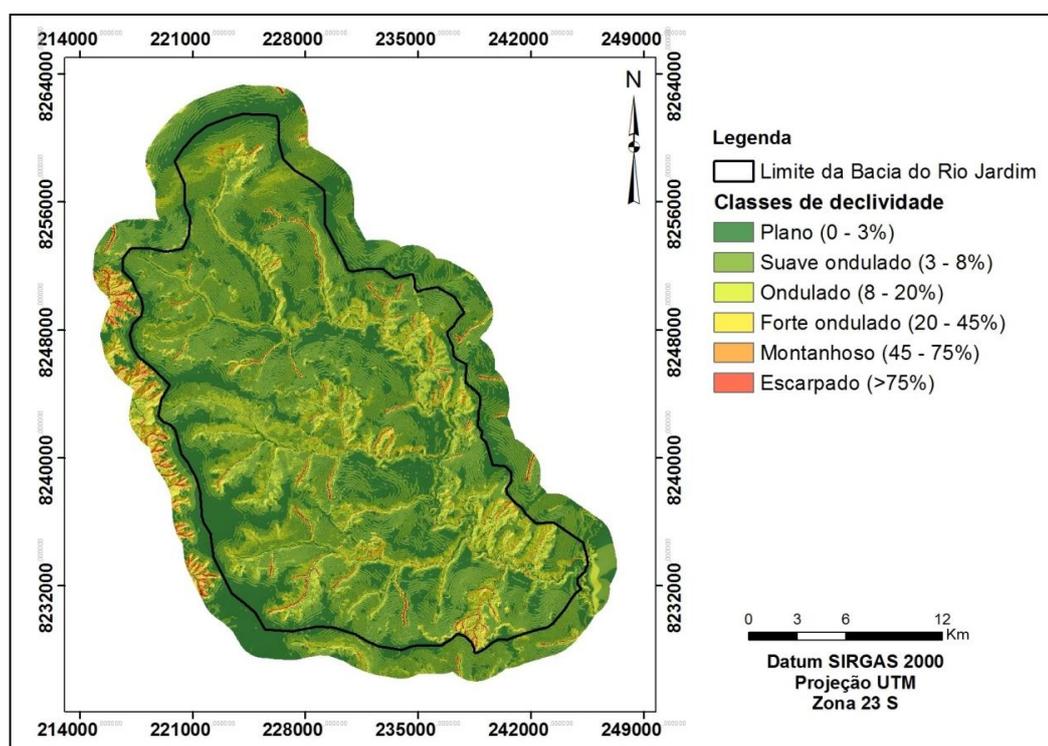


Figura 17. Mapa de declividade da Bacia do Rio Jardim. Elaborado a partir de dados da CODEPLAN (1991) e classificado segundo Embrapa (2013).

Tabela 4. Distribuição das classes de declividade para a bacia hidrográfica do Rio Jardim. Elaborado a partir de dados da CODEPLAN (1991) e classificado segundo Embrapa (2013).

Relevo	Classe de declividade (%)	Área (Ha)	Área (%)
Plano	0 - 3	17.847	34%
Suave ondulado	3 - 8	24.004	45%
Ondulado	8 - 20	8.056	15%
Forte ondulado	20 - 45	2.089	4%
Montanhoso	45 - 75	379	1%
Escarpado	> 75	387	1%
Total	-	52.761	100%

VII.2.3.5. Solos

Os solos do DF representam adequadamente os solos da região do Cerrado (Cline e Buol, 1973), sendo o trabalho realizado pelo Serviço Nacional de Levantamento de Solos (Embrapa, 1978), na escala 1:100.000, a melhor fonte de informações sobre os solos encontrados no DF.

Analisando o mapeamento semidetalhado de solos executado por Reatto et al. (2000), na escala 1:50.000, a Bacia do Rio Jardim apresenta as seguintes ordens de solos, sendo as duas primeiras as de maior expressão: LATOSSOLOS, CAMBISSOLOS, PLINTOSSOLOS, GLEISSOLOS, ARGISSOLOS e NEOSSOLOS.

De acordo com Reatto et al. (2000), os Latossolos representam aproximadamente 65% da área total da Bacia, associados geralmente a áreas de relevo plano ou suave ondulado (declividades inferiores a 8%), com espessura quase sempre maior que 2,5 m e de baixa fertilidade natural. Também, apresentam elevada tolerância e resistência à erosão (SEMARH, 2012).

Por outro lado, em virtude da topografia favorável ou da ausência de impedimentos físicos e hídricos para a agricultura (pedregosidade, deficiência de oxigênio e outros) são os solos mais intensamente utilizados na bacia para atividades agrícolas. Geralmente, possuem alta permeabilidade de água, podendo ser fortemente drenados. São solos ácidos, distróficos e álicos de muito baixa a média capacidade de troca catiônica (Reatto et al., 2000).

Assim, têm-se na região da Bacia do Rio Jardim, como principais representantes desta ordem, os Latossolos Vermelhos (LV), os quais apresentam coloração avermelhada e teores de argila variando entre 67% e 75%, posicionados nos topos das chapadas, e os Latossolos Vermelhos-Amarelos (LVA), de matiz mais amarelada e teores de argila variando entre 38% e 71%, localizados nos rebordos das chapadas e nos divisores de água (SEMARH, 2012).

Os Cambissolos são solos pouco desenvolvidos, com espessura quase sempre menor que 0,70 m, caracterizados principalmente por apresentarem horizonte B incipiente, em que alguns minerais primários facilmente intemperizáveis podem estar presentes (Embrapa, 1978). São solos rasos que apresentam cascalhos, concreções e fragmentos de rochas ao

longo dos perfis. Ocupam, na paisagem, o relevo forte ondulado (20 a 45% de declive) e exibem coloração avermelhada ou amarelada, com estruturas e texturas variadas, proporcionando uma drenagem moderada.

Em geral, estes solos possuem reduzida fertilidade, devido à baixa saturação por bases (distróficos), ou pela elevada saturação por alumínio (álícos) (Reatto et al., 2000). Apresentam elevada susceptibilidade à erosão, pois a baixa permeabilidade agregada à ocorrência de chuvas torrenciais produz as enxurradas que favorecem a formação de sulcos. Devido a esse processo, sugere-se que as áreas com desenvolvimento de Cambissolos, sejam destinadas prioritariamente à preservação natural (SEMARH, 2012).

Os Plintossolos possuem textura argilosa, média ou arenosa, são distróficos, pouco profundos, moderadamente ácidos e mal drenados (hidromórficos), com séria restrição à percolação de água, apresentando alagamento temporário e escoamento lento. Ocorrem em relevo plano e suave-ondulado (0 a 8% de declive), como áreas deprimidas e terços inferiores das encostas, onde há importante movimentação lateral de água. As plintitas, quando endurecidas de maneira irreversível, transformam-se gradualmente em petroplintitas (Reatto et al., 2000, 2004).

Os solos hidromórficos como os Gleissolos, geralmente ocupam as depressões da paisagem sujeitas a inundações, cabeceiras de rios ou córregos como também ao longo deles, sendo imperfeitamente drenados ou muito mal drenados. Apresentam textura variável, sendo solos fracamente estruturados e podem ser ricos ou pobres em bases ou com teores de alumínio elevados (alumínicos) (Reatto et al., 2000).

Os Argissolos correspondem a solos bastante heterogêneos, aumentando substancialmente o teor de argila com o aumento da profundidade, apresentando, portanto, permeabilidade diferenciada e susceptibilidade à erosão em sulcos (Embrapa, 1978; Reatto et al., 2004). Ocupam, na paisagem, a porção inferior das encostas, em geral naquelas côncavas onde o relevo apresenta-se ondulado (8 a 20% de declive) ou forte-ondulado (20 a 45% de declive) (Reatto et al., 2004).

Os Neossolos Flúvicos são solos pouco evoluídos, não hidromórficos. Apresentam horizonte A assentado diretamente sobre o horizonte C, composto de uma sucessão de camadas estratificadas sem relação pedogenética entre si. Na paisagem, estes solos ocorrem em relevo plano, associados à vegetação Mata de Galeria, exibindo níveis variáveis de coloração, teor de argila, saturação por alumínio e saturação por bases (Reatto et al., 2000).

Os Neossolos Quartzarênicos são solos mais profundos, de coloração cinza-claro, podendo apresentar textura arenosa ou franco-arenosa. Basicamente, estão constituídos por quartzo, com valores máximos de 15% de argila e sequência de horizontes do tipo A-C, ocorrendo em relevo plano ou suave-ondulado (0 a 8% de declive). Apresentam baixa

disponibilidade de nutrientes para as plantas, sendo, geralmente álicos e distróficos (Embrapa, 1978; Reatto et al., 2000, 2004) (Figura 18).

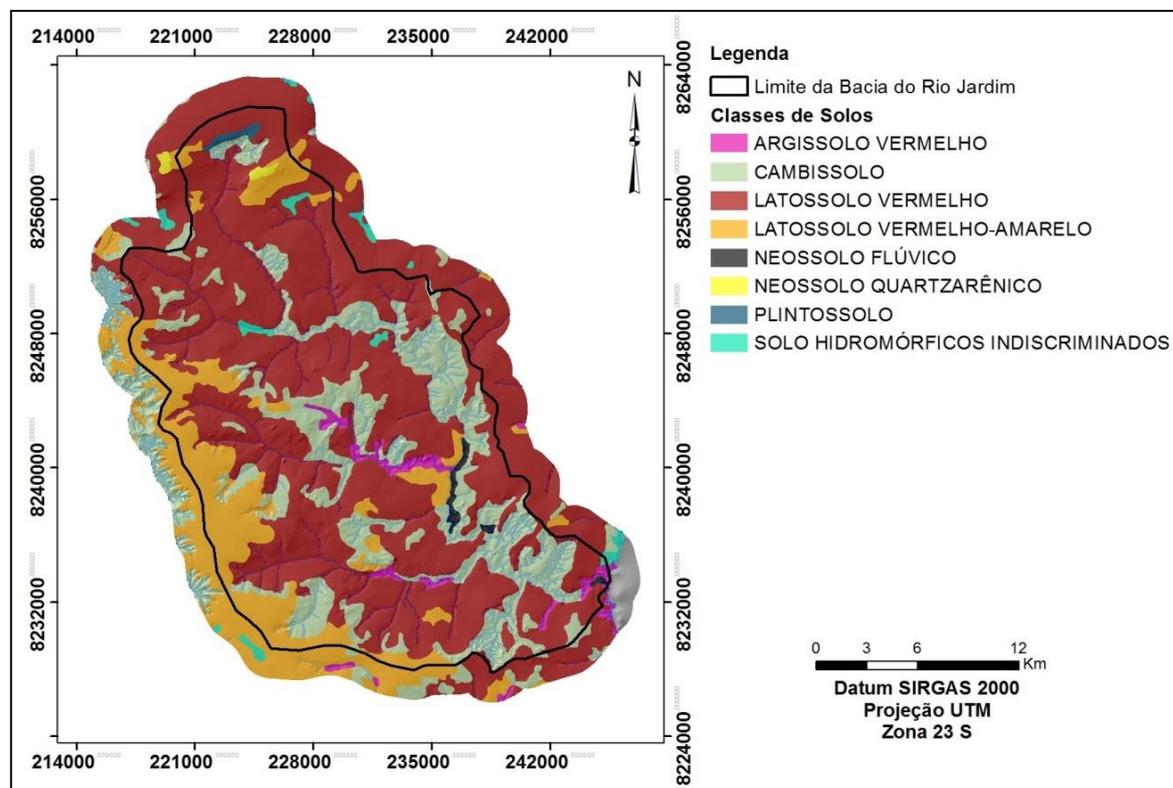


Figura 18. Mapa de solos da Bacia do Rio Jardim. Fonte: Adaptado de Embrapa (1978), com atualização da nomenclatura das ordens conforme Embrapa (2013).

VII.2.4. Delimitação da Bacia do Rio Jardim

Com a ajuda dos dados bibliográficos e planialtimétricos adquiridos, foi delimitada a área que compõe a bacia e gerado um arquivo em formato vetorial no programa ArcGIS 10 (ESRI, 2014). Também foi criado um arquivo vetorial de um buffer de 2 km contornando os limites definidos da bacia. Este arquivo foi criado para evitar a perda dos pixels localizados na região que contorna a bacia, no momento de gerar o recorte dos mapas temáticos e imagens Landsat 5-TM, assim como também as informações neles contidas.

VII.2.5. Caracterização e classificação dos solos representativos da Bacia do Rio Jardim

Mediante atividades preliminares de campo, foram realizadas verificações das relações pedomorfogeológicas existentes na bacia de estudo, ou seja: o padrão de distribuição dos solos em função da sua relação com as unidades geomorfológicas (feições do relevo tais como declividade, concavidade e altimetria) e material de origem (litologias do Grupo Paranoá, Canastra e Bambuí). Foram selecionadas cinco lito-topossequências (Embrapa, 1995) (Figura 19) consideradas representativas da distribuição dos solos na

paisagem, desenvolvendo-se a partir de litologias predominantemente pelíticas dos Grupos Paranoá, Canastra e Bambuí, todas com atuação de baixo grau metamórfico.

A primeira foi denominada de Lito-topossequência Estanislau, localizada na microbacia do Ribeirão Estanislau, entre as rodovias DF-130 e DF-455, abrangendo o Núcleo Rural de Tabatinga. A segunda, nomeada de Alto Rio Jardim, localiza-se na microbacia do Alto Rio Jardim, entre as rodovias DF-455, DF-120 e DF-355. A terceira, chamada de São Gonçalo, acha-se localizada na microbacia do Ribeirão São Gonçalo, entre as rodovias DF-355 e DF-322, compreendendo o Núcleo Rural de Tabatinga. A quarta, denominada de Barra Alta, encontra-se localizada no Núcleo Rural Tabatinga, entre as rodovias DF-260 e DF-232, sobre a margem esquerda do Rio Jardim. A quinta, nomeada de Lito-topossequência Cariru, localiza-se na microbacia do Ribeirão Cariru, entre as rodovias DF-270, DF-120 e DF-260 no Núcleo Rural PAD-DF (Figura 19).

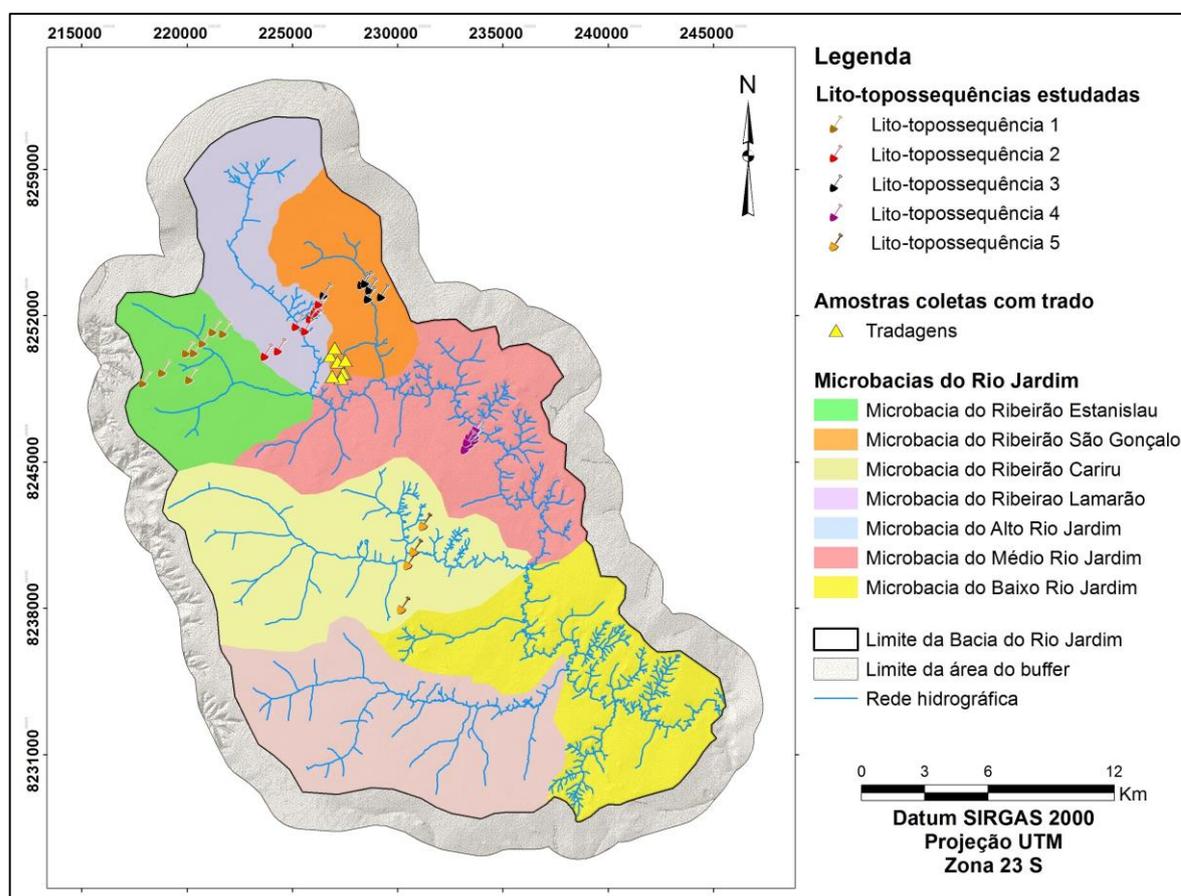


Figura 19. Localização das lito-topossequências da Bacia do Rio Jardim, DF. Fonte: Adaptado de CODEPLAN (1991).

Assim, ao longo das cinco lito-topossequências foram selecionados 32 pontos para descrição morfológica de perfis pedológicos, de acordo com Santos et al. (2013). Os perfis de solos foram expostos por meio de aberturas de trincheiras ou em cortes de barrancos.

As observações de campo, permitiram verificar a pouca variação dos atributos e classes de solos na Bacia do Rio Jardim, provavelmente em função da composição pelítica das litologias de origem, sendo portanto, o padrão pedo-evolutivo condicionado, principalmente, pela evolução geomorfológica da região.

Para a realização das análises laboratoriais, em função da pouca variação constatada dos atributos e classes de solos, foram selecionadas as lito-topossequências Estanislau e Alto Rio Jardim, uma vez que as microbacias correspondentes contemplam o desenvolvimento das classes de solos desenvolvidas e/ou influenciadas pelas litologias correspondentes aos três Grupos geológicos de ocorrência na área investigada.

Cabe salientar que, como a Bacia do Rio Jardim representa um grande polo de produção agrícola no DF (Ferreira, 2005; Carvalho e Lacerda, 2007), os solos são intensamente ocupados por agricultura, sendo seus atributos químicos alterados, particularmente no horizonte A.

Desta forma, foram coletadas 30 amostras de solo para análises laboratoriais do horizonte A e horizonte subsuperficial diagnóstico (B ou C) dos perfis pedológicos das Lito-topossequências Estanislau e Alto Rio Jardim.

Com o auxílio de um clinômetro, foram medidas as declividades dos terrenos onde os perfis de solos avaliados se localizam.

Adicionalmente, foram coletadas amostras de solo por intermédio de tradagens nas profundidades de 0-20 cm (horizonte A) e de 20-40 e 80-100 cm (horizonte B) próximas à confluência do Ribeirão Alto Rio Jardim e Estanislau, particularmente onde houve variação de classes de solos. Foram feitas tradagens em oito pontos diferentes e coletadas 17 amostras de solo para descrição morfológica.

Simultaneamente à descrição e coleta de solo, foram registradas as coordenadas dos perfis pedológicos e das tradagens por meio de GPS de navegação Garmin MAP 60CSX. Posteriormente, estas coordenadas foram digitadas em planilhas Excel e importados para o programa ArcGIS.

Todas as amostras coletadas dos perfis pedológicos formam parte do banco de dados do Laboratório de “Geoprocessamento” da Faculdade de Agronomia e Medicina Veterinária – FAV da Universidade de Brasília – UnB/DF.

As 30 amostras de solo coletadas dos horizontes A e B ou C, foram secas ao ar por um período de cerca de 72 horas, desterradas e peneiradas para a obtenção da fração menor que 2 mm, fração terra fina seca ao ar (TFSA). Esta foi submetida a análises físicas e químicas segundo Embrapa (1997) para caracterização e classificação no segundo ao quarto nível categórico (subgrupos) do SiBCS (Embrapa, 2013). Dessa forma, foram analisados os seguintes atributos (Embrapa, 1997):

- ✓ Natureza física: composição granulométrica (argila, silte e areia).

✓ Natureza química (do complexo sortivo): pH (H₂O); bases trocáveis (Ca⁺⁺, Mg⁺⁺, K⁺, Na⁺); soma de bases (SB = Ca⁺⁺+Mg⁺⁺+K⁺); alumínio trocável (Al³⁺); fósforo assimilável; acidez potencial (H⁺+Al³⁺); teor de MO e C_{org}; capacidade de troca de cátions (CTC = SB+[H⁺+Al³⁺]); porcentagem de saturação por bases (V% = [SB/CTC]*100); porcentagem de saturação por alumínio (m% = Al³⁺/[Al³⁺+SB]*100).

Também foram realizadas análises de espectroscopia de reflectância na faixa de 350 a 2.500 nm em laboratório para caracterização do padrão espectral (Demattê et al., 2014). Para isto, foram coletadas 29 amostras de solo do horizonte superficial A de perfis de solos localizados dentro das cinco Lito-topossequências estudadas, e 8 amostras de solo do horizonte superficial A dos pontos coletados com trado. Logo depois foi obtida a fração TFSA.

VII.2.6. Processamento digital de imagens Landsat 5-TM

Foi utilizada uma série histórica composta por dez imagens do satélite Landsat 5-TM referentes à órbita 221/ponto 71. Estas imagens, foram obtidas no período da estação seca, de maio a setembro, a partir do ano 1984 até o ano 2009, com intervalos entre elas que variaram de três a cinco anos. Esta variação foi função da porcentagem de cobertura por nuvens e da ocorrência de solos expostos de cada cena da área de estudo.

A partir da década de 80, com a expansão da fronteira agrícola no Brasil, os solos no DF tiveram conversão para o uso agrícola, com evolução do uso dos solos crescente até o presente, o que propiciou a ocorrência de solos expostos na região.

O manejo também sofreu alterações com a substituição do plantio convencional para o plantio direto, fazendo com que a cobertura vegetal e as áreas com solos expostos se apresentassem desigualmente distribuídas na área de estudo ao longo da série histórica avaliada.

O período de aquisição de imagens digitais foi limitado em função do intervalo de tempo no qual o L5-TM se manteve em funcionamento, desde 01/03/1984 com o seu lançamento até a sua desativação em 05/06/2013.

As imagens foram obtidas no site do Serviço Geológico dos Estados Unidos (<http://earthexplorer.usgs.gov/>), no nível de processamento 1-T, ortorretificado e com resolução radiométrica de 8-bits. O *datum* corresponde ao WGS84 compatível com o *datum* oficial brasileiro SIRGAS 2000 (IBGE, 2015). As imagens selecionadas para o estudo encontram-se listadas na Tabela 5.

A banda 6 não foi utilizada, pois cobre a faixa do comprimento de onda acima de 2.500 nm.

Tabela 5. Série histórica de imagens Landsat 5-TM da área de estudo.

Orbita/ponto	Data Aquisição
221/071	26/05/1984
221/071	04/08/1986
221/071	09/08/1988
221/071	02/08/1991
221/071	22/07/1993
221/071	02/06/1998
221/071	18/07/2003
221/071	22/09/2004
221/071	01/09/2008
221/071	03/08/2009

Todas as etapas de pré-processamento (correção atmosférica e geométrica) e processamento digital de imagens multiespectrais (recorte, índices, máscaras, análises espectrais) foram realizadas no programa ENVI (*Environment for Visualizing Images*) (Exelis, 2015c).

O pré-processamento digital de imagens teve como finalidade melhorar a aparência visual das imagens, facilitando a extração de informações nelas contidas. Para normalizar os dados digitais e eliminar os efeitos aditivos da atmosfera, aplicou-se a correção atmosférica baseada no módulo FLAASH, disponível no programa ENVI (Exelis, 2015d). Esta correção se faz necessária visto que foi utilizada uma série histórica de imagens Landsat, adquiridas em condições atmosféricas diferentes. Esta técnica se compõe das seguintes etapas, de acordo com Chander et al. (2009):

- a) Normalização dos números digitais (ND) da imagem em radiância (topo da atmosfera) (Exelis, 2015a) por intermédio da ferramenta *Radiometric Calibration*, a qual utiliza a equação 5:

$$L_{\lambda} = \left(\frac{LMAX_{\lambda} - LMIN_{\lambda}}{ND_{max} - ND_{min}} \right) \cdot (ND - ND_{min}) + LMIN_{\lambda} \quad \text{Eq. 5}$$

Onde L_{λ} é a radiância espectral aparente, em $Wm^{-2}sr^{-1}\mu m^{-1}$ (Watts por metro quadrado por esterradiano por micrômetro); ND é o número digital do pixel considerado; ND_{min} é o número digital mínimo, correspondente a $LMIN_{\lambda}$; ND_{max} é o número digital máximo, correspondente a $LMAX_{\lambda}$; $LMIN_{\lambda}$ é a radiância espectral mínima que o sensor é capaz de registrar, em $Wm^{-2}sr^{-1}\mu m^{-1}$; $LMAX_{\lambda}$ é a radiância espectral máxima que o sensor é capaz de registrar, em $Wm^{-2}sr^{-1}\mu m^{-1}$ (Moreira, 2007; Chander et al., 2009).

- b) Transformação da imagem de radiância em reflectância aparente (reflectância no topo da atmosfera), mediante a equação 6 descrita por Chander et al. (2009):

$$\rho_{\lambda} = \frac{\pi \cdot L_{\lambda} \cdot d^2}{ESol_{\lambda} \cdot \cos\theta_s} \quad \text{Eq. 6}$$

Onde, ρ_λ é a reflectância aparente ou de topo da atmosfera (adimensional); L_λ é a radiância espectral aparente ($Wm^{-2}sr^{-1}\mu m^{-1}$); d^2 é a distância Sol-Terra em unidade astronômica; $ESol_\lambda$ é a irradiância solar exoatmosférica média no topo da atmosfera ($Wm^{-2}\mu m^{-1}$); e θ_s é o ângulo zenital solar (graus) no horário de aquisição da imagem.

c) Transformação da imagem de reflectância aparente em reflectância de superfície, mediante o módulo FLAASH (*Fast Line-of-sight Atmospheric Analysis of Spectral Hypercubes*) (ENVI, 2009; Exelis, 2015c) que se baseia no código de transferência radiativa MODTRAN4 (*Moderate Resolution Atmospheric Radiance and Transmittance Model*) (Adler-Golden et al., 1998; Cooley et al., 2002), eliminando-se, assim, os efeitos aditivos atmosféricos que ocasionam perda de contraste na imagem (Nazeer et al., 2014). Por ser um método físico, é fundamental o conhecimento de parâmetros que forneçam dados reais das condições óticas da atmosfera no momento em que a imagem de satélite foi capturada. Esses parâmetros correspondem a dados das efemérides do satélite, tais como data e horário de aquisição, a latitude e longitude da cena, juntamente com outros parâmetros de modelagem atmosférica, como a elevação média da superfície, ângulo solar, modelo de atmosfera, tipo de aerossol, concentração de CO_2 e alcance da visibilidade inicial (Novo, 2010). Alguns destes dados estão disponíveis no portal GIOVANNI da NASA (<http://disc.sci.gsfc.nasa.gov/giovanni>). Para a correção foram estabelecidos os seguintes parâmetros: elevação média da superfície de aproximadamente 950 m (extraído do MDT); modelo de atmosfera tropical; tipo de aerossol rural; alcance da visibilidade inicial de 50 km.

d) Logo, o módulo FLAASH inicia o tratamento das imagens aplicando a equação 7 (Cooley et al., 2002):

$$L_{\text{sensor}} = \left(\frac{A\rho}{1 - \rho_e S} \right) + \left(\frac{B\rho_e}{1 - \rho_e S} \right) + L_{\text{atm}} \quad \text{Eq. 7}$$

Onde L_{sensor} é radiância total medida no sensor; ρ é a refletância de superfície do alvo (no pixel); ρ_e é a média da refletância de superfície do alvo (no pixel) e sua vizinhança; S é o albedo esférico da atmosfera, L_{atm} é a radiância (aditiva) da contribuição do espalhamento atmosférico; A e B são coeficientes determinados pelas condições atmosféricas e geométricas da cena. O valor dos coeficientes A , B , S e L_{atm} é diretamente determinado pelo código MODTRAN4 para uma dada condição atmosférica, e assim, determinar a radiância da superfície (para cada pixel em cada banda), e em seguida, a reflectância de superfície (Cooley et al., 2002; ENVI, 2009; Gomes et al., 2012).

O resultado da correção atmosférica é uma imagem onde o nível de cinza ou número digital mínimo (valor zero), presente na imagem, passou a corresponder à reflectância 0% e,

o maior nível de cinza (255) à reflectância 100%. Desta forma, dados em reflectância podem ser comparados entre si (Fortes et al., 2009).

Após finalização da correção atmosférica, foi aplicada a correção geométrica, de acordo com procedimentos descritos por Lillesand et al. (2007). Com esta técnica, o posicionamento da imagem foi adequado mediante pontos de controle obtidos no campo com equipamento GPS (*Global Position System*).

Finalmente, as imagens Landsat corrigidas foram recortadas pelo arquivo buffer da Bacia do Rio Jardim.

VII.2.7. Geração de imagens de solo exposto

Para a geração da imagem composta de solos expostos, foram aplicadas técnicas que permitiram detectar áreas com solos expostos nas imagens de satélite da série histórica estudada, e assim, avaliar se a imagem adquirida seria adequada para o estudo, em função da quantidade de área com solo exposto na imagem. Somente após isso, a imagem seria selecionada e gerada a máscara de solo exposto correspondente (Figura 20).

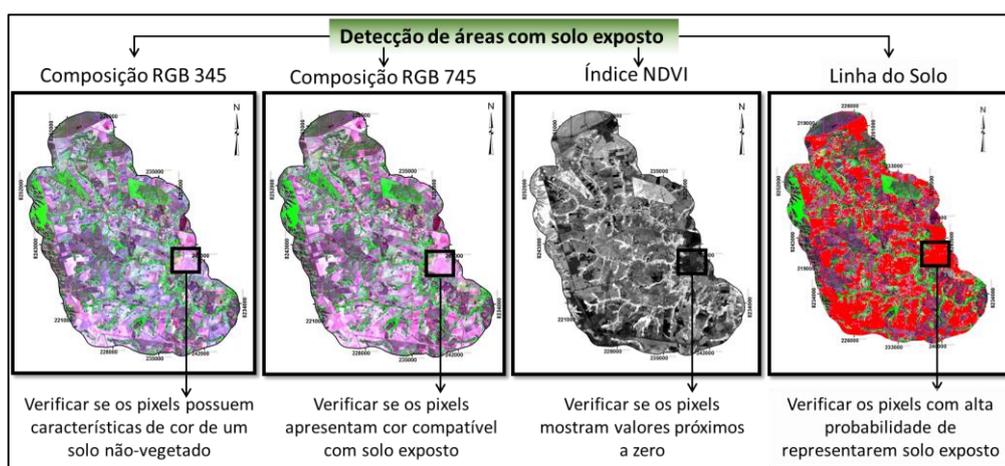


Figura 20. Metodologias para a detecção de áreas com solo exposto por meio do programa ENVI 5.2 em imagens Landsat 5-TM. Fonte: Adaptado pelo autor.

Primeiramente, foi feita a composição de bandas RGB 345 e 745 para destacar vegetação, solo e água, e assim, detectar áreas com solos expostos nas imagens da região estudada. A banda TM3 situa-se na região de forte absorção pela vegetação verde e de reflexão da água, permitindo bom contraste entre áreas ocupadas com vegetação e aquelas sem vegetação (solo exposto) (Meneses, 1986). A banda TM4 situa-se na região de forte absorção da água limpa, na qual a vegetação verde, densa e uniforme reflete muito a energia, aparecendo em tons de cinza claro nas imagens (Meneses, 1986). As bandas TM5 e TM7 se posicionam na região de forte reflexão de solos ou rochas e elevada absorção da vegetação sadia, permitindo alto contraste entre estes alvos (Novo, 2010) (Figura 21).

Estas composições permitem verificar se os pixels seleccionados possuem as características de cor de um solo não-vegetado. Dessa forma, as bandas utilizadas foram escolhidas por estarem situadas nas regiões de maior diferença de reflectância (maior contraste) entre os alvos de estudo, como exemplificado na Figura 20.

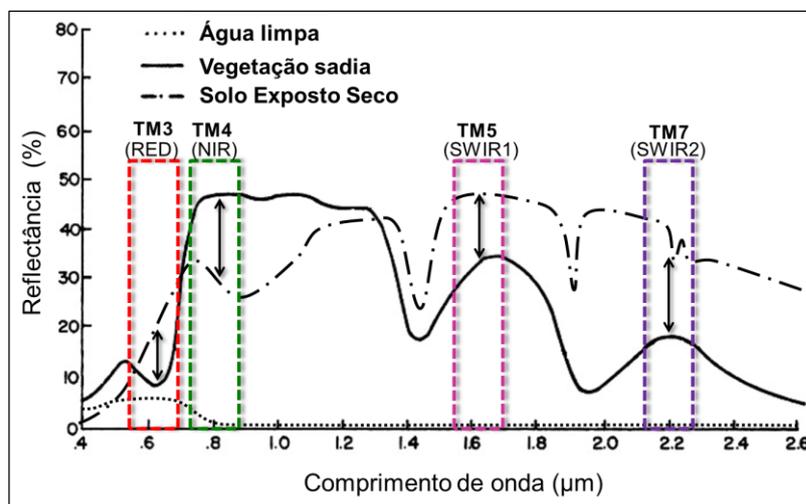


Figura 21. Espectros de reflectância da água limpa, vegetação sadia e solo exposto seco e as posições das bandas espectrais TM3, TM4, TM5 e TM7 do L5, utilizadas nas composições RGB 345 e 745. Fonte: Adaptado de Phillips et al. (1978).

Em seguida, foi aplicado o NDVI - *Normalized Difference Vegetation Index* (Rouse et al., 1973) que salienta a reflectância da vegetação e melhora a distinção entre solos e demais alvos presentes (vegetação e água) nas imagens L5-TM (Ferreira et al., 2003; Moreira, 2007; Schowengerdt, 2007; Meneses e Almeida, 2012). Este índice é descrito pela equação 8:

$$NDVI = \frac{NIR - RED}{NIR + RED} \quad \text{Eq. 8}$$

Onde RED é a reflectância do pixel na banda do vermelho, e NIR é a reflectância do pixel na banda do infravermelho próximo. Este índice é proporcional à biomassa presente e varia entre +1 e -1. Para áreas de densa vegetação, o NDVI se aproxima de +1, para áreas com total ausência de vegetação (água) se aproxima de -1, e para solos expostos, os valores se aproximam de zero.

Para checar a detecção de áreas com solo exposto, foi obtida a linha do solo (Baret et al., 1993; Nanni e Demattê, 2006a; Jensen, 2009; Yoshioka et al., 2010). Um diagrama de dispersão bidimensional foi gerado, contrapondo os valores de reflectância obtidas diretamente das imagens L5-TM nas bandas TM3 e TM4. A linha do solo começa entre o eixo "X" e eixo "Y" a 45 graus de inclinação, apresentando correlação linear (1:1). Desta forma, quanto mais perto da linha 1:1, maior a probabilidade do pixel apresentar solo exposto.

Assim, foram marcados os pontos perto da linha 1:1 (dentro do triângulo vermelho na Figura 22) no escatergrama elaborado, onde foram selecionados os pixels com alta probabilidade de apresentarem solos expostos na imagem, obtendo-se a linha do solo.

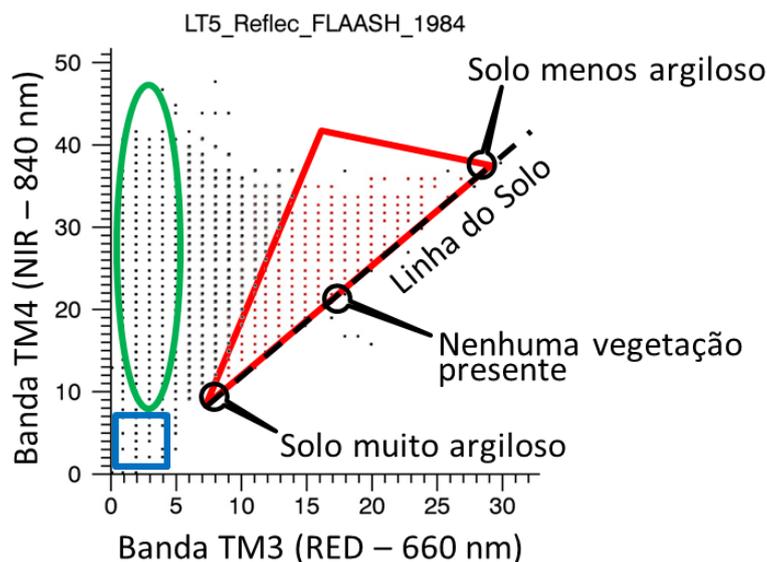


Figura 22. Diagrama de dispersão bidimensional, elaborado no programa ENVI, representando a linha do solo por meio da contraposição da banda TM3 e TM4 da imagem L5-TM. Em vermelho, área de ocorrência dos pixels de solo exposto. Em verde, com valores de reflectância baixos no visível e altos no infravermelho, representa a região de ocorrência dos pixels ocupados por maiores proporções de cobertura vegetal. Em azul, valores de reflectância baixos no VIS e no NIR, correspondem os pixels dentro dos quais estariam os corpos de água e regiões sombreadas da imagem. Fonte: elaborado pelo autor.

Após estas análises, as imagens L5-TM selecionadas foram utilizadas para a individualização de solos expostos de outros alvos presentes nas imagens (vegetação, água, sombra e áreas de queimadas).

Para classificar a vegetação, foi utilizada a ferramenta *SPEAR Vegetation Delineation*, no ENVI, a qual gera a imagem NDVI e a classifica em quatro classes, sendo utilizados os seguintes valores categóricos (limiares) padrão do programa ENVI: não vegetado (água e solo exposto): -1 a 0,35; vegetação esparsa/rala: 0,35 a 0,50; vegetação moderada: 0,50 a 0,70; vegetação densa: 0,70 a 1 (Exelis, 2015g). O limiar que representa a classe não vegetado foi aumentado de 0,30 para 0,35, usando como referência a área de estudo e os rios.

A água foi classificada mediante a ferramenta *Classification Workflow* no ENVI, a qual efetua uma classificação supervisionada separando a água dos diferentes alvos presentes na imagem (Exelis VIS, 2015b).

Nas áreas cultivadas com plantio direto, a palhada, que são os restos culturais em decomposição, e o solo totalmente exposto geralmente apresentam reflectância espectral

similar (Biard e Baret, 1997; Nagler et al., 2000; Streck et al., 2002). Para caracterizar o contraste entre solo exposto e coberto com palhada, foi utilizada a diferença normalizada entre as bandas TM5 e TM7 (Equação 9), denominado como ND57 (Fongaro, 2015). Um valor limiar do índice ND57 foi utilizado em cada imagem para contrastar a resposta espectral do solo coberto com palhada e do solo exposto, de acordo com Fongaro (2015) e Gallo (2015) (Figura 23).

$$ND57 = \frac{SWIR1 - SWIR2}{SWIR1 + SWIR2} \quad \text{Eq. 9}$$

Onde SWIR-1 é a radiância do pixel na banda do infravermelho de ondas curtas (TM5), e SWIR-2 é a radiância do pixel na banda do infravermelho de ondas curtas (TM7). Este índice contrasta solo exposto e solo coberto com palhada.

Após a classificação da vegetação e da água e gerado o índice ND57 para realçar o contraste entre solos cobertos com palhada e solos expostos, foram geradas as máscaras correspondentes. Para isso, utilizou-se a ferramenta *Build Mask* do ENVI (Exelis, 2015f), colocando como arquivos de entrada os produtos derivados da classificação da vegetação e da água, e o ND57 com os seus respectivos valores limiares de corte (Figura 23), resultando numa máscara contendo vegetação, água e palhada (Figura 24), de acordo com Fongaro (2015) e Gallo (2015).

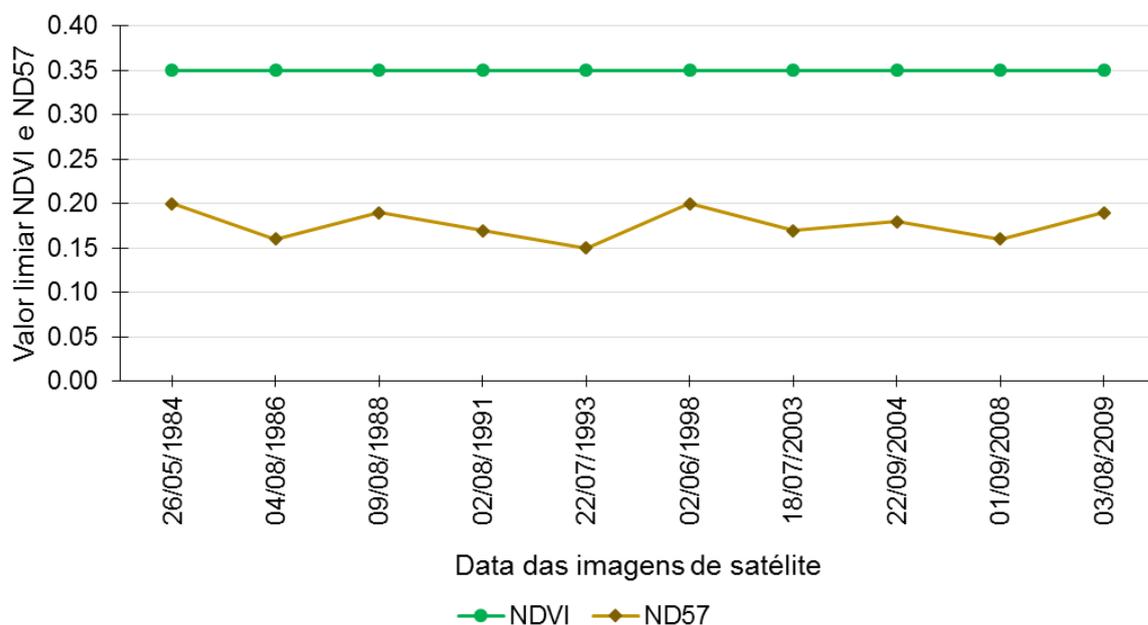


Figura 23. Valores limiares do NDVI e ND57 para cada imagem de satélite na obtenção das máscaras de solo exposto. Fonte: Adaptado pelo autor.

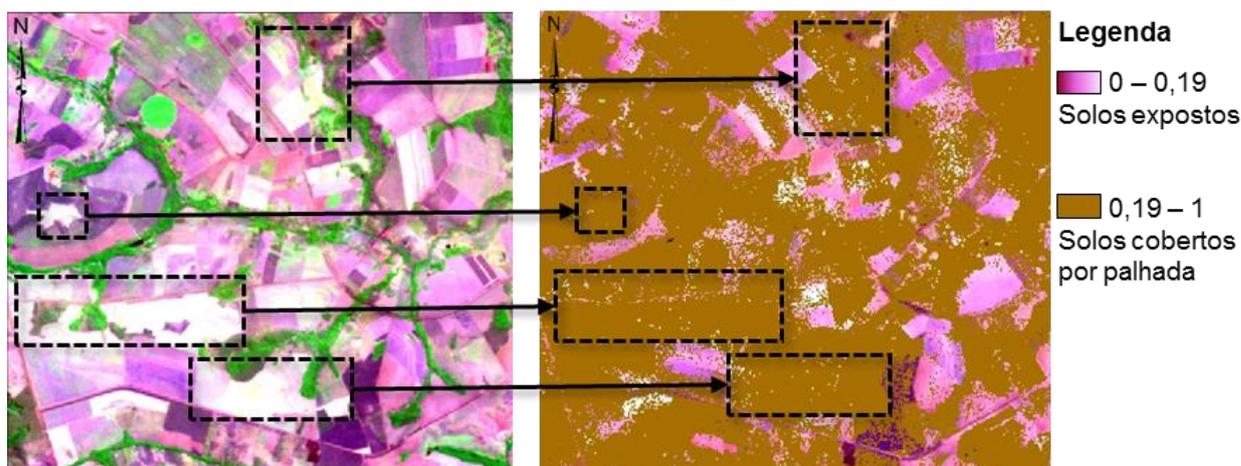


Figura 24. Recorte de uma das imagens do satélite L5-TM de 2009 utilizadas no estudo e correspondente máscara aplicada sobre a vegetação, água e palhada. Os quadros em linha preta indicam as áreas com solos cobertos por palhada que foram mascaradas por meio dos valores limiares do índice ND57. Fonte: Adaptado pelo autor.

Consecutivamente, as máscaras geradas, uma para cada imagem da série histórica, foram aplicadas diretamente sobre as imagens correspondentes, permitindo isolar as áreas com solos expostos. Pixels que apresentaram vegetação rala, moderada e densa, água e palhada foram mascarados mantendo-se somente pixels com áreas de solos expostos (Figura 24). Para tal fim, foi empregada a ferramenta *Apply Mask* do ENVI (Exelis, 2015f). As imagens geradas são compostas por polígonos que mostram a distribuição espacial das áreas ocupadas com solos expostos (Lamparelli et al., 2011; Trentin et al., 2011; Johann et al., 2012; Puglieri et al., 2013; Paludo et al., 2014), correspondentes à data na qual cada imagem foi adquirida. Essas imagens de solo exposto foram exportadas para o programa ArcGIS e calculadas as suas áreas.

VII.2.8. Geração de imagem composta de solos expostos

Para a geração de uma imagem composta (IC) a partir da associação de várias imagens de épocas diferentes devem ser considerados vários critérios, particularmente a umidade dos solos, visto que a reflectância diminui com o aumento da umidade dos solos (Baumgardner et al., 1985; Lobell e Asner, 2002; Weidong et al., 2002). Apesar das imagens deste estudo terem sido adquiridas no período da seca na região, ou seja, de maio a setembro, outras fontes artificiais e precipitações localizadas podem ter interferido na umidade dos solos nas imagens.

Para abranger todos critérios que alteram a reflectância dos solos, tal como a umidade, para a geração de imagem composta da área de estudo foi utilizada uma metodologia desenvolvida recentemente no Laboratório de Sensoriamento Remoto e Geoprocessamento Aplicado a Solos, coordenado pelo Prof. Dr. José Alexandre Melo Demattê, do Departamento

de Ciência do Solo da Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiróz” da Universidade de São Paulo (LSO-ESALQ-USP).

Essa metodologia é considerada rápida, sendo capaz de escolher o pixel que melhor represente o solo exposto em uma imagem de satélite, dentre um conjunto de imagens, tais como as imagens da série histórica deste estudo, no processo de elaboração da IC (Fongaro, 2016).

Nesta metodologia, no processo de geração da IC, são selecionados em cada imagem avaliada da série histórica, os pixels que representam solos expostos secos, a fim de uniformizar a condição de umidade dos solos. De acordo com Haubrock et al. (2008), os melhores comprimentos de onda para quantificar o conteúdo de água na superfície do solo são 1.800 nm (SWIR-1 – L5-TM5) e 2.119 nm (SWIR-2 – L5-TM7). Assim, para identificar os pixels de solos expostos secos, foi utilizado o menor valor da razão da diferença normalizada entre bandas TM5 e TM7, que corresponde ao ND57 (Fongaro, 2015). Como a ocorrência de cobertura de palhada também interfere na resposta espectral dos solos, a aplicação do ND57 também elimina, da IC, os pixels que representam solos cobertos por palhada, selecionando os pixels da imagem que representam somente solos expostos.

Deste modo, quando as imagens estudadas apresentavam pixels dispostos na mesma posição, que representavam áreas de ocorrência de solos expostos, foram selecionados os pixels da imagem que apresentaram o menor valor de ND57, indicando menor teor de umidade e ausência de cobertura por palhada dos solos expostos. Portanto, esta imagem foi selecionada para a realização da imagem composta.

Estes processamentos espectrais que permitiram a geração da IC fidedigna de solos expostos, foram incorporados no programa R (R Core Team, 2015) por meio de um conjunto de instruções condicionais ou comandos (script), desenvolvido por Fongaro (2015). Utilizaram-se, como arquivos de entrada, as imagens representativas da diferença normalizada entre as bandas TM5 e TM7 (ND57) e as imagens de solos expostos, todas obtidas a partir dos processamentos espectrais executados em cada imagem da série histórica selecionada para o estudo.

Cada elemento da imagem pode ter de zero a dez pixels, pois a série histórica utilizada é composta por um grupo de dez imagens. Como critério de seleção, foi extraído o pixel que apresentou o menor valor do índice ND57 das imagens de solo exposto para cada posição espacial (Figura 25).

Logo depois, a imagem foi exportada para o programa ArcGIS e calculada a área total de solo exposto da área de estudo.

Adicionalmente, a metodologia gera para cada imagem de solo exposto utilizada, uma imagem com os pixels correspondentes que foram escolhidos para compor a IC. Por meio

destas imagens, que foram exportadas para o programa ArcGIS pode-se calcular as áreas de contribuição de solo exposto na IC de cada imagem, com sua respectiva data da aquisição.

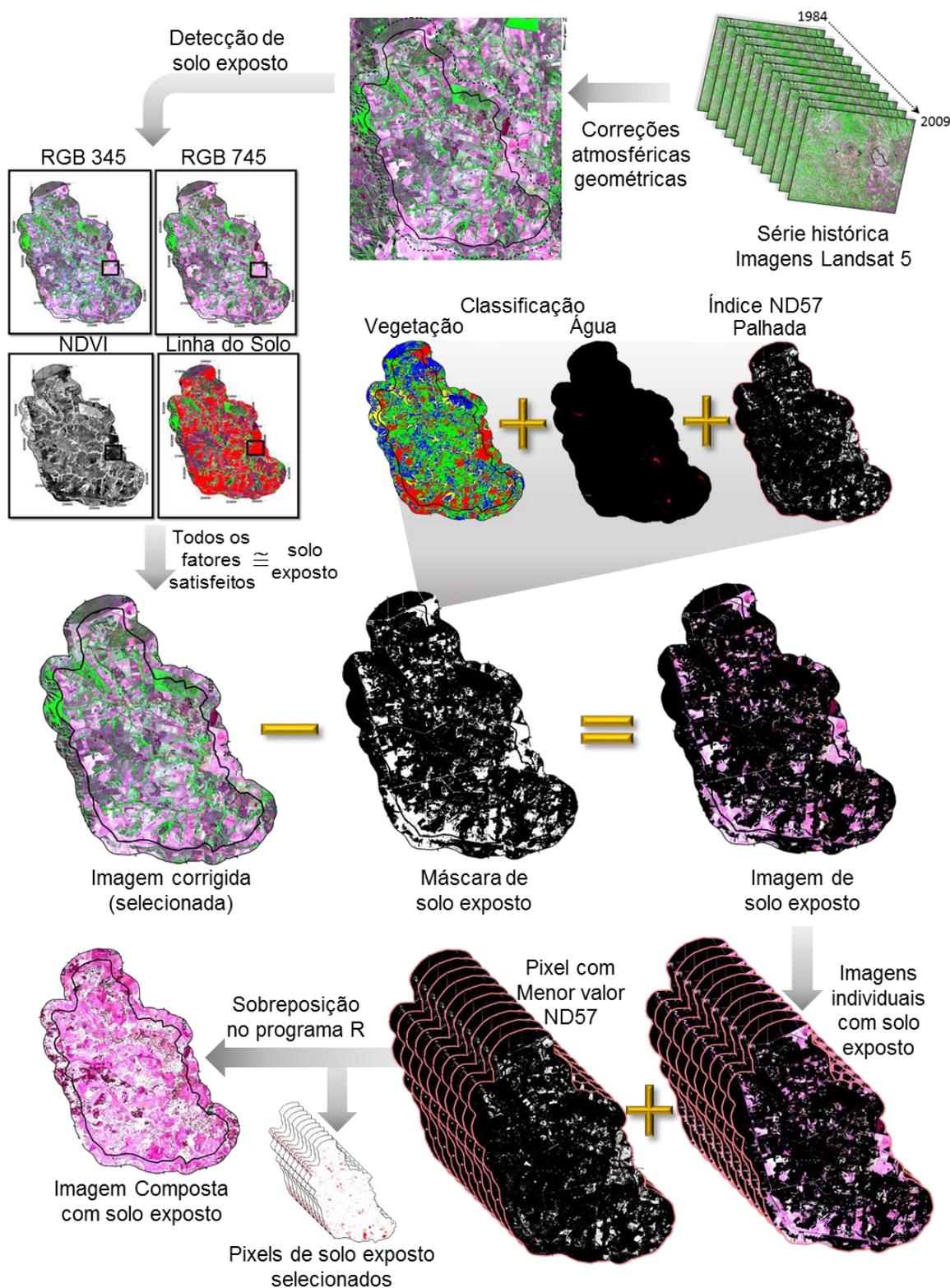


Figura 25. Fluxograma mostrando a metodologia utilizada para gerar a imagem composta de solos expostos. NDVI = Índice de vegetação por diferença normalizada; ND57 = Índice entre as bandas TM5 e TM7 por diferença normalizada. Fonte: elaborado pelo autor.

VII.2.9. Obtenção de dados espectroscópicos de solos sob condições de laboratório

A fração TFSA das amostras coletadas na fase de caracterização dos solos foram encaminhadas ao Departamento de Ciência do Solo da Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiróz” (LSO-ESALQ-USP) no Laboratório de Sensoriamento Remoto e Geoprocessamento Aplicado a Solos, coordenado pelo Prof. Dr. José Alexandre Melo Demattê, para obtenção dos dados de reflectância por meio do espectrorradiômetro *FieldSpec® Pro* (ASD INC, 2002). Trata-se de um sensor cuja resolução espectral é de 3 nm nos comprimentos de onda de 350 a 700 nm e de 10 nm na faixa de 700 a 2.500 nm, sendo todos esses valores interpolados pelo sensor para um intervalo de 1 nm (Bellinaso et al., 2010). A coleta dos dados espectrais foi realizada em um ambiente de laboratório escuro para minimizar os efeitos aditivos da atmosfera (Nawar et al., 2015).

As amostras de TFSA dos solos foram alocadas e distribuídas de forma homogênea em placas de petri com diâmetro de 9 cm, formando uma camada com espessura de 1,5 cm, a fim de que a superfície estivesse plana para as leituras, conforme descrito por Bellinaso et al. (2010). Foram feitas três leituras da reflectância de cada amostra (350-2.500 nm) obtidas em posições diferentes rotacionando a placa de petri de cada amostra (Nawar et al., 2015).

A fonte de captação luminosa do equipamento foi posicionada verticalmente a uma distância de 8 cm da amostra, onde foi medida a energia refletida numa área de aproximadamente 2 cm² no centro da amostra. A fonte de iluminação é constituída por duas lâmpadas de filamento Halógenas de Quartzó-Tungstênio de 50 W, posicionadas a 35 cm da amostra em suportes refletores de alumínio, orientadas a 30° da horizontal (ângulo de incidência) (Figura 26). Utilizou-se, como padrão de referência absoluto, para calibrar o equipamento, uma placa de espectralon branca (BaSO₄) considerada maior que 99 % de reflectância (Labsphere, 2015). Para evitar o efeito de ruído nas leituras, o sensor foi calibrado no início e a cada 20 minutos ou 20 amostras. A geometria dos equipamentos e a metodologia utilizada correspondem ao protocolo de uso padrão do laboratório (LSO-ESALQ-USP) para a elaboração da Biblioteca Espectral de Solos do Brasil - BESB (Bellinaso et al., 2010; Franceschini et al., 2013; Demattê et al., 2014; Sato, 2015) (Figura 26).

Os dados espectrais das amostras de solo são armazenados pelo programa *RS₃TM* (ASD INC, 2008) e salvos automaticamente em arquivos de dados com extensão *.asd*. Após o término das leituras das amostras de solo, os arquivos de dados foram importados no programa *ViewSpecTM Pro* (ASD INC, 2008b) onde foram processados e salvos em arquivos de texto no formato ASCII, compatíveis com o programa Excel.

Posteriormente, esses arquivos de texto com as informações espectrais foram importados em planilhas Excel e calculadas as médias para cada amostra de solo. Com esses dados foram elaborados os gráficos correspondentes às curvas espectrais (reflectância

versus comprimento de onda) (Nanni e Demattê, 2006b; Demattê et al., 2007, 2009; Fiorio et al., 2010; Cezar et al., 2013).

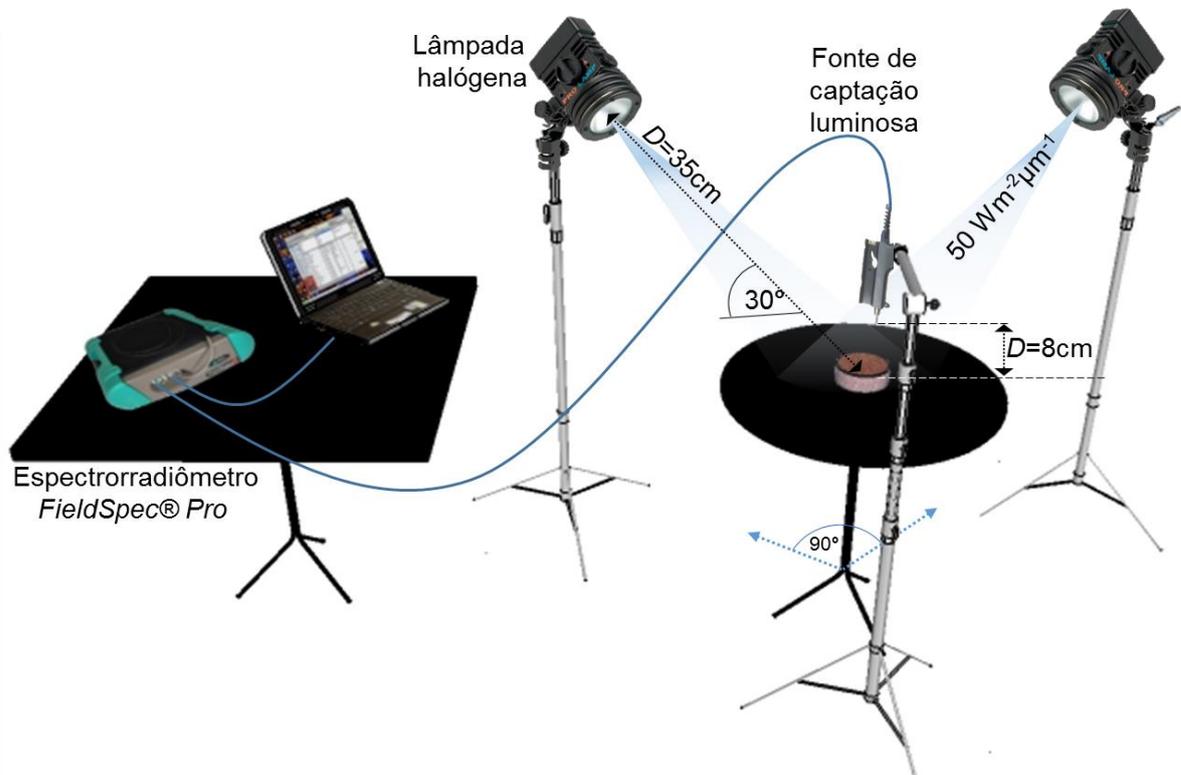


Figura 26. Esquema da geometria dos equipamentos utilizada na obtenção dos dados espectroscópicos sob condições de laboratório. D , distância. Fonte: Adaptado de Bellinaso et al. (2010) e Demattê et al. (2014).

VII.2.10. Elaboração da biblioteca espectral de solos da área de estudo

Os espectros médios obtidos na etapa anterior foram reunidos em gráficos, por classe de solo, para visualização das curvas espectrais. Estas curvas foram, então, avaliadas pela comparação da forma, intensidade (fator de reflectância) e feições de absorção dos espectros médios, conforme Demattê (2002). Segundo Epiphanyo et al. (1992), as curvas espectrais de solos variam tanto na configuração da forma como na magnitude do fator de reflectância, em função dos seus constituintes. Desta forma, espectros que apresentaram características similares foram agrupados por classes ou grupos espectrais (Figura 27). Uma vez determinados os diferentes agrupamentos, foram calculadas as médias dos espectros agrupados em cada classe espectral. Então, uma classe de solo pode ter uma ou várias classes de espectros, em função dos grupamentos feitos (Figura 27).

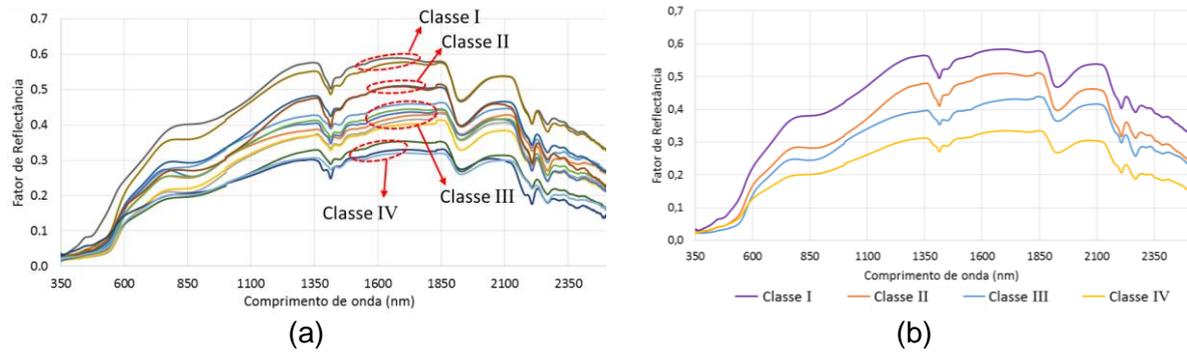


Figura 27. Agrupamento de espectros por classe: curvas espectrais de uma mesma classe de solo (a) e curvas espectrais médias de cada agrupamento (b). Fonte: Adaptado de Demattê e Nanni (2003), Franceschini et al. (2013) e Genú et al. (2013).

As curvas espectrais do solo foram caracterizadas de forma qualitativa ou descritiva (Demattê, 2002). A análise morfológica do espectro foi proposta por Demattê (2002), que considera aspectos da curva como forma, albedo, inclinação e feições de absorção (Figura 28).

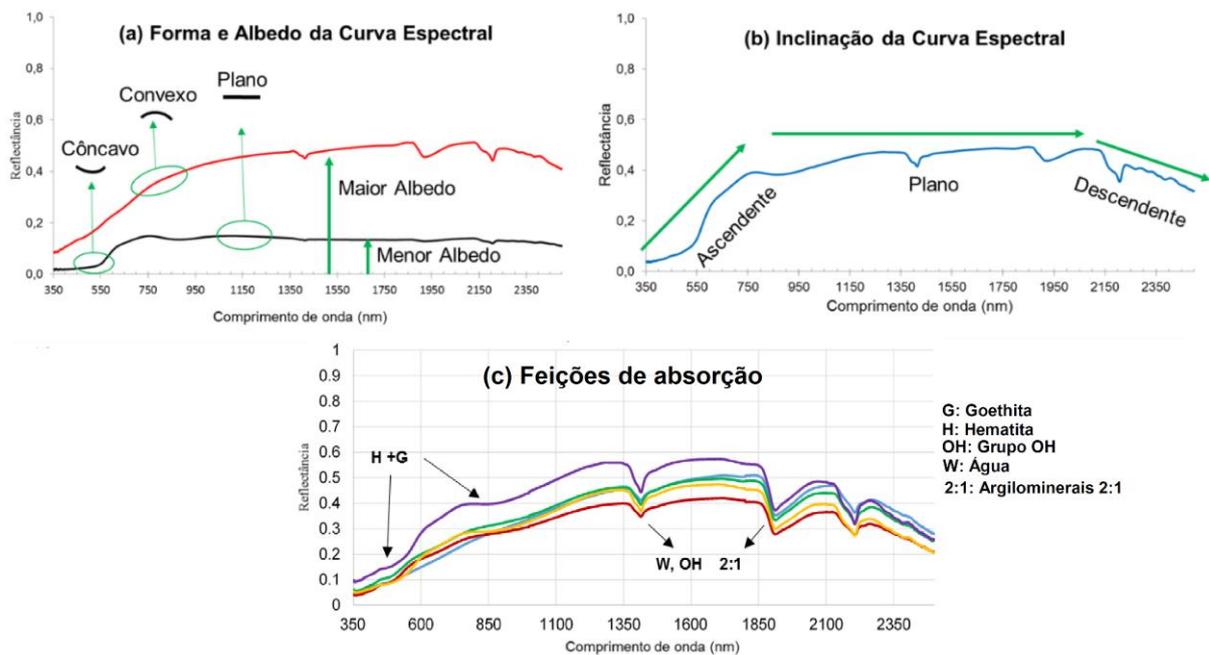


Figura 28. Método de avaliação qualitativa de curvas espectrais de solos, (a) forma e albedo, (b) Inclinação, (c) Feições de absorção. Fonte: Adaptado de Demattê et al. (2014) e Sato (2015).

Com os espectros obtidos para as distintas classes de solos estudados, foi elaborada a biblioteca espectral de solos mediante a ferramenta *Spectral Library Builder* no ENVI (Exelis, 2015h). Para poder comparar esses dados terrestres (espectrorradiômetro) com orbitais (satélite), foram simuladas as bandas do L5-TM (Demattê e Nanni, 2003; Nanni e Demattê, 2006a, b) mediante a ferramenta *Spectral Library Resampling* do ENVI (Exelis VIS, 2015h).

Então, foram determinadas as médias dos valores de reflectância obtidos nos intervalos espectrais das bandas do L5-TM (nm) a partir de filtros pré-definidos (Demattê et al., 2004):

- Banda 1 - Azul (450–520 nm),
- Banda 2 - Verde (520–600 nm),
- Banda 3 - Vermelho (630–690 nm),
- Banda 4 - Infravermelho próximo - NIR (760–900 nm),
- Banda 5 - Infravermelho de ondas curtas – SWIR-1 (1.550–1.750 nm), e
- Banda 7 - Infravermelho de ondas curtas – SWIR-2 (2.080–2.350 nm).

VII.2.11. Mapeamento espectral de solos da Bacia do Rio Jardim

De acordo com Ponzoni et al. (2012) e Genú et al. (2013), imagens de sensoriamento remoto quase sempre apresentam uma combinação de pixels puros e misturados, em função da resolução espacial do sensor. Desta forma, a resposta espectral de um pixel é o resultado da combinação da resposta espectral de cada um dos materiais contidos nesse pixel, sendo essa mistura espectral, portanto, indesejada (Ponzoni et al., 2012).

Em função desse problema, para este trabalho, dois modelos lineares foram utilizados para modelar essa condição de mistura. O primeiro foi o modelo de Análise de Mistura Espectral (*Spectral Mixture Analysis – SMA*), proposto por Shimabukuro e Smith (1991), e o segundo foi o modelo de Análise de Mistura Espectral com Múltiplos Endmembers (*Multiple Endmember Spectral Mixture Analysis – MESMA*), proposto por Roberts et al. (1998). Para ambos modelos foram utilizados no total treze *endmembers* (LV-I, LV-II, LV-III, LV-IV, LVA-I, LVA-II, RR-I, RR-II, CX, FX, FF-I, FF-II, FF-III), determinados na etapa anterior.

As classes de solos Gleissolo e Organossolo foram desconsideradas do mapeamento espectral, visto que a Bacia do Rio Jardim apresenta vales encaixados com escassas áreas de planície de inundação (Freitas-Silva e Campos, 1998a). Esses solos hidromórficos são de ocorrência restrita na bacia de estudo (Reatto et al., 2000). Áreas de possível ocorrência destes solos, em torno de drenagens e pequenos córregos, associadas a mata de galeria (Freitas-Silva e Campos, 1998a), foram mascaradas pela metodologia de obtenção de imagens de solo exposto (Fongaro, 2015; Gallo, 2015).

VII.2.11.1. Modelo de Análise de Mistura Espectral (SMA)

O modelo de Análise de Mistura Espectral é uma ferramenta de processamento digital de imagens que permite separar as proporções relativas de cada material dentro de um pixel, a partir de um conjunto de *endmembers* (Ponzoni et al., 2012). Consequentemente, esta metodologia exige a compreensão da paisagem a ser analisada em termos de sua estrutura, forma e distribuição. Como resultado, obtém-se algo semelhante a uma “classificação suave”

para cada componente analisado, onde áreas claras ou mais escuras na imagem indicam, respectivamente, maior ou menor proporção do alvo em estudo (Schowengerdt, 2007)

O modelo também gera uma imagem erro (RMSE – *Root Mean Square Error*), que tem como função principal indicar a qualidade dos *endmembers* utilizados no modelo, onde áreas claras ou mais escuras na imagem indicam maior ou menor exatidão de classificação pelo método SMA (Ferreira, 2003).

Assim, para individualizar as classes de solos da área de estudo, foi usada a ferramenta *Linear Spectral Unmixing* no ENVI 5.2 (Exelis, 2015e), utilizando como dados de entrada a imagem Landsat, composta de solos expostos, e a biblioteca espectral de solos gerada, reamostrada nos intervalos espectrais das bandas do L5-TM.

Exelis (2015e) recomenda que o número de *endmembers* utilizados em um SMA seja igual ao número de bandas disponíveis na imagem multiespectral utilizada menos um.

De acordo com Schweik e Green (1999), no caso do sensor L5-TM, o número de *endmembers* usados em um SMA não deve ultrapassar a cinco, quando utilizadas as bandas TM1, TM2, TM3, TM4, TM5 e TM7.

Por isso, esta metodologia foi aplicada a diferentes combinações de *endmembers*, respeitando o número máximo de combinações (cinco para o L5-TM), até conseguir desmisturar os espectros com o menor erro possível.

Uma vez obtidas as imagens fração, foram somadas para cada classe de solo mediante a ferramenta *Raster Calculation* no ArcGIS 10 (ESRI, 2014), com o intuito de gerar uma única imagem por cada classe de solo estudada. Esta imagem foi suavizada mediante um filtro por convolução estatístico de mediana, utilizando uma máscara de tamanho 7x7 (Meneses e Santa Rosa, 2012), e os valores categorizados para elaboração do mapa da classe de solo correspondente.

Uma limitação do SMA é que considera todos os pixels como mistura de um único conjunto inicial de *endmembers*. Desta forma, pode-se ter um pixel modelado por *endmembers* que nele sejam inexistentes (Schweik e Green, 1999).

VII.2.11.2. Modelo de Análise de Mistura Espectral com Múltiplos Endmembers (MESMA)

Uma outra aplicação derivada do SMA é a análise de mistura espectral com múltiplos *endmembers* (MESMA) (Roberts et al., 1998). Esta técnica visa corrigir algumas limitações do SMA, que utiliza apenas um grupo reduzido de *endmembers*, restrito pelo número de bandas das imagens multiespectrais.

Assim, o SMA não contempla, simultaneamente, os diferentes materiais presentes em um determinado pixel com a variabilidade espectral destes ao longo da imagem. Portanto, utiliza o mesmo número de *endmembers* para todos os pixels da imagem, independentemente

se os materiais representados por eles estão presentes ou não no pixel, produzindo consideráveis frações de erro (Roberts et al., 1998; Schweik e Green, 1999).

Para superar essas limitações, o MESMA permite, de forma interativa, variar o número e o tipo de *endmembers* para cada tipo de pixel da imagem, aumentando o potencial de mapeamento. Deste modo, é possível extrair as frações com um menor RMSE, por meio da seleção do *endmember* de melhor ajuste para cada pixel (García-Haro et al., 2005; Sonnentag et al., 2007; Myint e Okin, 2009; Liu e Yang, 2013; Quintano et al., 2013; Dudley et al., 2015).

O algoritmo do MESMA está disponível no aplicativo VIPER (*Visualization and Image Processing for Environmental Research*) Tools, de distribuição gratuita, desenvolvido em linguagem IDL (*Interactive Data Language*) com interface disponível no programa ENVI 5.2 (Roberts et al., 2007). VIPER Tools pode processar dados em número digital, radiância ou reflectância, oferecendo um conjunto de ferramentas para o processamento de imagens multiespectrais e hiperespectrais.

Nesta ferramenta, é possível selecionar até três bibliotecas espectrais com múltiplos *endmembers* cada uma, portanto, se apenas uma biblioteca espectral for selecionada, o modelo possuirá duas componentes (uma imagem fração + uma imagem sombra); se duas bibliotecas forem selecionadas, o modelo terá três componentes (duas imagens fração + uma imagem sombra). Por fim, se forem selecionadas três bibliotecas, o modelo terá quatro componentes (três imagens fração + uma imagem sombra) (Roberts et al., 2007).

De acordo com Roberts et al. (2007), quanto maior o número de *endmembers* selecionados em cada biblioteca, maior será o número de combinações aplicados para cada pixel, o que permite representar a variabilidade espectral de um determinado material.

As imagens fração representam as proporções (abundância) dos *endmembers* na mistura espectral, representados em ND. Quanto maior o ND do pixel (cores de cinza mais claras), maior será a proporção de um determinado componente (Ponzoni et al., 2012).

O MESMA também gera uma imagem contendo o *endmember* que foi utilizado para cada pixel (modelo de mistura), o RMSE produzido pelo modelo e um arquivo de metadados (formato CSV) que reporta os parâmetros do modelo e a proporção da imagem que foi modelada por cada *endmember*. Além disso, há a possibilidade de incluir uma imagem “individualizada”, onde, para cada *endmember* utilizado (modelo de mistura), é atribuída uma cor (Roberts et al., 2007).

Assim, neste trabalho, utilizou-se, como dados de entrada no algoritmo MESMA, os mesmos dados utilizados na metodologia SMA.

A imagem “individualizada” resultante do processo de desmistura espectral, foi suavizada mediante um filtro por convolução estatístico de mediana, utilizando uma máscara de tamanho 7x7 (Meneses e Santa Rosa, 2012). Esta imagem “individualizada” e suavizada por meio de filtragem foi exportada para o programa ArcGIS e atribuída as cores das classes

de solos de acordo com Embrapa (2013). Logo depois, no ArcGIS, foram calculadas as áreas correspondentes à cada classe de solo.

VII.2.12. Validação do mapeamento espectral de solos

Para fornecer confiabilidade aos mapas temáticos de solos obtidos, foi avaliada a exatidão do mapeamento, conduzida com base na verificação em campo de pontos amostrais obtidos de malha retangular.

Inicialmente, gerou-se uma malha retangular de 500 pontos, com células de 1.400 x 1.400 m, no programa Quantum GIS (Quantum GIS Development Team, 2014), que foi exportada para o programa ArcGIS no formato shapefile.

Essa malha teve cada célula representativa da classe de solo dominante, disposta em um ponto de validação localizado no centro da malha, eliminando-se as células que ficaram em espaços vazios da imagem (locais não mapeados e máscaras) e realocando aqueles pontos que ficaram localizados no limite externo para o limite interno das áreas mapeadas, a fim de se obter uma distribuição homogênea de pontos para validação. A malha foi sobreposta para cada um dos seis mapas gerados, que representam uma classe de solo específica, obtidos pela metodologia SMA. O mesmo processo foi adotado para o único mapa de classes de solos obtido pelo método MESMA.

Em seguida, foram elaboradas planilhas no programa Excel com as informações e coordenadas de cada célula da malha, indicando a classe de solo determinada pelas metodologias de mapeamento espectral.

O passo seguinte foi realizar a verificação da verdade de campo, dividida em duas etapas. Na primeira etapa, de escritório, foram confrontadas as informações do mapeamento, seguindo as células da malha, por meio do banco de dados de classes de solos do DF do Laboratório de Geoprocessamento da Faculdade de Agronomia e Medicina Veterinária – FAV/UnB. Esta base de dados contém caracterizações de classes de solos em pontos georreferenciados na Bacia do Rio Jardim.

Na segunda etapa, 100 pontos foram validados em campanhas de campo. Como base cartográfica para a localização mais precisa dos pontos de validação, foram utilizadas aerofotografias digitais ortorretificadas, com resolução espacial nominal de 24 cm, em escala 1:5.000 (Terracap, 2013).

Com os dados da validação de campo e de escritório organizados na malha elaborada, foram avaliados os dados do mapeamento pelo SMA e MESMA, este último com confecção da matriz de confusão (Congalton e Green, 2010).

Para o modelo SMA, em cada mapa de classe de solo gerado de ocorrência na Bacia do Rio Jardim, foram calculadas as porcentagens de acertos e as porcentagens de erros

devido às confusões com a outras classes de solos também mapeadas em relação à matriz elaborada de dados de validação.

Já para o modelo MESMA, que gerou um único mapa de distribuição dos solos da Bacia do Rio Jardim, foi avaliada a acurácia do mapeamento pelo índice Kappa, além da acurácia do usuário e do produtor, e dos erros de omissão e de comissão.

Brites et al. (1996) e Figueiredo e Vieira (2007) avaliaram a eficácia de três índices de acurácia de mapeamentos digitais, exatidão global (EG), Kappa (K) e Tau (τ). Determinaram que a EG tende a apresentar índices mais altos em relação aos outros dois e que a diferença entre os índices K e τ é pequena. Além disso, K e τ são mais consistentes que a EG por envolverem, no índice final, todas as células da matriz de confusão.

Desta forma, a análise da matriz de confusão foi realizada por meio do coeficiente de acurácia Kappa (Cohen, 1960), o qual foi calculado segundo a seguinte equação 11:

$$K = \frac{P_o - P_e}{1 - P_e} \quad \text{Eq. 11}$$

Onde P_o é o produto entre o somatório da diagonal principal da matriz ($\sum X_{ii}$) e o número total de observações (N); P_e é expresso pelo somatório do produto dos elementos das linhas e colunas marginais ($\sum X_{i+} X_{+i}$); e 1 corresponde ao número total de observações (N) ao quadrado (Cohen, 1960). Os valores para este índice variam de 0 (concordância nula) a 1 (concordância perfeita) (Meneses e Sano, 2012).

Segundo Landis e Koch (1977), a avaliação da acurácia de mapeamentos por meio do coeficiente Kappa pode ser realizada com base nos valores apresentados na Tabela 6.

Tabela 6. Classificação da acurácia de mapeamentos mediante valores do coeficiente Kappa, segundo Landis e Koch (1977).

Coeficiente Kappa	Classificação
< 0	Péssima
0 – 0,2	Ruim
0,21 – 0,4	Razoável
0,41 – 0,6	Boa
0,61 – 0,8	Muito Boa
0,81 – 1,0	Excelente

A acurácia também pode ser analisada individualmente por meio da análise dos erros de exclusão (erros de omissão) e erros de inclusão (erros de comissão), os quais levam em consideração os valores das marginais da matriz (Congalton e Green, 2010).

No caso das linhas, os valores indicam o número de amostras que, pertencendo a uma determinada classe de solo, não foram incluídos nela. Os erros de omissão foram calculados pela equação 12, proposto por Congalton e Mead (1986):

$$EO = \frac{X_{i+} - X_{ii}}{X_{i+}} \times 100 \quad \text{Eq. 12}$$

Onde EO corresponde aos erros de omissão (exclusão), X_{i+} à marginal da linha e X_{ii} à diagonal da linha.

De igual forma, os valores das células nas colunas expressam aos pixels que se incluem em uma determinada classe de solo à qual eles não pertencem. Os erros de comissão foram calculados pela equação 13, proposto por Congalton e Mead (1986):

$$EC = \frac{X_{+i} - X_{ii}}{X_{+i}} \times 100 \quad \text{Eq. 13}$$

Onde EC corresponde aos erros de comissão (inclusão), X_{+i} à marginal da coluna e X_{ii} à diagonal coluna.

Assim, a omissão se refere a uma definição imperfeita da classe e a comissão se refere a uma delimitação excessiva da classe.

A acurácia do usuário é expressa pela razão do número de elementos corretamente classificados em uma classe pelo número total de elementos classificados na mesma classe (Congalton e Mead, 1986) (Equação 14). Esta medida reflete os erros de inclusão ou comissão na classificação e indica a probabilidade de um pixel classificado no mapa representar a classe de solo (Lillesand et al., 2007; Congalton e Green, 2010).

$$AU = \frac{X_{ii}}{X_{i+}} \times 100 \quad \text{Eq. 14}$$

Onde AU corresponde à Acurácia do Usuário, X_{ii} à diagonal da linha (elementos corretamente classificados) e X_{i+} à marginal da linha (total de elementos classificados para essa classe).

A acurácia do produtor é a razão entre o número de elementos corretamente classificados em uma determinada classe pelo número de pontos de referência amostrados para a mesma classe (Congalton e Mead, 1986) (Equação 15). Esta medida reflete os erros de exclusão ou omissão da classificação e indica a probabilidade de um pixel de referência (verdade de campo) ter sido corretamente classificado (Lillesand et al., 2007; Congalton e Green, 2010).

$$AP = \frac{X_{ii}}{X_{+i}} \times 100 \quad \text{Eq. 15}$$

Onde AU corresponde à Acurácia do Usuário, X_{ii} à diagonal da coluna (elementos corretamente classificados) e X_{+i} à marginal da coluna (total de elementos classificados para essa classe).

VII.3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

VII.3.1. Lito-topossequências

VII.3.1.1. Atributos morfológicos

As descrições morfológicas dos solos estudados estão apresentadas nas Tabelas 7, 8, 9, 10, 11 e 12. Os perfis pedológicos das cinco lito-topossequências (Figura 19) – Estanislau, Alto Rio Jardim, São Gonçalo, Barra Alta e Cariru apresentaram pouca variabilidade quanto à cor úmida, textura, estrutura e consistência.

A textura dos solos estudados variou de argilosa a muito argilosa, uma vez que se originam de litologias pelíticas do Grupo Bambuí e Canastra (Freitas-Silva e Campos, 1998a), além do Grupo Paranoá, que ocorre em uma pequena porção no extremo Norte da Bacia. Esses solos se diferenciam principalmente no que diz respeito à cor.

No SiBCS da Embrapa (2013), a cor é utilizada como um importante atributo de classificação. Isso ocorre porque a cor é um atributo que se correlaciona com importantes atributos ligados à composição e gênese dos solos (Campos e Demattê, 2004; Novaes Filho et al., 2007). Varia de acordo com seus constituintes como óxidos de ferro, MO, umidade e granulometria (Schulze et al., 1993; Schwertmann, 1993). Nos solos estudados, avaliou-se a variação na coloração dentro das classes de solos.

Os Latossolos Vermelhos (LV) apresentaram cores similares entre os horizontes superficiais e subsuperficiais, variando de vermelho-escuro (10R 3/6) a bruno-claro (2,5YR 5/8). Os Latossolos Vermelho-Amarelos (LVA) apresentaram coloração homogênea entre horizontes superficiais e subsuperficiais, variando de bruno-escuro (7,5YR 3/4) a bruno-claro (10YR 6/6), com horizontes de cores variegados vermelhos (10R 5/8) a amarelo-avermelhados (5YR 6/8). Estes resultados concordam com o SiBCS (Embrapa, 2013). De acordo com Fernandes et al. (2004), quem avaliou a relação de teores de óxidos com a cor do solo, determinou que solos com predominância de goethita, como Latossolos Vermelho-Amarelos, o matiz foi sempre mais amarelo que 7,5YR, e que solos com altos teores de hematita, como Latossolos Vermelhos, apresentaram horizontes com matizes 2,5YR ou mais vermelhos. Segundo Lindenmayer (1972) e Rodrigues e Klamt (1978), essa variação na cor do solo pelo predomínio de hematita ou goethita é função do tipo de material de origem ou do regime de drenagem interna do perfil.

Solos com plintita e concreções ferruginosas ocorrem em grandes extensões no Brasil (Anjos et al., 1995; Batista e Santos, 1995), em clima tropical subúmido, onde condições de alta precipitação pluviométrica se alternam com período prolongado de decréscimo acentuado das chuvas (Anjos et al., 1995). Os Plintossolos Pétricos Concrecionários (FFc) e Plintossolos Hápicos (FX) apresentaram coloração variando de vermelho (10R 5/8) no horizonte C a bruno

(10YR 6/8) no horizonte A, com horizontes de coloração variegada. Vários trabalhos desenvolvidos no Planalto Central do Brasil, tais como os estudos de Barbosa et al. (2009) e Motta et al. (2002) nas Chapadas Elevadas do DF e Planalto Central do Brasil, relacionaram a presença de horizonte petroplíntico à variação do regime hídrico nas extremidades das unidades geomorfológicas, onde a declividade se acentua, tornando as condições de drenagem interna deficiente e formando plintita que posteriormente é endurecida permanentemente, originando a petroplintita.

Os Neossolos Regolíticos (RR) da área de estudo apresentaram transição clara entre as cores de seus horizontes A e C, exibindo um horizonte A com coloração variando de bruno avermelhado escuro (5YR 4/4) a amarelo avermelhada (10YR 5/4), e o horizonte C apresentando uma coloração variando de vermelho escuro (10R 3/6) a amarelo-avermelhado (2,5YR 6/8). Estes solos estão localizados sobre litologias pelíticas argilosas do Grupo Bambuí, apresentando cores de alteração avermelhados, produto do alto teor de Fe_2O_3 nelas presentes (Freitas-Silva e Campos, 1998a). De acordo com Santos et al. (2012), RR são solos onde a atuação dos processos pedogenéticos é insuficiente para provocar modificações expressivas do material originário, em razão de sua resistência ao intemperismo, característica inerente ao próprio material de origem.

Os Cambissolos (CX) apresentaram coloração similar aos RR, sendo a transição da cor gradual entre horizontes A e Bi. Os horizontes variaram de 5YR 4/6 a 7,5YR 5/6 nos horizontes A, de 5YR 5/6 a 2,5YR 4/8 nos horizontes Bi e de coloração avermelhada (10R 6/4) nos horizontes C. Esta variação de cores concorda com Pereira et al. (2010), que estudaram a gênese de Cambissolos desenvolvidos sobre rochas pelíticas do Grupo Bambuí (MG), onde os CX apresentaram matizes de 10YR e 7,5YR nos horizontes A e Bi, respectivamente. Por serem solos desenvolvidos a partir de rochas pelíticas, a cor avermelhada do horizonte C é consequência do material de origem pré-intemperizado rico em óxidos de ferro, que sofreu metamorfismo de baixo grau, tal como ocorre nas litologias pelíticas do DF (Freitas-Silva e Campos, 1998a).

Os Gleissolos Háplicos (GX) da área de estudo apresentaram transição gradual de cores entre seus horizontes A e C com vários tons acinzentados, desde 10YR 4/2 a 2,5Y 8/2. Estes Solos Hidromórficos encontram-se associados à unidade geomorfológica Planícies do DF, constituindo áreas deprimidas aplainadas com instalação recente de drenagens (Lacerda e Barbosa, 2012).

Os Organossolos Háplicos (OX) apresentaram coloração variando de preta a bruno-amarelada, com matiz 10YR. Este resultado concorda com Valladares et al. (2008), que caracterizaram Organossolos e solos afins do Brasil afirmando que, nos horizontes hísticos predominam cores escuras (úmidas) com baixo valor e croma, sendo a cor preta a mais freqüente, verificando-se também cores cinzentas e brunadas, com predomínio do matiz 10YR

e do matiz neutro (N). Junior et al. (2015) analisaram as relações solo-paisagem em uma topossequência no DF e descreveram um OX que apresentou cor preta, com matiz 10YR, variando em valor e croma, produto dos altos teores de material orgânico de restos vegetais acumulados.

Tabela 7. Características morfológicas dos perfis da Lito-topossequência 1 – Estanislau

Amt. ⁽¹⁾	H. ⁽²⁾	Prof. ⁽³⁾ (cm)	Cor úmida ⁽⁴⁾ (Munsell)	T ⁽⁵⁾	Estrutura ⁽⁶⁾	Consistência ⁽⁷⁾			
						S	U	M	
<i>Perfil 1 - LATOSSOLO VERMELHO Distrófico típico - LVd</i>									
DFE-01	A	0-15	2,5YR 4/4	m. a.	for. mto. p. gru.	m.	mfr.	lpl.	lpg.
	AB	15-25	2,5YR 4/6	m. a.	for. mto. p. gran.	m.	mfr.	pl.	pg.
	BA	25-40	2,5YR 5/6	m. a.	for. mto. p. gran.	m.	mfr.	pl.	pg.
	Bw	40+	2,5YR 5/8	m. a.	for. mto. p. gran.	m.	mfr.	pl.	pg.
<i>Perfil 2 - PLINTOSSOLO PÉTRICO Concrecionário típico- FFc</i>									
DFE-05	Ac	0-20	7,5YR 4/4 var. 2,5YR 5/8	m. a.	for. mto. p. gru.	m.	mfr.	pl.	pg.
	ABc	20-35	7,5YR 5/4 var. 2,5YR 5/8	m. a.	for. mto. p. gran.	m.	mfr.	pl.	lpg.
	BAc	35-50	7,5YR 7/8 var. 2,5YR 5/8	m. a.	for. mto. p. gran.	m.	mfr.	pl.	lpg.
	Bc	50+	5YR 6/8 var. 2,5YR 5/6	m. a.	for. mto. p. gran.	m.	mfr.	pl.	lpg.
<i>Perfil 3 - PLINTOSSOLO PÉTRICO Concrecionário típico- FFc</i>									
DFE-07	Ac	0-20	10YR 3/6 var. 10YR 5/6	m. a.	for. mto. p. gru.	m.	mfr.	pl.	pg.
	Bc	20-60	10YR 6/8	a.	for. mto. p. gran.	m.	mfr.	pl.	pg.
	CR	60+	10R 5/8 var. 2,5Y 7/4	a.	mod. p. a. grd. ang.	d.	fm.	pl.	pg.
<i>Perfil 4 - LATOSSOLO VERMELHO Distrófico típico - LVd</i>									
DFE-11	A	0-20	10R 4/3	m. a.	for. mto. p. gru.	m.	fr.	pl.	pg.
	AB	20-30	10R 4/6	m. a.	for. mto. p. gran.	m.	fr.	pl.	pg.
	BA	30-51	10R 4/4	m. a.	for. mto. p. gran.	m.	fr.	pl.	pg.
	Bw	51+	10R 5/8	m. a.	for. mto. p. gran.	m.	mfr.	pl.	pg.
<i>Perfil 5 - LATOSSOLO VERMELHO-AMARELO Distrófico petroplíntico - LVAdc</i>									
DFE-13	A	0-15	10YR 3/4	m. a.	for. mto. p. gran.	m.	fr.	pl.	lpg.
	AB	15-25	10YR 4/6	m. a.	for. mto. p. gran.	m.	fr.	pl.	lpg.
	BA	25-35	10YR 5/6	m. a.	for. mto. p. gran.	m.	fr.	pl.	lpg.
	Bw	35-70	10YR 6/6	m. a.	for. mto. p. gran.	m.	mfr.	pl.	lpg.
	Bc	70+	10R 5/8	m. a.	for. mto. p. gran.	m.	fr.	pl.	lpg.
<i>Perfil 6 - PLINTOSSOLO PÉTRICO Concrecionário típico- FFc</i>									
DFE-15	Ac	0-25	7,5YR 4/6	m. a.	for. mto. p. gru.	m.	fr.	pl.	pg.
	Bc1	25-75	7,5YR 5/8	m. a.	for. mto. p. gran.	m.	fr.	pl.	pg.
	Bc2	75-175	10R 5/8	m. a.	for. mto. p. gran.	m.	fr.	pl.	pg.
	C	175+	10R 6/8 var. 7,5YR 7/4	a.	for. mto. p. gran.				

⁽¹⁾Leitura espectroscópica do horizonte A de amostras de solo, ⁽²⁾Horizonte, ⁽³⁾Profundidade, ⁽⁴⁾var.: variegada, ⁽⁵⁾Textura: m.: muito, a.: argilosa, ⁽⁶⁾Estrutura: for.: forte, mod.: moderada, mto.: muito, p.: pequena, grd.: grande, gru.: grumosa, gran.: granular, ang.: angular, ⁽⁷⁾Seca: m.: macia, d.: dura – Úmida: fr.: friável, fm.: firme, mfr.: muito friável – Molhada: pl.: plástica, pg.: pegajosa, lpl.: ligeiramente plástica, lpg.: ligeiramente pegajosa.

Tabela 8. Características morfológicas dos perfis da Lito-topossequência 2 – Alto Rio Jardim

Amt. ⁽¹⁾	H. ⁽²⁾	Prof. ⁽³⁾ (cm)	Cor úmida ⁽⁴⁾ (Munsell)	T ⁽⁵⁾	Estrutura ⁽⁶⁾	Consistência ⁽⁷⁾			
						S	U	M	
<i>Perfil 1 - PLINTOSSOLO PÉTRICO Concrecionário - FFc</i>									
DFAJ-01	Ac	0-18	10YR 3/4	a.	for. mto. p. gran.	m.	fr.	pl.	pg.
	AF	18-45	10YR 4/6	a.	for. mto. p. gran.	m.	fr.	pl.	pg.
	F	45-120	10YR 6/8	m. a.	for. mto. p. gran.	m.	fr.	pl.	pg.
	FC	120-160	2,5YR 5/8	a.	for. mto. p. gran.	m.	fr.	pl.	pg.
	C	160+	2,5YR 3/6	a.	for. mto. p. bl.	ld.	fm.	lpl.	pg.
<i>Perfil 2 - PLINTOSSOLO PÉTRICO Concrecionário típico - FFc</i>									
DFAJ-03	Ac	0-30	10YR 4/4	as.	for. mto. p. gru.	st.	fr.	pl.	pg.
	AF	30-48	10YR 3/4	a.	for. mto. p. gran.	m.	fr.	pl.	pg.
	F	48-105	10YR 4/6	m. a.	for. mto. p. gran.	m.	fr.	pl.	pg.
	FC	105-150	5YR 5/6 var. 2,5Y 8/2	a.	for. mto. p. gran.	d.	fr.	pl.	pg.
	C	150+							
<i>Perfil 3 - PLINTOSSOLO PÉTRICO Concrecionário típico - FFc</i>									
DFAJ-05	Ac	0-20	7,5YR 3/4	a.	for. mto. p. gru.	m.	fr.	pl.	lpg.
	AF	20-40	7,5YR 4/6	a.	for. mto. p. gran.	m.	fr.	pl.	lpg.
	F	40-96	7,5YR 4/4	a.	for. mto. p. gran.	m.	fr.	pl.	pg.
	FC	96+							
<i>Perfil 4 - CAMBISSOLO HÁPLICO Tb Distrófico - CXbd</i>									
DFAJ-07	A	0-10	7,5YR 4/6	as.	fra. mto. p. bl.	d.	fm.	pl.	pg.
	Bi	10-20	7,5YR 5/6	a.	fra. mto. p. bl.	d.	fm.	pl.	pg.
	BiC	20-25	5YR 5/6 var. 2,5YR 4/8	a.	fra. mto. p. bl.	d.	fm.	pl.	pg.
	C	25+							
<i>Perfil 5 - NEOSSOLO REGOLÍTICO Distrófico - RRd</i>									
DFAJ-09	A	0-8	10YR 5/4	a.	fra. p. bl.	d.	fm.	pl.	pg.
	AC	8-14	10YR 5/3	a.	fra. p. bl.	d.	fm.	pl.	pg.
	C	14+	10R 3/6 var. 7,5YR 8/0	as.					
<i>Perfil 6 - NEOSSOLO REGOLÍTICO Distrófico - RRd</i>									
DFAJ-11	A	0-10	10YR 5/4	as.	for. p. bl.	d.	fm.	pl.	pg.
	AC	10-22	10YR 5/6	as.	for. p. bl.	d.	fm.	pl.	pg.
	C	22+	2,5YR 3/6 var. 2,5Y 7/2	as.					
<i>Perfil 7 - NEOSSOLO REGOLÍTICO Distrófico - RRd</i>									
DFAJ-13	A	0-3	5YR 5/5	a.	mod. p. bl.	d.	fm.	pl.	pg.
	C	3-70+	10R 4/8	a.	fra. p. bl.	d.	fm.	pl.	pg.
<i>Perfil 8 - GLEISSOLO HÁPLICO Tb Distrófico - GXbd</i>									
DFAJ-15	A	0-33	10YR 5/2	as.	fra. p. bl.	md.	fm.	pl.	pg.
	ACg	33-40	10YR 6/2 var. 5YR 6/8	as.	fra. p. bl.	md.	fm.	pl.	pg.
	Cg	40-70+	10YR 7/2 var. 5YR 6/8	as.	maciça	md.	fm.	pl.	pg.
<i>Perfil 9 - LATOSSOLO VERMELHO Distrófico típico - LVd</i>									
DFAJ-17	A	0-20	10R 3/6	m. a.	for. mto. p. gru.	ld.	fr.	pl.	pg.
	ABw	20-35	10R 4/6	m. a.	for. mto. p. gru.	ld.	fr.	pl.	pg.
	BwA	35-55	10R 4/8	m. a.	for. mto. p. gran.	ld.	fr.	pl.	pg.
	Bw	55+	10R 5/8	m. a.	for. mto. p. gran.	m.	mfr.	pl.	pg.

⁽¹⁾Leitura espectroscópica do horizonte A de amostras de solo, ⁽²⁾Horizonte, ⁽³⁾Profundidade, ⁽⁴⁾var.: variegada, ⁽⁵⁾Textura: m.: muito, a.: argilosa, as.: argilossiltosa ⁽⁶⁾Estrutura: for.: forte, mod.: moderada, fra.: fraca, mto.: muito, p.: pequena, grd.: grande, gru.: grumosa, gran.: granular, bl: blocos, ⁽⁷⁾Seca: st.: solta, m.: macia, d.: dura, ld.: ligeiramente dura, md.: muito dura – Úmida: fr.: friável, fm.: firme, mfr.: muito friável – Molhada: pl.: plástica, pg.: pegajosa, lpl.: ligeiramente plástica, lpg.: ligeiramente pegajosa.

Já as cores avermelhadas ou amareladas nos horizontes de subsuperfície são uma característica comum em solos desenvolvidos a partir de rochas pelíticas (Freitas-Silva e Campos, 1998a), resultantes da presença de óxidos de ferro em boas condições de drenagem e aeração (hematita) ou com regime mais úmido (goethita). Cores acinzentadas devem-se, principalmente, à presença de ferro na forma reduzida (Fe²⁺) e indicam ambiente de imperfeitamente a muito mal drenado, sujeito ao hidromorfismo. A presença de cores variegadas no solo indica condições de drenagem restrita em solos de baixa permeabilidade, localizados em áreas com oscilação do nível do lençol freático (Ribeiro et al., 2012).

Por meio da descrição morfológica, foi possível observar que os LV e LVA da área de estudo são bem desenvolvidos, profundos, com transição entre horizontes gradual. Os FX, FFc e OX, em contrapartida, são menos profundos, com transição entre horizontes gradual e clara. Já os CX, RR e GX são rasos e com transição clara.

Tabela 9. Características morfológicas dos perfis da Lito-topossequência 3 – São Gonçalo

Amt. ⁽¹⁾	H. ⁽²⁾	Prof. ⁽³⁾ (cm)	Cor úmida ⁽⁴⁾ (Munsell)	T ⁽⁵⁾	Estrutura ⁽⁶⁾	Consistência ⁽⁷⁾			
						S	U	M	
<i>Perfil 1 - LATOSSOLO VERMELHO-AMARELO - LVA</i>									
DFSG-01	A	0-25	7,5YR 3/4	as.	for. mto. p. gran.	m.	fr.	pl.	pg.
	AB	25-45	7,5YR 4/6	a.	for. mto. p. gran.	m.	fr.	pl.	pg.
	Bw	45-300+	7,5YR 6/8	m. a.	for. mto. p. gran.	m.	mfr.	pl.	pg.
<i>Perfil 2 - LATOSSOLO VERMELHO - LV</i>									
DFSG-04	A	0-20	10R 3/6	m. a.	for. mto. p. gru.	m.	fr.	pl.	pg.
	AB	20-28	10R 4/6	m. a.	for. mto. p. gru.	m.	fr.	pl.	pg.
	BA	28-34	10R 5/8	m. a.	for. mto. p. gru.	m.	fr.	pl.	pg.
	Bw	34-300+	10R 4/8	m. a.	for. mto. p. gru.	m.	mfr.	pl.	pg.
<i>Perfil 3 - GLEISSOLO HÁPLICO - GX</i>									
DFSG-06	A	0-25	10YR 3/6	a.	mod. mto. p. gru.	ed.	fm.	pl.	pg.
	ACg	25-75	10YR 4/2	a.	fra. mto. p. bl.	ed.	fm.	pl.	pg.
	Cg	75+	2,5Y 8/2	m. a.	fra. mto. p. bl.	ed.	fm.	pl.	pg.
<i>Perfil 4 - ORGANOSSOLO HÁPLICO - OX</i>									
DFSG-09	A	0-60	10YR 2/1	a.	fra. p. gru.	m.	fr.	lpl.	pg.
	AC	60-105	10YR 4/2	a.	fra. p. gru.	m.	fm.	pl.	pg.
	CA	105-160	10YR 7/6	a.	fra. p. subg.	d.	fm.	pl.	pg.
	CA	160+	10YR 7/3	a.	mod. p. subg.	ed.	fm.	pl.	pg.
<i>Perfil 5 - LATOSSOLO VERMELHO - LV</i>									
DFSG-12	A	0-21	2,5YR 4/2	m. a.	for. mto. p. gran.	ld.	fr.	lpl.	pg.
	AB	21-30	2,5YR 5/2	m. a.	for. mto. p. gran.	ld.	fr.	pl.	pg.
	BA	30-45	2,5YR 4/4	m. a.	for. mto. p. gran.	m.	fr.	pl.	pg.
	Bw	45+	2,5YR 5/8	m. a.	for. mto. p. gran.	m.	mfr.	pl.	pg.

⁽¹⁾Leitura espectroscópica do horizonte A de amostras de solo, ⁽²⁾Horizonte, ⁽³⁾Profundidade, ⁽⁴⁾var.: variegada, ⁽⁵⁾Textura: m.: muito, a.: argilosa, ⁽⁶⁾Estrutura: for.: forte, mod.: moderada, fra.: fraca, mto.: muito, p.: pequena, gru.: grumosa, gran.: granular, bl.: blocos, subg.: subangular, ⁽⁷⁾Seca: m.: macia, d.: dura, ld.: ligeiramente dura, ed.: extremamente dura – Úmida: fr.: friável, fm.: firme, mfr.: muito friável – Molhada: pl.: plástica, pg.: pegajosa, lpl.: ligeiramente plástica

Tabela 10. Características morfológicas dos perfis da Lito-topossequência 4 – Barra Alta

Amt. ⁽¹⁾	H. ⁽²⁾	Prof. ⁽³⁾ (cm)	Cor úmida ⁽⁴⁾ (Munsell)	T ⁽⁵⁾	Estrutura ⁽⁶⁾	Consistência ⁽⁷⁾			
						S	U	M	
<i>Perfil 1 - LATOSSOLO VERMELHO - LV</i>									
DFBA-01	A	0-20	10R 3/6	a.	for. mto. p. gru.	m.	fr.	pl.	pg.
	AB	20-45	10R 4/8	a.	for. mto. p. gran.	m.	fr.	pl.	pg.
	Bw	45+	10R 5/8	a.	for. mto. p. gran.	m.	mfr.	pl.	pg.
<i>Perfil 2 - PLINTOSSOLO HÁPLICO - FX</i>									
DFBA-08	A	0-18	2,5Y 3/2	a.	for. p. a mto. p. gru.	d.	fm.	pl.	pg.
	ACg	18-31	2,5Y 4/0	a.	mod. p. a mto. p. subg.	d.	fm.	pl.	pg.
	ACgf	31+	2,5Y 6/2 var. 10R 5/8	a.	mod. p. a mto. p. subg.	md.	mfm.	pl.	pg.
<i>Perfil 3 - PLINTOSSOLO PÉTRICO Concrecionário típico - FFc</i>									
DFBA-14	Ac	0-45	10YR 4/3 var. 7,5YR 4/4	a.	for. mto. p. gru.	m.	fm.	pl.	pg.
	ACc	45-70	7,5YR 5/4 var. 10R 4/8	a.	fra. mto. p. subg.	d.	fm.	pl.	pg.
	C	70+	10R 5/8 var. 10YR 7/8	a.	fra. mto. p. subg.	md.	mfm.	lpl.	lpg.
<i>Perfil 4 - NEOSSOLO REGOLITICO - RR</i>									
DFBA-17	A	0-10	7,5YR 5/6	as.	fra. p. bl.	md.	fm.	pl.	pg.
	AC	10-95	7,5YR 5/4	as.	fra. p. bl.	md.	fm.	pl.	pg.
	C	95+	10R 6/4	as.	fra. p. bl.	md.	mfm.	npl.	npg.
<i>Perfil 5 - LATOSSOLO VERMELHO - LV</i>									
DFBA-20	A	0-18	10R 4/5	a.	for. mto. p. gru.	m.	fr.	pl.	pg.
	AB	18-32	10R 4/8	a.	for. mto. p. gran.	m.	fr.	pl.	pg.
	Bw	32+	10R 5/8	a.	for. mto. p. gran.	m.	mfr.	pl.	pg.
<i>Perfil 6 - LATOSSOLO VERMELHO - LV</i>									
DFBA-23	A	0-15	10R 4/6	a.	for. mto. p. gru.	m.	fr.	pl.	pg.
	AB	15-30	10R 4/8	a.	for. mto. p. gran.	m.	fr.	pl.	pg.
	Bw	30+	10R 5/8	a.	for. mto. p. gran.	m.	mfr.	pl.	pg.
<i>Perfil 7 - NEOSSOLO REGOLITICO - RR</i>									
DFBA-26	A	0-8	7,5YR 5/4	a.	fra. p. bl.	d.	fm.	pl.	pg.
	C	8+	10R 6/4	as.	fra. mto. p. bl.	d.	fm.	npl.	npg.

(¹)Leitura espectroscópica do horizonte A de amostras de solo, (²)Horizonte, (³)Profundidade, (⁴)var.: variegada, (⁵)Textura: a.: argilosa, as.: argilossiltosa, (⁶)Estrutura: for.: forte, mod.: moderada, fra.: fraca, mto.: muito, p.: pequena, gru.: grumosa, gran.: granular, bl: blocos, subg.: subangular, (⁷)Seca: m.: macia, d.: dura, md.: muito dura – Úmida: fr.: friável, fm.: firme, mfm.: muito firme – Molhada: pl.: plástica, pg.: pegajosa, lpl.: ligeiramente plástica, lpg.: ligeiramente pegajosa, npl.: não plástica, npg.: não pegajosa.

Tabela 11. Características morfológicas dos perfis da Lito-topossequência 5 – Cariru

Amt. ⁽¹⁾	H. ⁽²⁾	Prof. ⁽³⁾ (cm)	Cor úmida ⁽⁴⁾ (Munsell)	T ⁽⁵⁾	Estrutura ⁽⁶⁾	Consistência ⁽⁷⁾			
						S	U	M	
<i>Perfil 1 - LATOSSOLO VERMELHO - LV</i>									
DFCA-01	A	0-12	10R 4/4	a.	for. mto. p. gran.	m.	fr.	pl.	pg.
	AB	12-24	10R 4/6	a.	for. mto. p. gran.	m.	fr.	pl.	pg.
	BA	24-42	10R 4/8	a.	for. mto. p. gran.	m.	fr.	pl.	pg.
	Bw	42+	10R 5/6	m. a.	for. mto. p. gran.	m.	fr.	pl.	pg.
<i>Perfil 2 - CAMBISSOLO HÁPLICO - CX</i>									
Validação ⁽⁸⁾	A	0-30	5YR 4/6	a.	fra. mto. p. gru.	m.	fr.	pl.	pg.
	ABi	30-46	5YR 5/8	a.	fra. mto. p. bl.	m.	fr.	pl.	pg.
	Bi	46-65	5YR 6/8	m. a.	fra. mto. p. bl.	m.	fr.	pl.	pg.
	BiC	65-110	5YR 4/8	a.	fra. mto. p. bl.	d.	fm.	lpl.	pg.
	C	110+	10R 6/4	a.	fra. p. bl.	d.	fm.	lpl.	pg.
<i>Perfil 3 - NEOSSOLO REGOLITICO - RR</i>									
Validação ⁽⁸⁾	A	0-20	5YR 4/4	a.	fra. mto. p. gru.	ed.	fm.	lpl.	pg.
	C	20+	2,5YR 6/8 var. 10R 6/4	as.	fra. mto. p. bl.	ed.	fm.	lpl.	pg.
<i>Perfil 4 - NEOSSOLO REGOLITICO - RR</i>									
Validação ⁽⁸⁾	A	0-8	7,5YR 5/4	a.	fra. p. bl.	m.	fr.	lpl.	pg.
	C	8+	10R 6/4	a.	fra. p. bl.	ed.	fm.	pl.	pg.
<i>Perfil 5 - LATOSSOLO VERMELHO - LV</i>									
DFCA-09	A	0-21	10R 4/6	m. a.	for. mto. p. gran.	m.	fr.	lpl.	pg.
	AB	21-30	10R 4/8	m. a.	for. mto. p. gran.	m.	fr.	pl.	pg.
	Bw	45+	10R 5/8	m. a.	for. mto. p. gran.	m.	mfr.	pl.	pg.

Continuação Tabela 11.

⁽¹⁾Leitura espectroscópica do horizonte A de amostras de solo, ⁽²⁾Horizonte, ⁽³⁾Profundidade, ⁽⁴⁾var.: variegada, ⁽⁵⁾Textura: m.: muito, a.: argilosa, as.: argilossiltosa ⁽⁶⁾Estrutura: for.: forte, fra.: fraca, mto.: muito, p.: pequena, gru.: grumosa, gran.: granular, subg.: subangular ⁽⁷⁾Seca: m.: macia, d.: dura, ed.: extremamente dura – Úmida: fr.: friável, fm.: firme, mfr.: muito friável – Molhada: pl.: plástica, pg.: pegajosa, lpl.: ligeiramente plástica, ⁽⁸⁾Perfis de solo não considerados no mapeamento espectral, mantidos para conservar a representatividade de solos da geo-topossequência e utilizados para validação dos resultados.

Tabela 12. Características morfológicas das amostras coletadas com trado – Fazenda Ibi-Atã

Amt. ⁽¹⁾	H. ⁽²⁾	Prof. ⁽³⁾ (cm)	Cor úmida ⁽⁴⁾ (Munsell)	T ⁽⁵⁾	Consistência ⁽⁶⁾			
					S	U	M	
<i>Ponto 1 - LATOSSOLO VERMELHO - LV</i>								
DFRJ-1	A	0-20	10R 4/6	a.	m.	fr.	pl.	pg.
	Bw	40-80	10R 4/8	a.	m.	mfr.	pl.	pg.
<i>Ponto 2 - PLINTOSSOLO PÉTRICO Concrecionário típico - FFc</i>								
DFRJ-3	Ac	0-20	7,5YR 4/6 10R 5/8 var.	a.	m.	fr.	lpl.	pg.
	Bc	20-60	7,5YR 5/8 2,5YR 5/8 var.	a.	m.	fr.	lpl.	pg.
<i>Ponto 3 - LATOSSOLO VERMELHO - LV</i>								
DFRJ-5	A	0-20	10R 3/6	a.	m.	fr.	pl.	pg.
	Bw	40-80	10R 4/8	a.	m.	mfr.	pl.	pg.
<i>Ponto 4 - LATOSSOLO VERMELHO-AMARELO - LVA</i>								
DFRJ-7	A	0-20	7,5YR 4/4	a.	m.	fr.	pl.	pg.
	Bw	40-80	7,5YR 6/8	a.	m.	mfr.	pl.	pg.
<i>Ponto 5 - PLINTOSSOLO PÉTRICO Concrecionário típico - FFc</i>								
DFRJ-9	Ac	0-20	7,5YR 5/4 7,5YR 3/4 var.	a.	m.	fr.	pl.	pg.
	Bc	20-60	5YR 6/8 5YR 5/6 var.	a.	m.	fr.	pl.	pg.
<i>Ponto 6 - LATOSSOLO VERMELHO-AMARELO petroplíntico - LVA</i>								
DFRJ-11	A	0-20	7,5YR 5/6	a.	m.	fr.	pl.	pg.
	Bw	20-100	7,5YR 6/8	a.	m.	fr.	pl.	pg.
	F	100+	2,5YR 5/8	a.	m.	fr.	pl.	pg.
<i>Ponto 7 - LATOSSOLO VERMELHO-AMARELO - LVA</i>								
DFRJ-14	A	0-20	5YR 4/4	a.	m.	fr.	pl.	pg.
	Bw	40-80	5YR 6/8	a.	m.	mfr.	pl.	pg.
<i>Ponto 8 - LATOSSOLO VERMELHO-AMARELO - LVA</i>								
DFRJ-16	A	0-20	7,5YR 5/4	a.	m.	fr.	pl.	pg.
	Bw	40-80	7,5YR 6/8	a.	m.	mfr.	pl.	pg.

⁽¹⁾Leitura espectroscópica do horizonte A de amostras de solo, ⁽²⁾Horizonte, ⁽³⁾Profundidade, ⁽⁴⁾var.: variegada, ⁽⁵⁾Textura: a.: argilosa ⁽⁶⁾Seca: m.: macia – Úmida: fr.: friável, mfr: muito friável – Molhada: pl.: plástica, pg.: pegajosa, lpl.: ligeiramente plástica.

VII.3.1.2. Atributos físicos

As 30 amostras de solo coletadas nas lito-topossequências Estanislau e Alto Rio Jardim, consideradas representativas das classes de solos de ocorrência na área de estudo, foram estudadas por meio dos atributos físicos de textura, gradiente textural e relação silte/argila (Tabela 13 e 14).

Tabela 13. Características físicas dos perfis da Lito-toposequência 1 – Estanislau

Amostra ⁽¹⁾	Horizonte	Argila	Silte	Areia	Textura ⁽²⁾	B/A	Silte/Argila
g kg ⁻¹							
<i>Perfil 1 - LATOSSOLO VERMELHO Distrófico típico - LVd</i>							
DFE-01	A	792	87	121	Muito argilosa		0,11
	Bw	785	107	108	Muito argilosa	0,99	0,14
<i>Perfil 2 - PLINTOSSOLO PÉTRICO Concrecionário típico- FFc</i>							
DFE-05	A	605	130	265	Muito argilosa		0,21
	Bc	675	65	260	Muito argilosa	1,11	0,10
<i>Perfil 3 - PLINTOSSOLO PÉTRICO Concrecionário típico- FFc</i>							
DFE-07	Ac	607	213	180	Muito argilosa		0,35
	Bc	587	246	167	Argila	0,97	0,42
<i>Perfil 4 - LATOSSOLO VERMELHO Distrófico típico - LVd</i>							
DFE-11	A	755	74	171	Muito argilosa		0,10
	Bw	773	91	136	Muito argilosa	1,02	0,12
<i>Perfil 5 - LATOSSOLO VERMELHO-AMARELO Distrófico petroplíntico - LVAdc</i>							
DFE-13	A	692	133	175	Muito argilosa		0,19
	Bw	725	90	185	Muito argilosa	1,05	0,12
<i>Perfil 6 - PLINTOSSOLO PÉTRICO Concrecionário típico- FFc</i>							
DFE-15	A	623	89	289	Muito argilosa		0,14
	Bc	702	89	209	Muito argilosa	1,13	0,13

⁽¹⁾ Leitura espectroscópica do horizonte A de amostras de solo, ⁽²⁾ Classificação textural segundo Santos et al. (2013).

Tabela 14. Características físicas e dos perfis da Lito-toposequência 2 – Alto Rio Jardim

Amostra ⁽¹⁾	Horizonte	Argila	Silte	Areia	Textura ⁽²⁾	B/A	Silte/Argila
g kg ⁻¹							
<i>Perfil 1 - PLINTOSSOLO PÉTRICO Concrecionário - FFc</i>							
DFAJ-01	Ac	500	280	220	Argila		0,56
	F	651	263	85	Muito argilosa	-	0,40
<i>Perfil 2 - PLINTOSSOLO PÉTRICO Concrecionário típico - FFc</i>							
DFAJ-03	Ac	436	453	111	Argilo-siltosa		1,04
	F	621	312	67	Muito argilosa	-	0,50
<i>Perfil 3 - PLINTOSSOLO PÉTRICO Concrecionário típico - FFc</i>							
DFAJ-05	Ac	550	381	69	Argila		0,69
	F	583	374	43	Argila	-	0,64
<i>Perfil 4 - CAMBISSOLO HÁPLICO Tb Distrófico - CXbd</i>							
DFAJ-07	A	502	417	82	Argilossiltosa		0,83
	Bi	514	397	89	Argila	1,02	0,77
<i>Perfil 5 - NEOSSOLO REGOLÍTICO Distrófico - RRd</i>							
DFAJ-09	A	493	358	148	Argila		0,73
	C	435	422	144	Argilo-siltosa	-	0,97
<i>Perfil 6 - NEOSSOLO REGOLÍTICO Distrófico - RRd</i>							
DFAJ-11	A	489	412	99	Argilo-siltosa		0,84
	C	528	435	37	Argilo-siltosa	-	0,82
<i>Perfil 7 - NEOSSOLO REGOLÍTICO Distrófico - RRd</i>							
DFAJ-13	A	422	382	197	Argila		0,90
	C	415	365	219	Argila	-	0,88
<i>Perfil 8 - GLEISSOLO HÁPLICO Tb Distrófico - GXbd</i>							
DFAJ-15	A	402	414	185	Argilo-siltosa		1,03
	Cg	435	422	143	Argilo-siltosa	-	0,97
<i>Perfil 9 - LATOSSOLO VERMELHO - LV</i>							
DFAJ-17	A	684	248	67	Muito argilosa		0,36
	Bw	702	225	73	Muito argilosa	1,03	0,32

⁽¹⁾ Leitura espectroscópica do horizonte A de amostras de solo, ⁽²⁾ Classificação textural segundo Santos et al. (2013).

A textura não apresentou grandes diferenças entre os perfis das lito-topossequências estudadas, variando de muito argilosa, argilosa a argilos-siltosa (Figura 29), de acordo com a classificação textural do solo segundo Santos et al. (2013). Esta variação mostra relação textural com os materiais de origem, uma vez que foram originados a partir de rochas meta-sedimentares pré-intemperizadas dos Grupos Bambuí, Canastra e, uma pequena área, Paranoá (Freitas-Silva e Campos, 1998a). Esta informação concorda com Vieira et al. (2007) que relataram que a textura, é dependente do material de origem e dos agentes naturais de formação do solo, não sendo modificada pelo cultivo e outras práticas agrícolas. No entanto, a erosão diferencial pode promover, na camada superficial do solo, pequenas variações na proporção das frações granulométricas.

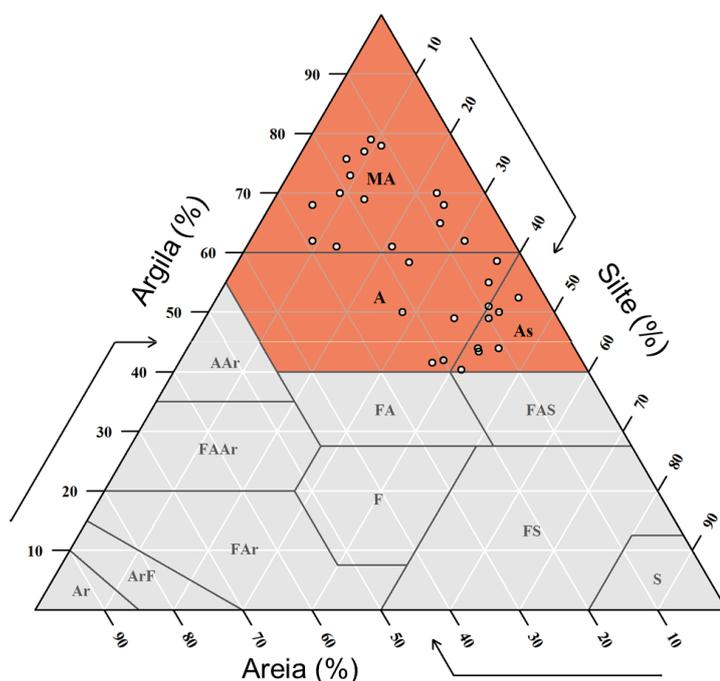


Figura 29. Classes texturais do solo e valores dos limites das frações granulométricas, de acordo com Santos, et al. (2013). MA: muito argilosa, A: argila, As: argila siltosa, AAr: argila arenosa, FA: franco argiloso, FAS: franco argilo siltoso, FAAr: franco argilo arenoso, F: franco, FS: franco siltoso, FAr: franco arenoso, S: silte, ArF: areia franca, Ar: areia

O gradiente textural, variou de 1,02 no Bi no perfil 4 da Lito-topossequência 2 – Alto Rio Jardim, de 0,99 a 1,05 nos horizontes Bw dos Latossolos e de 0,97 a 1,13 nos horizontes Bc dos Plintossolos Pétricos Concrecionários, os quais possuem matriz latossólica.

A relação silte/argila apresentou valores muito baixos a baixos para os Latossolos e Plintossolos (Tabela 13 e 14) mostrando elevado grau de intemperização destes (Embrapa, 2013). Quanto aos Cambissolos, Neossolos Regolíticos e Gleissolos, a relação silte/argila apresentou valores mais elevados, demonstrando menor grau de evolução desses solos. A relação silte/argila muito baixa dos Latossolos e Plintossolos é decorrente do grau elevado de

intemperização destes solos associada ao material de origem, rochas meta-sedimentares já intemperizado nos seus processos genéticos.

Desta forma, os resultados encontrados foram semelhantes aos descritos por Barbosa et al. (2009), Pereira et al. (2010) e Junior et al. (2015) em solos desenvolvidos a partir de litologias pelíticas do Planalto Central Brasileiro.

De acordo com Embrapa (2013) a relação silte/argila é utilizada em solos de textura franco arenosa ou mais fina como base para avaliar o estágio de intemperismo de solos tropicais. Valores abaixo de 0,7 nos solos de textura média ou inferiores a 0,6 nos solos de textura argilosa ou muito argilosa representam alto grau de intemperismo.

Ainda segundo Embrapa (2013), essa relação é utilizada para diferenciar horizonte B latossólico de B incipiente, quando eles apresentam características morfológicas semelhantes.

VII.3.1.3. Atributos químicos

Para avaliação de atributos químicos, foram analisadas as 30 amostras de solo coletadas nas lito-topossequências Estanislau e Alto Rio Jardim, consideradas representativas das classes de solos de ocorrência na Bacia do Rio Jardim, DF. Os resultados das análises químicas dos solos estudados estão apresentados nas Tabelas 15 e 16.

O pH em H₂O variou de 4,4 a 5,4 nos horizontes A e de 4,6 a 5,4 nos horizontes subsuperficiais B, C ou F dos perfis das lito-topossequências estudadas.

Os Latossolos, Plintossolos, Cambissolos, Neossolos Regolíticos e Gleissolos estudados foram classificados em fortemente ácidos (pH entre 4,3 e 5,3) (Embrapa, 2013), com apenas duas exceções: perfil 2 da Lito-topossequência Estanislau, Plintossolo Pétrico Concrecionário típico, que apresentou pH de 5,4 no horizonte B concrecionário; e o perfil 7 da Lito-topossequência Alto Rio Jardim, Latossolo Vermelho-Amarelo Distrófico típico, que apresentou pH de 5,4 no horizonte Bw.

A acidez dos solos da região estudada é, então, considerada variável, particularmente em função do grau evolutivo dos mesmos e do material de origem, tal como verificado nos relatos de Reatto et al. (2000) e Motta et al., (2002) que caracterizaram solos na região de Terceira Superfície Geomorfológica do Planalto Central Brasileiro - equivalente em parte ao domínio da área de Planos Intermediários da SEMARH (2012), observando que o pH dos solos apresentaram-se fortemente ácidos nos horizontes A e B diagnóstico. Já no Levantamento de Reconhecimento de Solos realizado por Embrapa (1978) os solos da Superfície Geomorfológica de idade intermediária do DF, variaram de forte a moderadamente ácidos.

Tabela 15. Características químicas dos perfis da Lito-topossequência 1 – Estanislau

Amt. ⁽¹⁾	Horiz. ⁽²⁾	pH H ₂ O	Ca ²⁺	Mg ²⁺	K ⁺	Al ³⁺	H ⁺ +Al ³⁺	P	S	t	T	V	m	T argila	MO	C _{org}
			cmolc dm ⁻³						mg kg ⁻¹	cmolc dm ⁻³		%	cmolc dm ⁻³	g kg ⁻¹		
<i>Perfil 1 - LATOSSOLO VERMELHO Distrófico típico – LVd</i>																
DFE-01	A	5,0	0,60	0,20	0,16	0,40	6,90	3,30	0,96	1,36	7,90	13,00	29,00	9,92	27,00	16,00
	Bw	5,3	0,30	0,10	0,04	0,10	2,00	2,80	0,44	0,54	2,40	17,00	20,00	3,11	11,00	7,00
<i>Perfil 2 - PLINTOSSOLO PÉTRICO Concrecionário típico- FFc</i>																
DFE-05	A	4,8	1,00	0,40	0,51	1,10	9,20	8,70	1,91	3,01	11,10	17,00	37,00	18,34	34,00	19,00
	Bc	5,4	0,40	0,20	0,07	0,10	3,80	3,00	0,67	0,77	4,50	16,00	12,00	6,63	20,00	12,00
<i>Perfil 3 - PLINTOSSOLO PÉTRICO Concrecionário típico- FFc</i>																
DFE-07	Ac	5,2	0,70	0,30	0,47	1,00	7,60	2,90	1,47	2,47	9,10	16,00	40,00	14,94	29,00	16,00
	Bc	4,7	0,40	0,20	0,17	0,20	3,80	2,40	0,77	0,97	4,60	17,00	20,00	7,79	20,00	12,00
<i>Perfil 4 - LATOSSOLO VERMELHO Distrófico típico – LVd</i>																
DFE-11	A	5,1	0,60	0,40	0,43	0,70	8,40	3,70	1,43	2,13	9,80	14,00	33,00	13,02	36,00	21,00
	Bw	4,9	0,30	0,10	0,08	0,10	3,30	3,00	0,48	0,58	3,80	13,00	17,00	4,88	20,00	11,00
<i>Perfil 5 - LATOSSOLO VERMELHO-AMARELO Distrófico petroplíntico – LVAdc</i>																
DFE-13	A	5,1	1,00	0,40	0,31	0,40	7,40	3,30	1,71	2,11	9,10	19,00	19,00	13,17	31,00	18,00
	Bw	5,4	0,30	0,10	0,12	0,10	2,10	3,00	0,52	0,62	2,60	19,00	17,00	3,61	17,00	10,00
<i>Perfil 6 - PLINTOSSOLO PÉTRICO Concrecionário típico- FFc</i>																
DFE-15	A	5,0	0,60	0,30	0,38	0,40	6,80	3,10	1,28	1,68	8,10	16,00	24,00	12,98	28,00	16,00
	Bc	5,1	0,40	0,10	0,19	0,10	2,50	2,80	0,69	0,79	3,20	22,00	12,00	4,54	17,00	10,00

⁽¹⁾ Leitura espectroscópica do horizonte A de amostras de solo, ⁽²⁾ Horizonte, S = Soma de bases (Ca²⁺+Mg²⁺+K⁺); T = Capacidade de Troca Catiônica (S+H⁺+Al³⁺); V% = saturação de bases (100 x S/T); m% = saturação por alumínio (Al³⁺*100/t); t = CTC efetiva = S+Al³⁺; T argila= (T*1000/conteúdo de argila); MO: Matéria Orgânica; C_{org}: Carbono orgânico

Tabela 16. Características químicas dos perfis da Lito-topossequência 2 – Alto Rio Jardim

Amt. ⁽¹⁾	Horiz. ⁽²⁾	pH H ₂ O	Ca ²⁺	Mg ²⁺	K ⁺	Al ³⁺	H ⁺ +Al ³⁺	P	S	t	T	V	m	T argila	MO	C _{org}
			cmol _c dm ⁻³						mg kg ⁻¹	cmol _c dm ⁻³			%	cmol _c dm ⁻³	g kg ⁻¹	
<i>Perfil 1 - PLINTOSSOLO PÉTRICO Concrecionário - FFc</i>																
DFAJ-01	Ac	5,1	1,60	1,00	0,38	0,20	5,40	4,80	2,98	3,18	8,40	36,00	6,00	16,77	32,00	18,00
	F	5,1	0,40	0,30	0,16	0,40	4,00	2,50	0,86	1,26	4,90	18,00	31,00	7,46	21,00	12,00
<i>Perfil 2 - PLINTOSSOLO PÉTRICO Concrecionário típico - FFc</i>																
DFAJ-03	Ac	4,4	0,30	0,20	0,21	0,90	6,30	2,10	0,71	1,61	7,00	10,00	56,00	16,09	28,00	16,00
	F	4,9	0,40	0,30	0,26	0,60	3,10	3,20	0,96	1,56	4,10	24,00	38,00	6,54	20,00	11,00
<i>Perfil 3 - PLINTOSSOLO PÉTRICO Concrecionário típico - FFc</i>																
DFAJ-05	Ac	5,0	0,70	0,60	0,49	0,60	6,60	7,80	1,79	2,39	8,40	21,00	25,00	15,24	33,00	19,00
	F	5,3	0,40	0,30	0,37	0,90	6,10	4,10	1,07	1,97	7,20	15,00	45,00	12,30	26,00	15,00
<i>Perfil 4 - CAMBISSOLO HÁPLICO Tb Distrófico - CXbd</i>																
DFAJ-07	A	4,9	0,50	0,40	0,37	1,00	5,40	5,80	1,27	2,27	6,70	19,00	43,00	13,31	31,00	18,00
	Bi	4,6	0,40	0,30	0,19	1,30	5,40	3,80	0,89	2,19	6,30	14,00	59,00	12,24	22,00	13,00
<i>Perfil 5 - NEOSSOLO REGOLÍTICO Distrófico - RRd</i>																
DFAJ-09	A	5,3	1,30	2,20	0,39	1,10	5,80	5,90	3,89	4,99	9,70	40,00	22,00	19,65	33,00	19,00
	C	5,0	0,50	1,50	0,09	6,50	12,40	2,50	2,09	8,59	14,50	14,00	76,00	33,34	15,00	9,00
<i>Perfil 6 - NEOSSOLO REGOLÍTICO Distrófico - RRd</i>																
DFAJ-11	A	5,0	1,00	0,90	0,42	1,70	7,80	3,00	2,32	4,02	10,10	23,00	42,00	20,68	31,00	18,00
	C	4,9	0,30	0,30	0,07	3,00	5,80	2,60	0,67	3,67	6,50	11,00	81,00	12,26	8,00	4,00
<i>Perfil 7 - NEOSSOLO REGOLÍTICO Distrófico - RRd</i>																
DFAJ-13	A	5,0	1,00	1,50	0,51	1,10	5,80	5,20	3,01	4,11	8,80	34,00	27,00	20,88	28,00	16,00
	C	4,7	0,40	1,30	0,13	2,90	5,80	2,40	1,83	4,73	7,60	24,00	62,00	18,36	11,00	7,00
<i>Perfil 8 - GLEISSOLO HÁPLICO Tb Distrófico - GXbd</i>																
DFAJ-15	A	5,4	2,80	0,90	0,15	0,30	3,60	4,90	3,85	4,15	7,40	51,00	7,00	18,55	22,00	13,00
	Cg	4,8	0,60	0,40	0,09	1,80	4,60	2,30	1,09	2,89	5,70	19,00	62,00	13,08	18,00	11,00
<i>Perfil 10 - LATOSSOLO VERMELHO Distrófico típico - LVd</i>																
DFAJ-17	A	4,7	0,60	0,40	0,25	0,50	5,00	3,60	1,25	1,75	6,20	19,00	31,00	9,13	28,00	16,00
	Bw	4,8	0,50	0,40	0,12	0,10	1,30	2,40	1,02	1,12	2,30	43,00	9,00	3,30	17,00	10,00

⁽¹⁾ Leitura espectroscópica do horizonte A de amostras de solo, ⁽²⁾ Horizonte, S = Soma de bases (Ca²⁺+Mg²⁺+K⁺); T = Capacidade de Troca Catiônica (S+H⁺+Al³⁺); V% = saturação de bases (100 x S/T); m% = saturação por alumínio (Al³⁺*100/t); t = CTC efetiva = S+Al³⁺; T argila= (T*100/conteúdo de argila); MO: Matéria Orgânica; C_{org}: Carbono orgânico

Os baixos valores de pH encontrados em todos os perfis estão relacionados, principalmente, com a dissociação do H^+ e com a elevada acidez potencial ($H^+ + Al^{3+}$) (Barbosa, 2007). De modo geral, os horizontes A dos solos estudados apresentam pH mais baixos do que os horizontes B, C ou F em função da presença de MO, que tem como propriedade a acidificação dos solos (Goedert, 1985).

Com relação às análises do complexo sortivo, observaram-se baixos valores de S, CTC e V%. Os Latossolos e Plintossolos exibiram valores baixos de saturação por alumínio ($m\% < 50\%$), caracterizando solos alíticos e não alumínicos como geralmente é relatado nessas regiões (Barbosa et al., 2009; Pereira et al., 2010; Lacerda e Barbosa, 2012). Cambissolos, Neossolos Regolíticos e Gleissolos da área de estudo obtiveram valores bastante altos de saturação por alumínio ($m\% > 50\%$) (Embrapa, 2013).

Todos os perfis das duas lito-topossequências analisadas apresentaram valores de $V\% < 50\%$, indicando que os solos são distróficos, de acordo com Embrapa (2013). Em sua maioria, esse atributo está relacionado principalmente ao material de origem, que são rochas metassedimentares pelíticas pré-intemperizadas, pertencentes aos Grupos geológicos de ocorrência na área de estudo, refletindo assim na baixa fertilidade natural desses solos (Freitas-Silva e Campos, 1998a). Desta forma, os solos originados a partir destas rochas apresentam baixos valores de CTC, S e V%.

Quanto ao teor MO e Corg, a maioria dos solos estudados apresentou valores elevados, o que pode ser justificado em função de grande parte dos perfis descritos ocorrerem em áreas de vegetação nativa (Ferreira, 2005; Carvalho e Lacerda, 2007).

Observa-se nas Tabelas 15 e 16, que nos horizontes superficiais (A) a MO mostraram-se com teores médios, variando de 22,0 a 36,0 $g\ kg^{-1}$, e teores de CTC variando de 6,2 a 11,1 $cmol_c\ dm^{-3}$, ambos maiores que os valores encontrados nos horizontes subsuperficiais (Tabela 15 e 16), em função da ocorrência de MO. Estes dados concordam com Lago (2012), que determinou que a MO e a CTC apresentaram correlação positiva e significativa, na qual os maiores teores desses atributos foram verificados na camada mais superficial do solo com usos diversificados, de 0 a 10 cm de profundidade, na microbacia do Ribeirão Estrema, DF (Lago et al., 2012).

De acordo com o levantamento semidetalhado dos solos da Bacia do rio Jardim (DF), realizado por Reatto et al. (2000), na escala 1:50.000, os Latossolos Vermelhos e Vermelho-Amarelos apresentaram uma variação de V% de 4 a 49%, m% de 2 a 58% e Corg variando entre 18 e 29 $g\ kg^{-1}$. Os Cambissolos Háplicos mostraram variação de V% entre 28 e 76%, m% de 0 a 89% e Corg com média de 21%. Os Plintossolos Háplicos exibiram valores médios de V% de 6%, m% de 32% e Corg variando entre 3 a 16%. Os Gleissolos Háplicos apresentaram valores de V% variando de 3 a 11%, m% de 81 a 91% e Corg de 12 a 21%. Já os Neossolos obtiveram valores médios de V% de 8%, m% de 81% e Corg variando de 2 a

8%. Estas informações sobre principais atributos químicos de solos divergem dos valores determinados neste trabalho para a mesma área do DF, visto que, neste trabalho, foram selecionados, em sua grande maioria, perfis de solo ocupados com vegetação nativa, não cultivados.

VII.3.2. Imagem composta de solos expostos

A IC de solos expostos variou de cores magenta a roxo pela combinação dos filtros Vermelho e Azul, produto da reflectância dos solos nas bandas TM3, TM5 e TM7 do L5 (Figura 30).

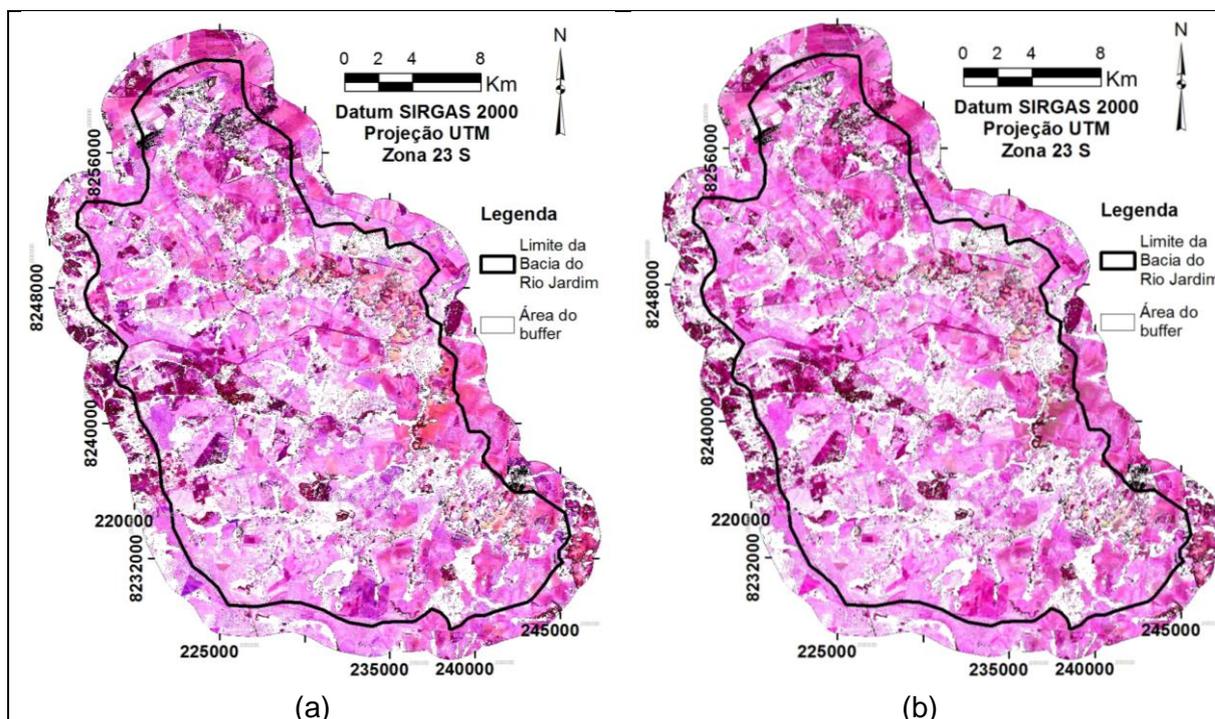


Figura 30. Imagem composta de solos expostos em composição RGB 345 (a) e 745 (b), com realce por meio de histograma de cores com base nos valores da imagem de 26/05/1984.

A quantidade de pixels e suas correspondentes áreas com solo exposto para todas as imagens da série histórica L5-TM estudadas (Tabela 17) indicam que a porcentagem de solo exposto variou de aproximadamente 8% na imagem de 02/06/1998 a 43% na imagem de 09/08/1988. A compilação do conjunto de imagens resultou na IC com aproximadamente 74% (39.710 ha) dos pixels com alta probabilidade de representarem solos expostos. Esta área equivale a nove vezes mais a representação que a imagem com menor porcentagem de solo exposto e aproximadamente duas vezes mais que a imagem com maior porcentagem de solo exposto.

Gallo (2015) utilizou a mesma metodologia para gerar uma IC de solos expostos na região de Piracicaba, SP, e obteve de 7 a 20% de áreas compostas por solo exposto em cada

imagem da série histórica utilizada, e um total de 53% de áreas com solos expostos na IC. Portanto, as áreas obtidas neste trabalho foram superiores as demonstradas por Gallo (2015). Tal fato deve-se ao aumento das práticas agrícolas na Bacia do Rio Jardim ao longo da série histórica avaliada (Carvalho e Lacerda, 2007; Campos et al., 2011).

Tabela 17. Área composta por solo exposto em cada imagem

Imagens TM-5	Solo exposto		
	Pixels	Área (ha)	(%) ¹
26/05/1984	53.875	4.849	9%
04/08/1986	115.327	10.379	19%
09/08/1988	257.397	23.166	43%
02/08/1991	153.187	13.787	26%
22/07/1993	87.539	7.879	15%
02/06/1998	47.129	4.242	8%
18/07/2003	102.979	9.268	17%
22/09/2004	223.162	20.085	37%
01/09/2008	126.118	11.351	21%
03/08/2009	153.797	13.842	26%
Imagem Composta	441.218	39.710	74%

¹Porcentagem em função da área total da Bacia de 53.614 ha

Os 26% de área sem informação de solo desde 1984 até 2009 representam áreas de Campo, Cerrado e Mata Galeria (áreas de preservação permanente ou pequenas faixas de área com vegetação nativa, como as reservas legais de propriedades rurais) ou pequenos reservatórios de água além de construções rurais.

A contribuição para a IC de pixels e suas correspondentes áreas com solos expostos de cada imagem de solos exposto da série histórica estudada (Tabela 18) indica que a porcentagem de solos expostos variou de aproximadamente de 1% na imagem de 02/06/1998 a 24% na imagem de 09/08/1988. A contribuição de pixels de cada imagem concorda com a sua correspondente área de solos expostos (Tabela 17).

Tabela 18. Área de contribuição de cada imagem de solo exposto na imagem composta.

Imagens de solo exposto	Imagem Composta		
	Pixels	Área (ha)	(%) ¹
26/05/1984	17.542	1.579	4%
04/08/1986	42.450	3.821	10%
09/08/1988	104.002	9.360	24%
02/08/1991	50.289	4.526	11%
22/07/1993	42.990	3.869	10%
02/06/1998	2.897	261	1%
18/07/2003	30.842	2.776	7%
22/09/2004	70.995	6.390	16%
01/09/2008	52.277	4.705	12%
03/08/2009	26.933	2.424	6%

¹Porcentagem em função da área total de solos expostos de 39.710 ha

A IC da Bacia do Rio Jardim avaliada em composição RGB 345 e 745, apresentaram os pixels com solo exposto em manchas com diferentes tons que vai desde rosa até roxo (Figura 30). A utilização do histograma de cores nas imagens da série histórica melhorou o contraste de cores, salientando as áreas de solos expostos tal como verificado também no trabalho de Gallo (2015).

Dalmolin et al. (2005) relataram que a composição mineralógica da fração argila, fortemente dependente do grau de evolução dos solos e da intensidade do intemperismo do seu material de origem, é essencial para avaliar o comportamento espectral dos solos. De acordo com Bellinaso et al. (2010), solos derivados de rochas vulcânicas, com elevados teores de ferro, apresentam menor intensidade de reflectância (elevada absorção), enquanto que solos derivados de rochas sedimentares com teores médios de ferro possuem intensidades de reflectância intermediários. Já solos derivados de rochas sedimentares com baixos teores de ferro apresentam altos valores de intensidade de reflectância (baixa absorção). Madeira Netto e Baptista (2000) relataram que, em solos tropicais, os minerais secundários de maior ocorrência correspondem a caulinita e óxidos de ferro como a hematita, goethita e gibsitita.

Segundo Genú e Demattê (2012), a resposta espectral dos solos varia fortemente em função da quantidade de MO que possuem, causando diminuição da intensidade de reflectância dos solos na faixa de 400 a 2.500 nm.

Bellinaso et al. (2010) demonstraram que a MO ocasionou uma redução da intensidade de reflectância dos solos, assim como aumentos nos teores de ferro.

Segundo a teoria tricromática (Young, 1802), os valores no sistema RGB variam de 0 a 255 para cada canal. Desta forma, valores baixos de RGB geram cores mais escuras, indicando menor reflectância (maior absorção), e valores altos geram cores mais claras, indicando maior reflectância (menor absorção).

Todos esses fatos são observados nas Figuras 30 e 33, em que valores mais baixos no fator reflectância correspondem aos tons de rosa escuro e roxo escuro, e valores mais altos de reflectância, refere-se aos tons mais claros, ambos representados pela combinação do filtro vermelho na banda TM3 e TM7, e do azul na banda TM5.

O comportamento espectral das amostras coletadas da imagem composta de solos expostos, apresenta maior intensidade de reflectância na banda TM5, seguida, em ordem decrescente, pelo albedo da banda $TM7 > TM4 > TM3 > TM2 > TM1$ (Figura 31). Tais resultados concordam com Demattê (2002) e Gallo (2015).

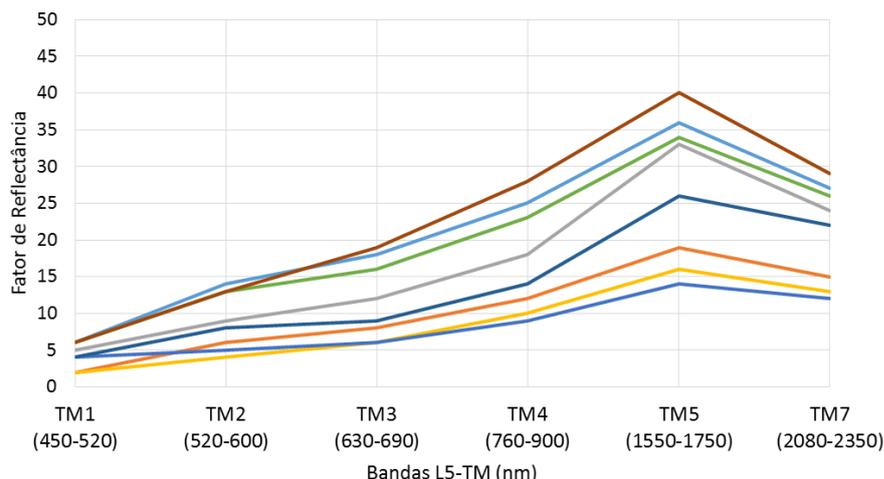


Figura 31. Espectros coletados da imagem composta de solos expostos.

Por meio da análise de solos expostos da IC com base na linha do solo, foi observado que os solos com textura argilosa se posicionam próximo à origem dos eixos X (TM3-VIS) e Y (TM4-NIR) do gráfico da linha do solo (Figura 32), em direção correspondente a 45° dos eixos, mantendo relação 1:1 (TM3:TM4). Conforme vai diminuindo o conteúdo de argila e o teor de ferro, o posicionamento dos pontos vai se distanciando da origem (Demattê et al., 2009). Este comportamento ocorre porque a curva espectral do solo apresenta reflectâncias bastante semelhantes entre as bandas TM3 e TM4, fazendo com que os valores fiquem dispostos a 45° no gráfico TM3 X TM4 (Figura 32). Estes resultados estão de acordo com Nanni e Demattê (2006b), que geraram a linha do solo para diversas classes de solos com texturas variadas, por meio de sensor terrestre simulando as bandas TM3 e TM4. Gallo (2015) gerou uma imagem multitemporal de imagens de satélite composta de solos expostos com o objetivo de mapear atributos da superfície dos solos e obteve resultados similares aos gerados neste trabalho para o comportamento da linha do solo.

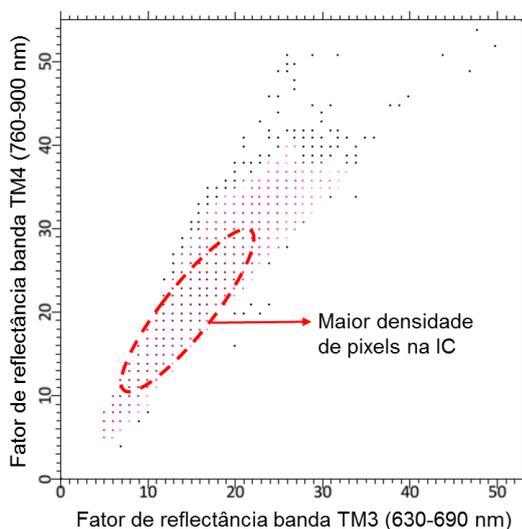


Figura 32. Linha do solo obtida da imagem composta, contrapondo valores de reflectância da banda TM3 (VIS) e da banda TM4 (NIR).

A Figura 33 mostra a IC de solos expostos, conjuntamente com áreas ampliadas da imagem de satélite original (IMO) da data de 26/05/1984, com áreas da IC sobreposta a original (ICS), particularmente em áreas de ocorrência de solos expostos.

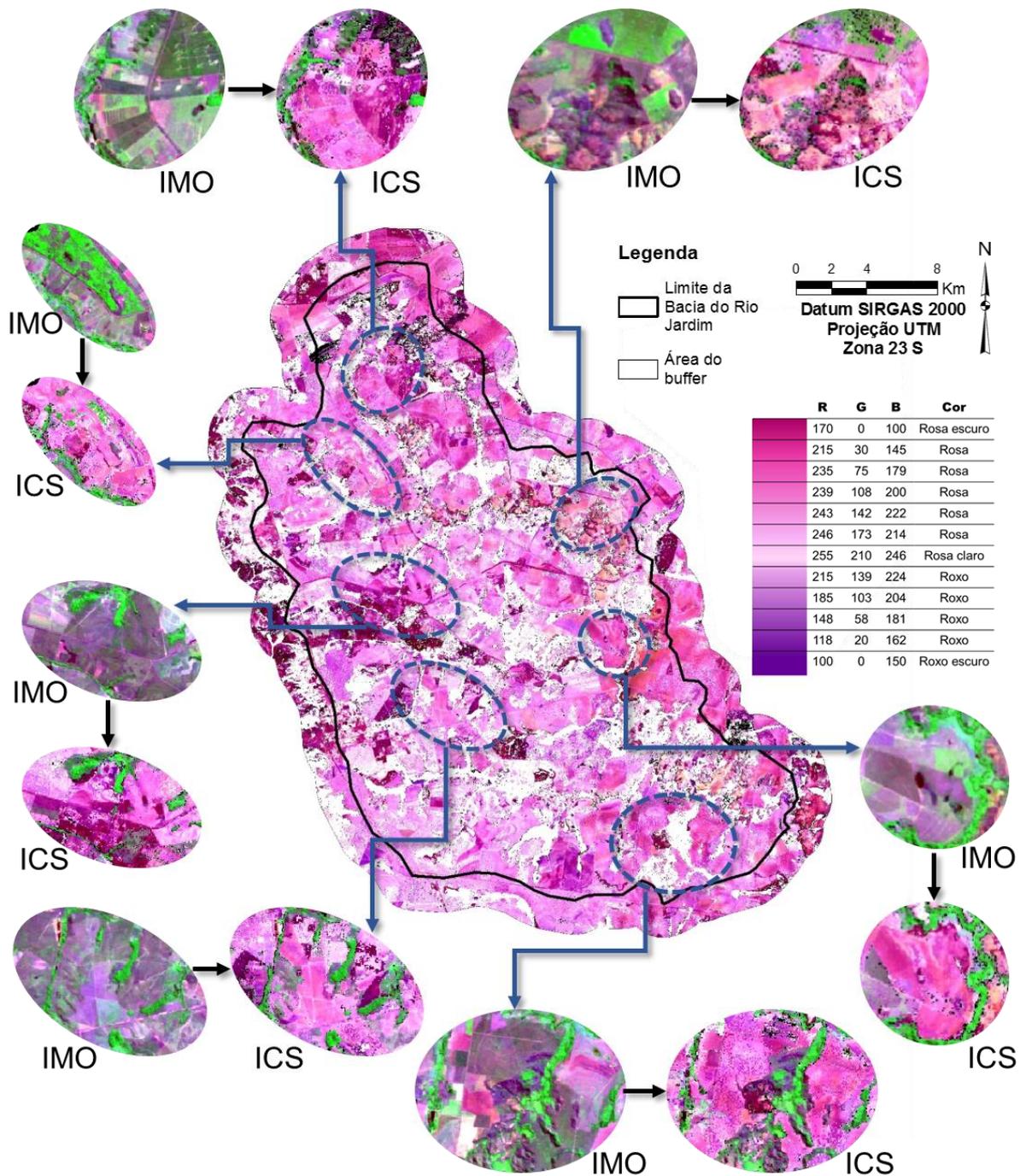


Figura 33. Imagem composta com solo exposto. IMO: imagem de satélite original, da data de 26/05/1984; ICS: imagem composta sobreposta a original.

Nota-se que nas ICS as áreas estão consideravelmente preenchidas por solos expostos, possivelmente pelo preparo do solo para o estabelecimento das culturas. Ferreira (2005) e Carvalho e Lacerda (2007) observaram que o intervalo de 1984 a 1992 constituiu o período de maiores alterações nos usos e ocupações das terras, principalmente, pela expansão da agricultura sob sistema de plantio convencional, com grande porcentual de substituição da vegetação nativa. De 1992 a 2003 teve manutenção do uso pela agricultura, com introdução do sistema de plantio direto (SPD) em substituição ao sistema de plantio convencional. De acordo com Chaves et al. (2010), Campos et al. (2011) e Lago et al. (2012), esta tendência de expansão agrícola continuou com substituições de usos moderados por usos cada vez mais intensivos das terras.

Silva et al. (2009) relataram que a utilização do sistema de cultivo de plantio direto foi um importante ganho conservacionista em relação ao sistema de cultivo convencional, o qual se baseia na baixa movimentação do solo aliado à manutenção de resíduos das culturas sobre a superfície do solo (palhada).

Desta forma, com a introdução do SPD, os solos da área de estudo passaram a estar recobertos por palhada, com diferente distribuição ao longo da série histórica estudada, que foram mascaradas na metodologia utilizada de geração das imagens de solos expostos, proposta por Fongaro (2015).

VII.3.3. Atributos espectroscópicos

VII.3.3.1. Curvas espectrais obtidas dos perfis de solos avaliados

No total foram obtidos 37 espectros de horizontes superficiais A, sendo 29 amostras obtidas de perfis de solos das cinco lito-topossequências estudadas, e 8 amostras coletadas com trado.

A representação gráfica da relação fator de reflectância e comprimento de onda permite visualizar a curva espectral dos solos (Demattê, 2002). A Figura 34 mostram gráficos com todas as curvas espectrais obtidas para cada classe de solo nas regiões do VIS-NIR-SWIR. Os espectros de algumas classes de solos foram agrupados em função da semelhança espectral, e foram obtidas as médias de cada agrupamento (Demattê e Nanni, 2003; Franceschini et al., 2013; Genú et al., 2013), visualizadas nos gráficos dispostos do lado direito na Figura 34b – 34j. Esta semelhança espectral, responsável pelos agrupamentos dos espectros, está relacionada à coloração dos solos, em que refletem os teores de matéria orgânica e/ou teores de óxidos de ferro, que interferem na intensidade do fator de reflectância (Dalmolin et al., 2005).

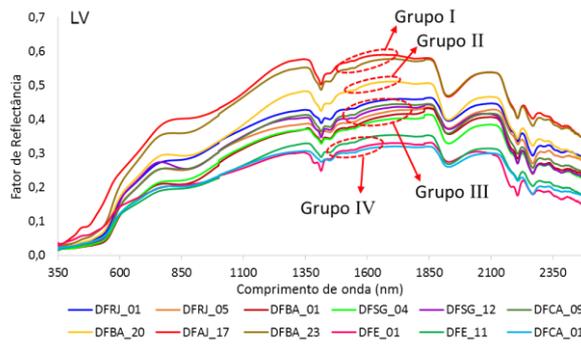
Desta forma, foram obtidos quatro espectros médios de reflectância para Latossolo Vermelho (LV-I, LV-II, LV-III e LV-IV), dois para Latossolo Vermelho-Amarelo (LVA-I e LVA-

II), dois para Neossolo Regolítico (RR-I e RR-II), três para Plintossolo Pétrico (FF-I, FF-II e FF-III), um para Gleissolo Háplico (GX), um para Plintossolo Háplico (FX), um para Cambissolo Háplico (CX) e um para Organossolo Háplico (OX). Os principais atributos que representam estes espectros foram identificados na Tabela 19.

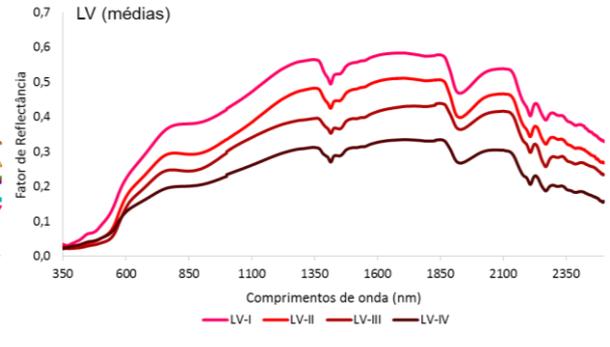
Tabela 19. Principais atributos responsáveis pelo agrupamento de classes de solos.

Espectro	Textura	Cor úmida (Munsell)	MO (g kg ⁻¹)
LV – Latossolos Vermelhos			
LV-I	Argilosa	10R 4/6	28
LV-II	Argilosa	10R 4/5	
LV-III	Muito argilosa	10R 4/4	
LV-IV	Muito argilosa	10R 4/3	36
LVA – Latossolos Vermelho-Amarelos			
LVA-I	Argilosa	10YR 3/4	
LVA-II	Muito Argilosa	5YR 4/4	
RR – Neossolos Regolíticos			
RR-I	Argilo siltosa	7,5YR 5/6	
RR-II	Argilosa	5YR 5/5	
CX – Cambissolo Háplico			
CX	Argilosa	7,5YR 4/6	
FX – Plintossolo Háplico			
FX	Argilosa	2,5Y 3/2	31
FF – Plintossolos Pétricos			
FF-I	Argilosa	10YR 4/6	29
FF-II	Argilosa	10YR 4/5	31
FF-III	Muito Argilosa	7,5YR 4/4	34

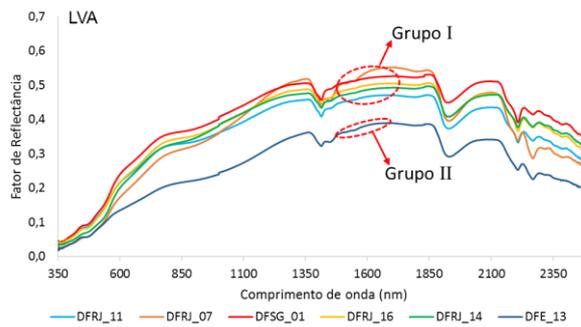
As siglas das amostras dispostas no lado esquerdo na Figura 34a – 34m estão relacionadas com a lito-topossequência da qual procedem. Desta forma temos as Lito-topossequências Estanislau – DFE, Alto Rio Jardim – DFAJ, São Gonçalo – DFSG, Barra Alta – DFBA, Cariru – DFCA. Os dados espectroscópicos dos perfis 2, 3 e 4 da Lito-topossequência Cariru não foram analisados, porém esses perfis foram contemplados nas descrições morfológicas para manter a representatividade de solos da lito-topossequência.



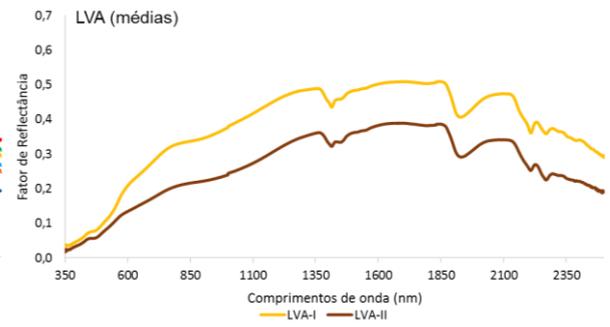
(a)



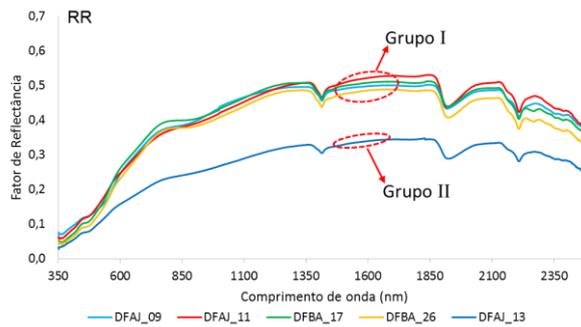
(b)



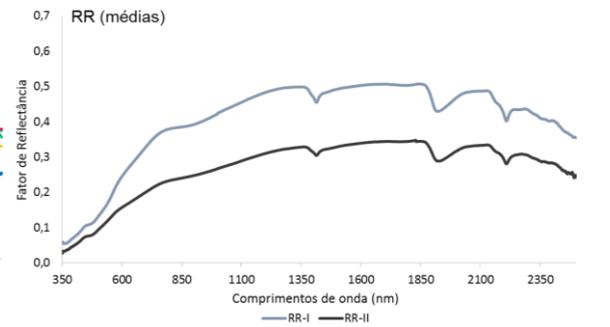
(c)



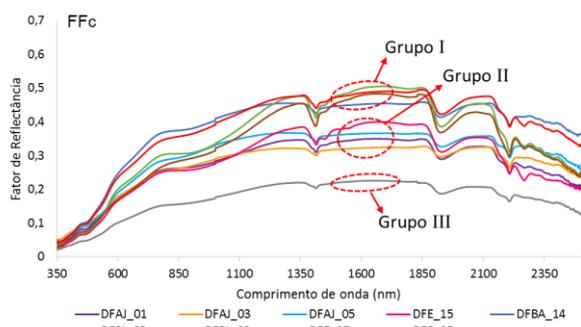
(d)



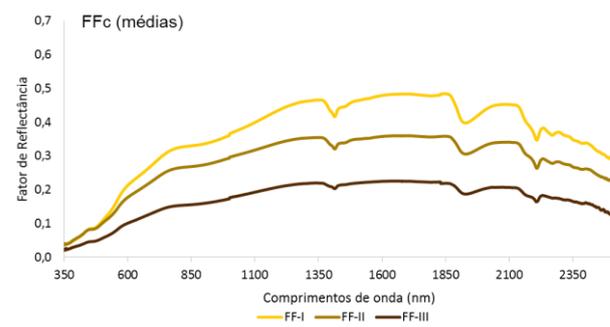
(e)



(f)



(g)



(h)

Continua na próxima folha (Figura 34).

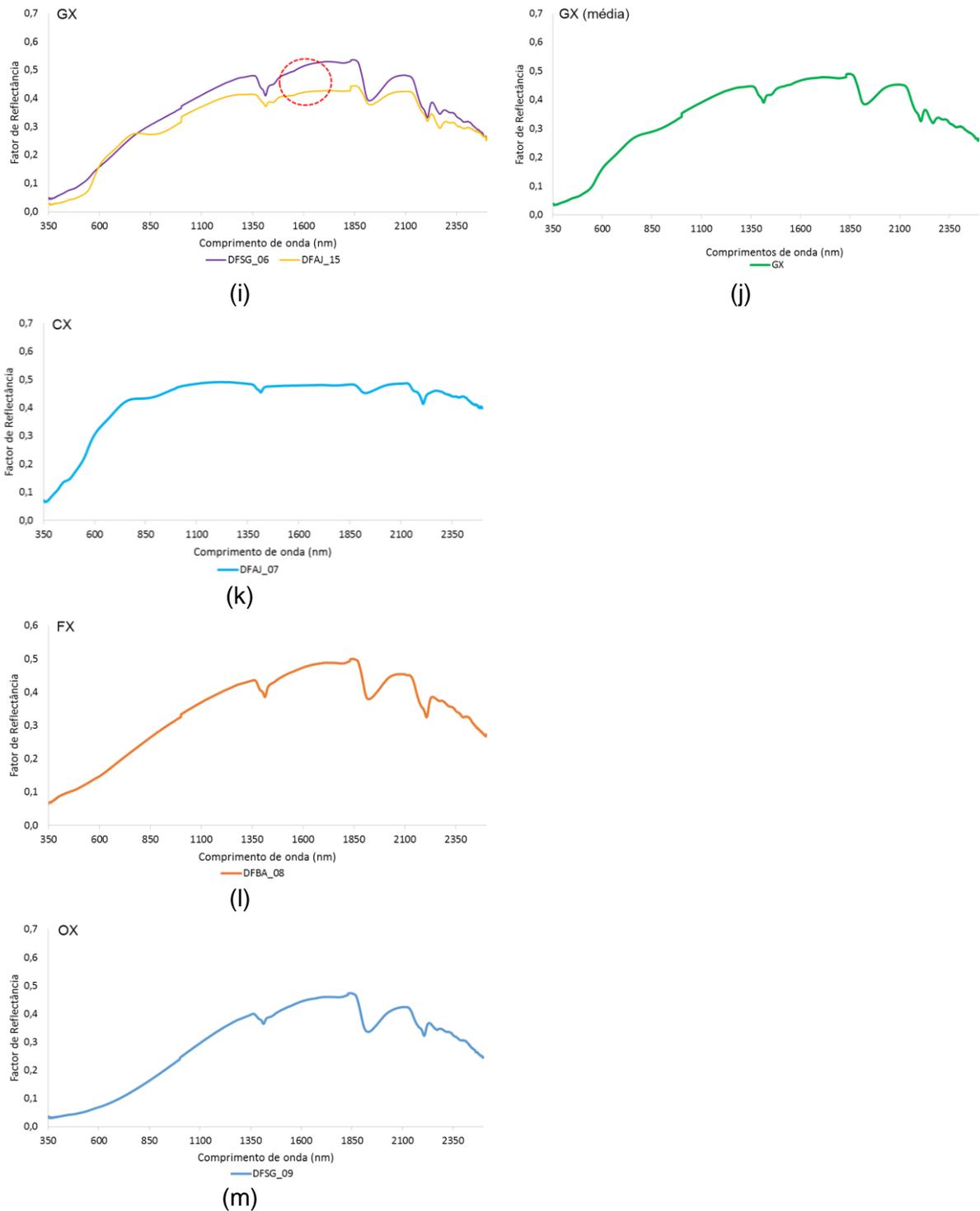


Figura 34. Curvas espectrais obtidas dos horizontes A dos solos avaliados da Bacia do Rio Jardim, DF. Os gráficos da esquerda correspondem aos espectros das amostras dos horizontes superficiais A de cada classe de solo das cinco litotopossequências estudadas (a, c, e, g, i, k, l, m). Os gráficos da direita representam os espectros médios obtidos de cada grupamento de curvas espectrais de classes de solos (b, d, f, h, j).

VII.3.3.2. Caracterização das curvas espectrais

Os espectros de reflectância de solos possibilitam inferências acerca da presença de minerais, da textura e do teor de óxidos de ferro e teor de matéria orgânica, entre outros. Com base nessas informações, fornecidas pelos espectros de reflectância, foi realizada a interpretação e descrição morfológica das 15 curvas espectrais obtidas, correspondente às oito classes de solos de ocorrência na Bacia do Rio Jardim e dos agrupamentos destas, sendo que 12 provém das médias dos agrupamentos, de acordo com Demattê (2002), Demattê e Terra (2014) e Demattê et al. (2014).

Os Latossolos têm como principal processo de formação a ferratização, resultando em dessilicação intensa dos minerais primários, assim como também dos minerais secundários menos resistentes, e acumulação residual de argilominerais mais resistentes ao intemperismo e sesquióxidos de ferro e alumínio, o que reflete na pequena diferenciação de atributos entre seus horizontes (Kämpf e Curi, 2012). São os solos de maior expressão na Bacia do Rio Jardim (Reatto et al., 2000).

Nos Latossolos Vermelhos, o fator de reflectância máximo das curvas espectrais variou de 0,3 a 0,6 (Figura 35), apresentando formato quase plano ao longo de toda a faixa de 350 a 2.500 nm. Os espectros com valores mais altos de intensidade de reflectância (LV-I) são os solos com cores vermelhas, com matizes 10R tonalidades de valor 4 e croma 6, provavelmente com menores teores de óxidos de ferro, visto que a textura e o teor de MO não apresentaram variações importantes nos Latossolos Vermelhos da Bacia do Rio Jardim (Tabela 15 e 16), de acordo com Lindenmayer (1972) e Rodrigues e Klamt (1978). Já os LV com valores do fator de reflectância menores (LV-IV) são os Latossolo Vermelhos com cores vermelho-escuro, com matizes 10R e tonalidades de valor 4 e croma 4, possivelmente em função de maior influência dos óxidos de ferro associados ao material de origem, rochas metassedimentares pelíticas que contém cimento ferruginoso (Freitas-Silva e Campos, 1998a).

A hematita apresenta feições de absorção em 580 nm e 850 nm (Stoner et al., 1980; Epiphanyo et al., 1992; Demattê e Garcia, 1999), onde a primeira se confunde com as feições de goethita (feição de absorção principal em 480 nm). As primeiras feições de absorção da hematita são mais largas, em relação à de goethita (480 nm) (Madeira Netto e Baptista, 2000), e estão associadas com as cores mais avermelhadas dos Latossolos Vermelhos (LV-IV) (Madeira Netto et al., 1997). Destaca-se ainda que as feições dos óxidos de ferro são mascaradas pela presença de MO, com feição de absorção de 600 a 1.000 nm, de acordo com Mathews et al. (1973), Epiphanyo et al. (1992) e Bellinaso et al. (2010).

As feições de caulinita (1.400 e 2.200 nm) (Ben-Dor, 2002) e de gibbsita (2.265 nm) (Madeira Netto, 1996) podem ser claramente observadas nos espectros agrupados de LV (LV-I ao LV-IV) que vão de maior a menor fator de reflectância (Figura 35). Observa-se a presença

de um “ombro” ou “degrau” no formato da banda de absorção relacionado à caulinita em cerca de 2.200 nm (Demattê et al., 2015). No espectro de LV-IV, com menor reflectância, na região de 1.400 e 1.900 nm, nota-se os picos de absorção da água adsorvida, água higroscópica e de grupos hidroxila estrutural de argilominerais (Dalmolin et al., 2005). A presença de oxi-hidróxidos de alumínio (gibsitita) no solo indica um maior grau de intemperismo (Buol et al., 2011; Kämpf et al., 2012). A morfologia das curvas e feições da absorção dos perfis de LV estudados são semelhantes às de Latossolos Vermelhos descritas por Bellinaso et al. (2010) e Demattê et al. (2014).

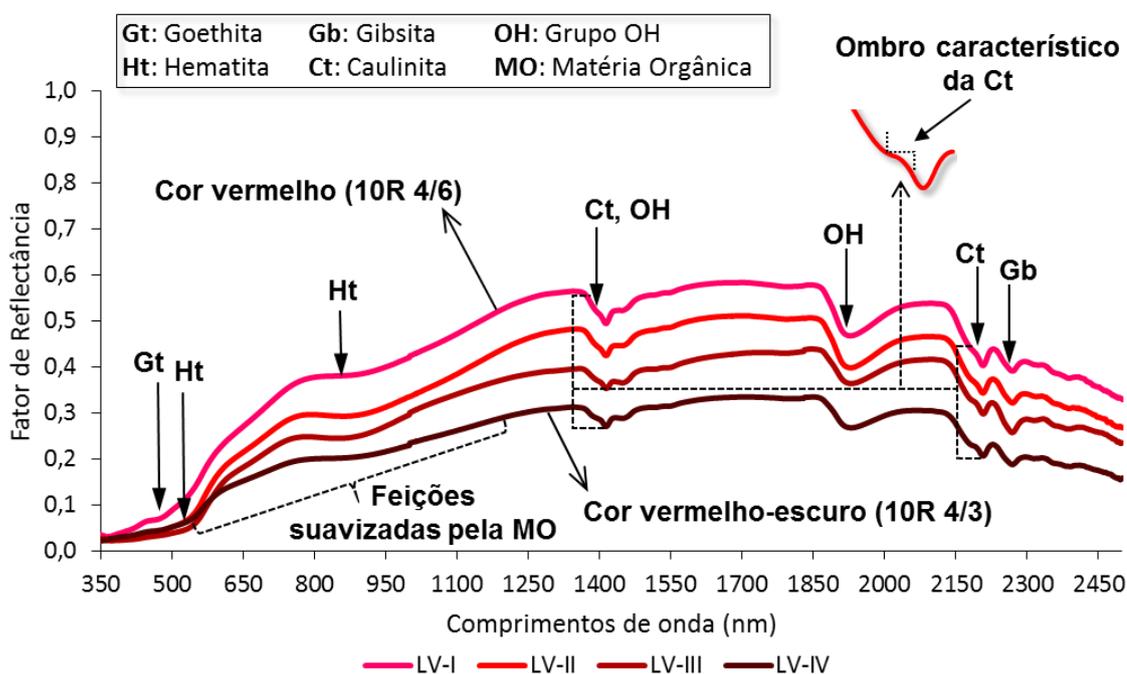


Figura 35. Espectros de Latossolos Vermelhos (LV) estudados da Bacia do Rio Jardim, DF.

De acordo com Reatto et al. (2000), na Bacia do Rio Jardim os Latossolos Vermelho-Amarelos são os solos de maior ocorrência depois dos LV. Na Figura 36 observaram-se as intensidades de fatores de reflectância dos LVA, que variam de 0,40 a 0,50, com espectros de forma aplainada ao longo de toda a faixa VIS-NIR-SWIR. Os valores de fatores de reflectância mais altos (LVA-I) correspondem aos solos com matizes 10YR, o que pode estar relacionado com menor teor de óxidos de ferro e de MO nos solos e na fração argila. Valores de fator de reflectância mais baixos (LVA-II) correspondem aos Latossolo Vermelhos-Amarelos de matizes 5YR, possivelmente pelo maior teor de óxidos de ferro e/ou de MO, suficientes para mascarar as feições dos óxidos de ferro (Dalmolin et al., 2005). Observa-se em ambos espectros que a goethita (480 e 900-950 nm) domina a faixa do VIS e NIR, refletindo na coloração amarelada destes solos (Madeira Netto e Baptista, 2000). A coloração bruna corresponde à ocorrência de MO. Ademais, foi possível verificar a feição em degrau da caulinita (1.400 e 2.200 nm) e feições da gibsitita (2.265 nm) e dos grupos hidroxila

(concauidade na região de 1.400 nm e 1900 nm) (Dalmolin et al., 2005). A presença de óxidos de alumínio (gibsite) no solo indica um alto grau de intemperismo (Buol et al., 2011; Kämpf et al., 2012). Por outra parte, o alto teor de MO no espectro LVA-II causou suavização de feições na faixa espectral de 350 a 1.000 nm e redução geral no fator de reflectância, mascarando o degrau característico nos picos da caulinita (1.400 e 2.200 nm) (Demattê et al., 2000).

Os perfis de LVA apresentaram comportamento espectral semelhante ao LV (Bellinaso et al., 2010). A partir de 800 nm, os espectros de LVA apresentaram concauidade menos acentuada do que nos LV (Figura 35), resultado de maior ocorrência de goethita em relação à hematita (Demattê et al., 2015), que reflete na coloração vermelho amarelada.

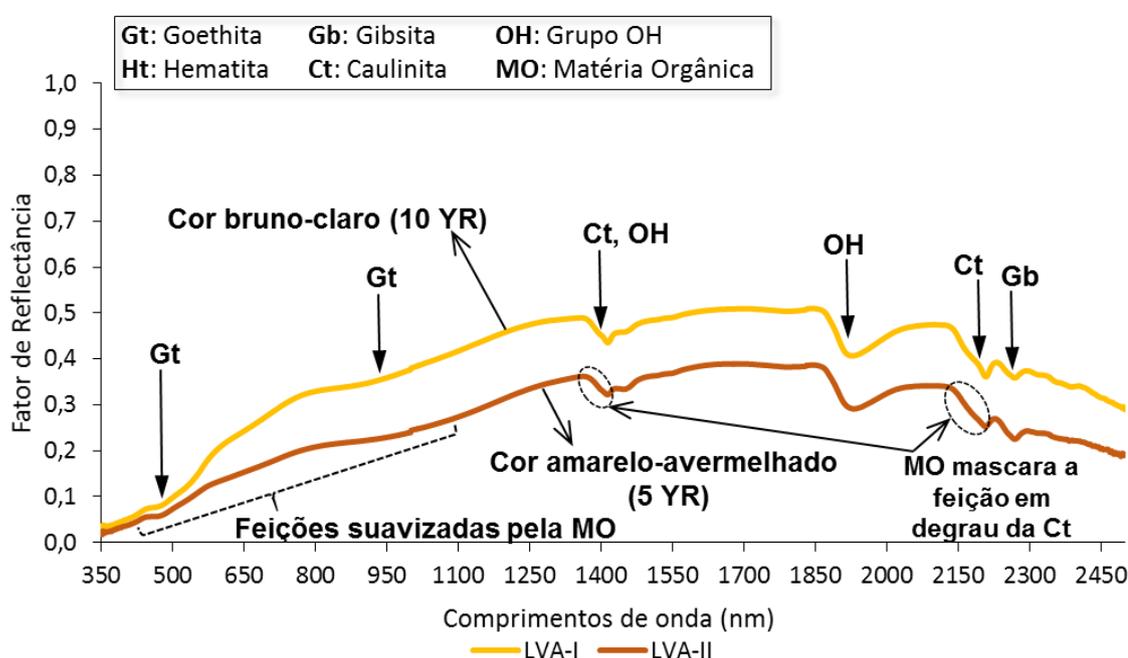


Figura 36. Espectros de Latossolos Vermelho-Amarelos (LVA) estudados na Bacia do Rio Jardim, DF.

Os Neossolos Regolíticos são solos de baixo grau evolutivo, com pequena atuação dos processos pedogenéticos sem modificações expressivas do material originário, com ocorrência de minerais facilmente alteráveis, argilominerais 1:1 e 2:1, assim como também minerais sequioxídicos na fração argila desses solos (Embrapa, 2013).

Estes solos tiveram espectros com fator de reflectância variando entre 0,35 e 0,5, sendo o de maior albedo (RR-I) de textura mais argilossiltosa e o de menor albedo (RR-II) de textura mais argilosa (Figura 37). As duas curvas de reflectância apresentam feições de absorção de óxidos de ferro, com predomínio da goethita (480 e 900 nm) além dos picos da caulinita (2.200 nm) e dos grupos hidroxila (1.400 e 1.900 nm). Foi observada presença das feições de argilominerais 2:1 (1.900 nm) (Grove et al., 1992; Demattê et al., 2014) (Figura 37). Portanto, a diferença na intensidade do fator de reflectância entre os dois Neossolos

Regolíticos, pode ser decorrente de maior teor de minerais intemperizáveis e principalmente quartzo, particularmente na fração areia do RR-I, tal como demonstra os dados da composição granulométrica variável do teor da fração areia nestes solos (Tabela 14) proporcionando maior fator de reflectância (Clemente et al., 2000).

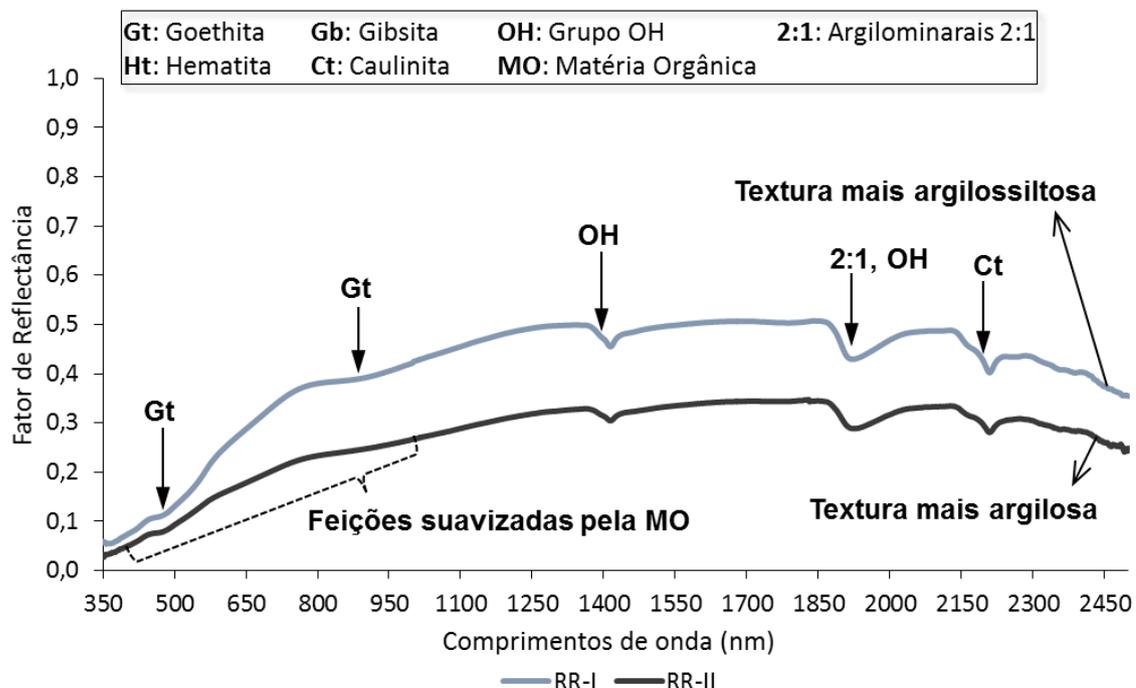


Figura 37. Espectros de Neossolos Regolíticos (RR) estudados da Bacia do Rio Jardim, DF.

Os Cambissolos são geralmente solos rasos, de cores variadas e com elevados teores de silte, indicando baixo grau de evolução (Embrapa, 2013). A mineralogia é predominantemente caulínica, com presença de argilominerais 2:1 e de minerais primários facilmente intemperizáveis, influenciando na estrutura fraca destes solos (Pereira et al., 2010).

Os Cambissolos Háplicos, por apresentarem ocorrência restrita nas litotopossequências representativas da distribuição dos solos na Bacia do Rio Jardim, foi representado espectralmente somente por uma amostra, que mostrava características típicas desta classe de solo. Desta forma, a interpretação do espectro representativo desta classe de solo fica prejudicada.

O Cambissolo Háplico apresentou curva espectral do horizonte A (Figura 38) com valores de factores de reflectância em torno de 0,5, apresentando feições bastante atenuadas, possivelmente pelo efeito da MO e óxidos de ferro. O espectro do CX apresentou feições de goethita (480 nm), de hematita (580 nm), de caulinita (2.200 nm), de argilominerais 2:1 (1.900 nm) e dos grupos hidroxila (1.400 e 1.900 nm), semelhante ao Cambissolo Háplico descrito por Bellinaso et al. (2010). O formato retilíneo do espectro do CX (Figura 38), pode ser decorrente do efeito combinado da matéria orgânica com o alto teor de minerais

intemperizáveis na amostra de solo, resultando numa curva aplainada com feições fracas (Clemente et al., 2000). No entanto, com base na composição mineralógica dos materiais de origem destes solos, constituídos por rochas metassedimentares de origem pelítica, esta composição mineralógica é compatível para solos pouco evoluídos, como o Cambissolo Háplico, onde provavelmente o argilomineral 1:1 é representado pela illita principalmente na fração silte, de acordo com os trabalhos de Campos (2004) e Barbosa et al. (2009). Ocorre um incremento do fator de reflectância do visível ao infravermelho devido a presença de quartzo na fração areia (Demattê, 2002).

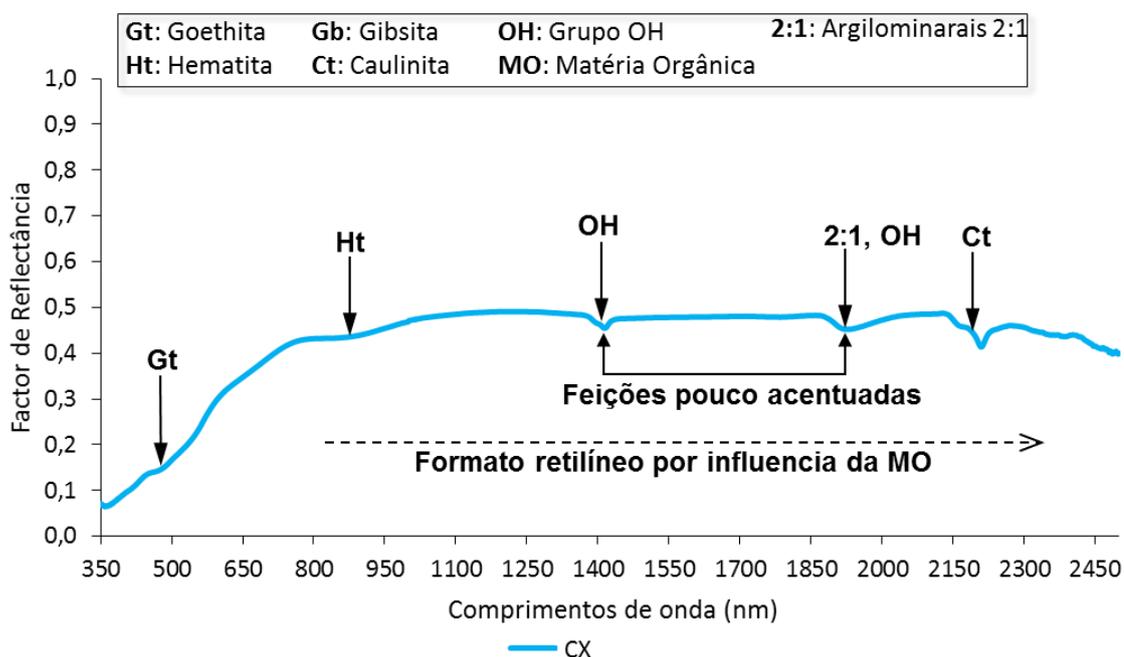


Figura 38. Espectro de Cambissolo Háplico (CX) estudado na Bacia do Rio Jardim, DF.

Os Plintossolos são solos que apresentam segregações de óxidos de ferro (hematita e goethita) na forma de nódulos ou concreções, resultado da expressiva plintitização com ou sem formação de petroplintita (Moreira e Oliveira, 2008; Kämpf e Curi, 2012). Podem apresentar horizonte subsuperficial plíntico, concrecionário ou litoplíntico com grande capacidade de consolidação (Embrapa, 2013).

O Plintossolo Háplico, tal como o Cambissolo, é um solo de pouca ocorrência na bacia estudada, predominando os Plintossolos Pétricos. Por este motivo, foi avaliada somente uma curva espectral considerada representativa dos horizontes A desta classe de solo. A curva espectral apresenta fator de reflectância máxima de 0,5 (Figura 39), evidenciando a influência da matéria orgânica, mascarando as feições de absorção da goethita (480 e 900-950 nm) e da hematita (580 e 850 nm), resultando numa curva de formato côncavo a retilíneo na faixa de 350 a 1.350 nm (Bellinaso et al., 2010; Demattê e Terra, 2014), possivelmente pela influência da ocorrência de quartzo na fração areia. Observa-se feição de absorção em degrau

da caulinita (1.400 e 2.200 nm), feição pouco pronunciada de gibsita (2.265 nm) (efeito da MO) e as feições de absorção do grupo hidroxila em 1.400, 1.900 e 2.200 nm (Figura 39). Este pico acentuado de absorção em 2.200 nm se deve possivelmente às condições de restrição à percolação da água dos FX, sujeitos ao efeito temporário de excesso de umidade (Embrapa, 2013), causando um aumento da absorção da REM nesse comprimento de onda (Dalmolin et al., 2005). Estas características são semelhantes às dos FX descritas por Sato (2015).

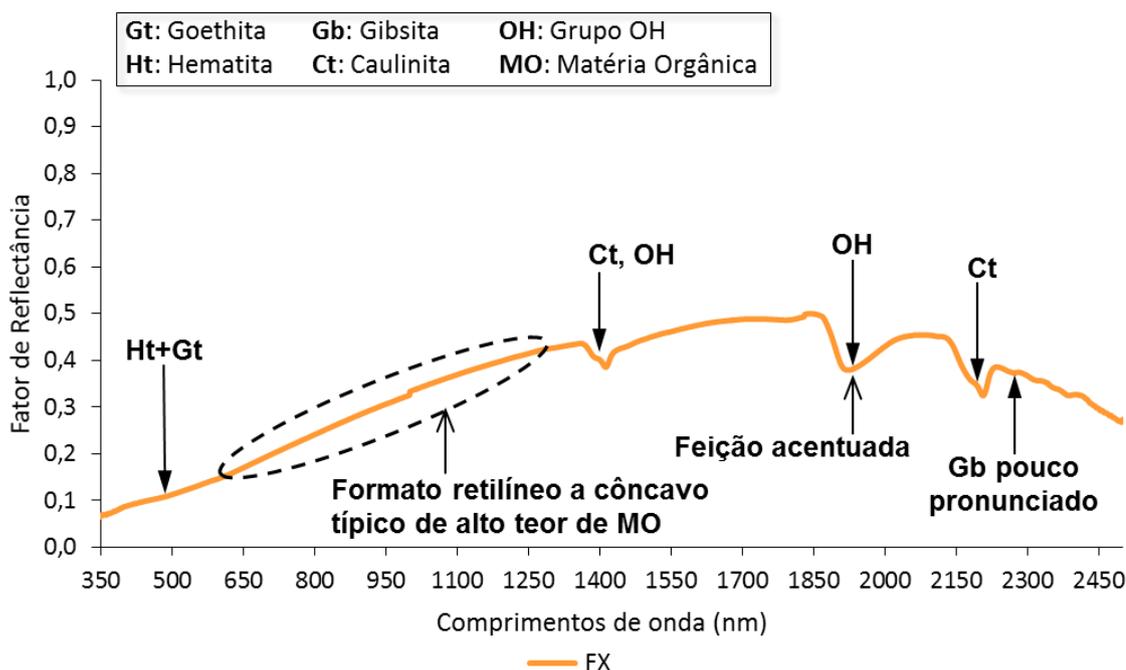


Figura 39. Espectro de Plintossolo Háplico (FX) estudado da Bacia do Rio Jardim, DF.

Já os Plintossolos Pétricos Concrecionários representam uma classe de solo de ocorrência frequente na Bacia do Rio Jardim, ocorrendo em morrotes residuais por toda a Bacia, de maiores extensões a montante da mesma, onde ocorrem litologias do Grupo Paranoá e relictos da Superfície Geomorfológica mais antiga do DF - Chapadas Elevadas (Novaes Pinto, 1994). Esses morrotes marcam a evolução geomorfológica a partir da superfície geomorfológica denominada de Chapadas Elevadas, cujos processos erosivos e pedogenéticos subsequentes originaram uma outra superfície, de altitudes menores que a primeira, ocorrendo em toda a porção leste do DF. Em função da alta resistência ao intemperismo das petroplintitas, os morrotes residuais resistiram à erosão e pedogênese na evolução pedogenética desta superfície. Muitas vezes ocorrem materiais de origem metassedimentares pelíticos do Grupos Canastra e/ou Bambuí ainda preservados sob os Plintossolos Pétricos Concrecionários. Estes morrotes diminuem em suas dimensões em direção a jusante da Bacia do Rio Jardim, desaguardo no Rio Preto, nos limites ocidentais do DF. O padrão de evolução geomorfológica e pedogenética observado é concêntrico a partir

desses morrotes, originado os solos da Bacia do Rio Jardim, controlados pelas litologias dos Grupos Canastra e Bambuí e variações nas feições do relevo.

A ocorrência destes solos é de extrema importância para a evolução geomorfológica e pedológica na Bacia do Rio Jardim. Estes solos apresentam o fator de reflectância variando de 0,2 a 0,5 (Figura 40), possivelmente influenciado pelo efeito da MO. Observaram-se feições predominantes de goethita (480 e 900 nm), concordando com a coloração mais amarelada destes solos (Ribeiro et al., 2012). Apresentam ainda feições de absorção de caulinita (1.400 e 2.200 nm) e de grupos hidroxila (1.400 e 1.900 nm). As feições de goethita (480 e 900 nm) e de gibbsita (2.265 nm), no espectro de maior reflectância (FF-I), apresentam-se mascaradas na curva espectral de menor reflectância (FF-III), decorrente do aumento no teor de MO nesses solos. Além disso, os altos teores de MO nos horizontes superficiais ocasionaram menores albedos e suavização de feições ao longo de toda a faixa espectral de 350 a 2.500 nm (Dalmolin et al., 2005).

As curvas espectrais dos Plintossolos, particularmente os Pétricos Concrecionários são semelhantes às dos Latossolos, principalmente à dos LVA, fato já observado nas suas características morfológicas, físicas e químicas. Ressalta-se, somente, a menor ocorrência de gibbsita e maior efeito da matéria orgânica na suavização das curvas, mascarando a ocorrência dos óxidos de ferro. O maior efeito da MO deve-se a ocorrência de maior umidade ao longo dos perfis estes solos em função do impedimento à percolação de água pelas petroplintitas e formação dos horizontes concrecionários. Como a análise espectroscópica foi realizada na fração TFSA, as petroplintitas foram eliminadas, e a curva espectral representa uma matriz latossólica para estes solos.

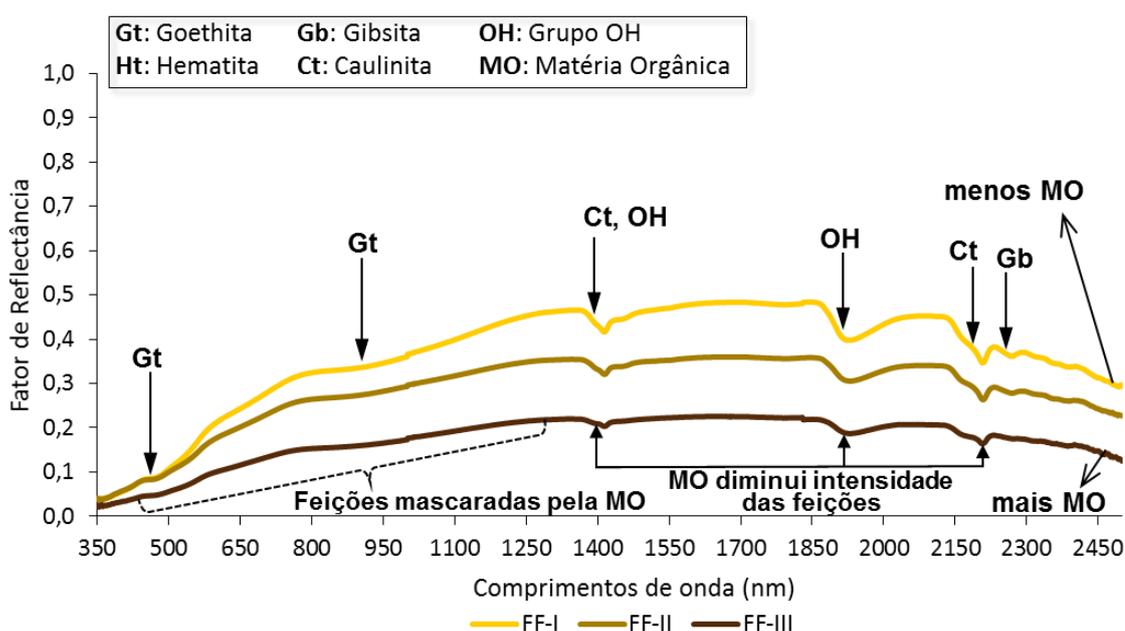


Figura 40. Espectro de Plintossolos Pétricos Concrecionários (FX) estudados da Bacia do Rio Jardim, DF.

Os Gleissolos também são solos de ocorrência esparsa na Bacia do Rio Jardim, uma vez que as drenagens são geralmente encaixadas e as planícies de inundação ocorrem em áreas localizadas. Como constituem solos hidromórficos, marcados pela forte gleização ou redoximorfismo, decorrentes de processos de redução e remoção de compostos de ferro por ação microbiana, em presença de MO, com ou sem alternância de oxidação, por efeito de flutuação de nível do lençol freático, em condições de regime de excesso de umidade permanente ou periódico (Kämpf e Curi, 2012; Embrapa, 2013).

Os Gleissolos Háplicos apresentaram valores máximos de fator de reflectância de 0,45 (Figura 41), com grande influência da MO, representado pela menor reflectância e formato aplainado ascendente na faixa entre 350 e 1.000 nm. Apresentaram feições características de hidromorfismo, com ausência da feição de goethita (480 e 900-950 nm) e hematita (580 e 850 nm) (Epiphany et al., 1992). Verificou-se a provável presença de argilominerais 2:1 (1.900 nm), de caulinita (2.200 nm), dos grupos hidroxila (1.400, 1.900 e 2.200 nm) e de gibsita (2.265 nm), concordando com a descrição de GX realizada por Sato (2015). Estes solos apresentam grande variação na composição granulométrica e mineralógica em função da maior ou menor intensidade dos eventos de alagamento das planícies de inundação.

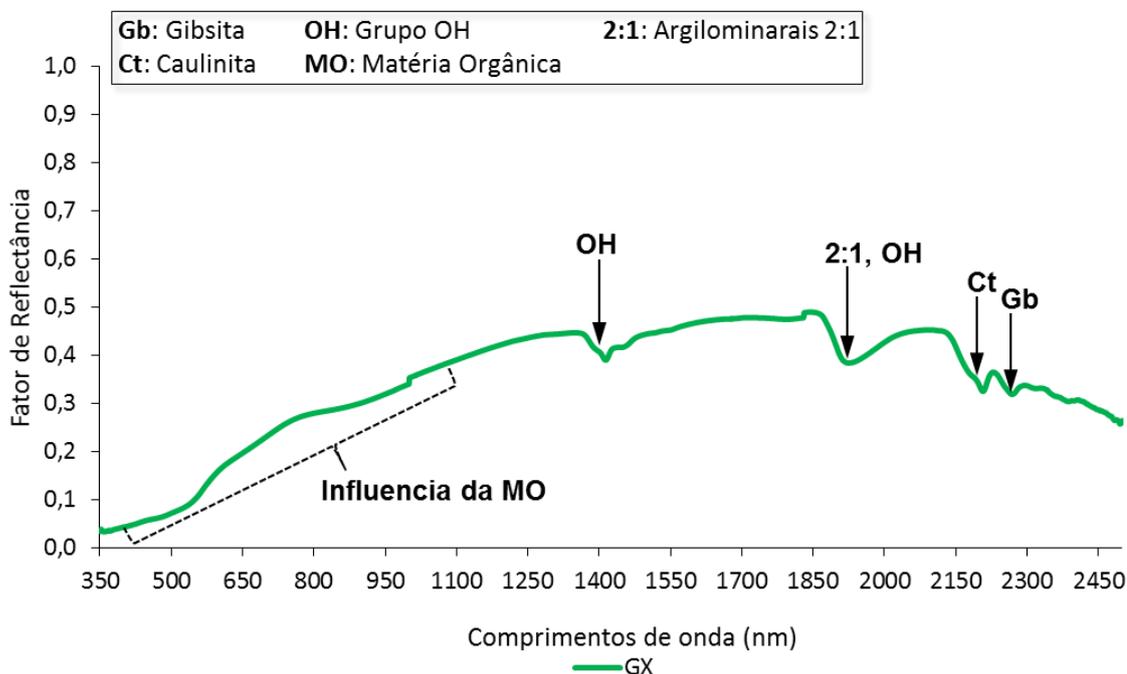


Figura 41. Espectro de Gleissolo Háplico (GX) estudado da Bacia do Rio Jardim, DF.

Os Organossolos, apresentam baixo grau evolutivo, formados pelo acúmulo de material orgânico em graus variáveis de decomposição, que causam uma coloração escura. A lenta decomposição da MO nesta classe de solos está associada a condições de drenagem restrita, saturados com água durante o período chuvoso (Embrapa, 2013).

O espectro do Organossolo Háplico estudado apresentou valores baixos de fator de reflectância na faixa entre 350 e 1.350 nm (Figura 42), em função de altos teores de MO que abaixam a reflectância nesse intervalo de comprimento de onda, produzindo formato retilíneo a côncavo, de acordo com Demattê e Terra (2014). Na faixa espectral de 350 a 760 nm, o espectro do OX apresentou valores de fator de reflectância variando desde próximo de 0 a cerca de 0,17, o qual é detectado pelos olhos humanos com cores escuras, decorrente da elevada absorção (baixa reflectância) da REM nessa faixa do espectro (Epiphanyo et al., 1992). Observam-se feições de argilominerais 2:1 (1.900 nm) bastante acentuada, de caulinita (2.200 nm) e de grupo hidroxila (1.400, 1.900 e 2.200 nm). A feição de gibsita (2.265 nm) apresentou-se pouco pronunciada, sem constatação da presença de feições de óxidos de ferro na região de 350 a 1.200 nm (Figura 42).

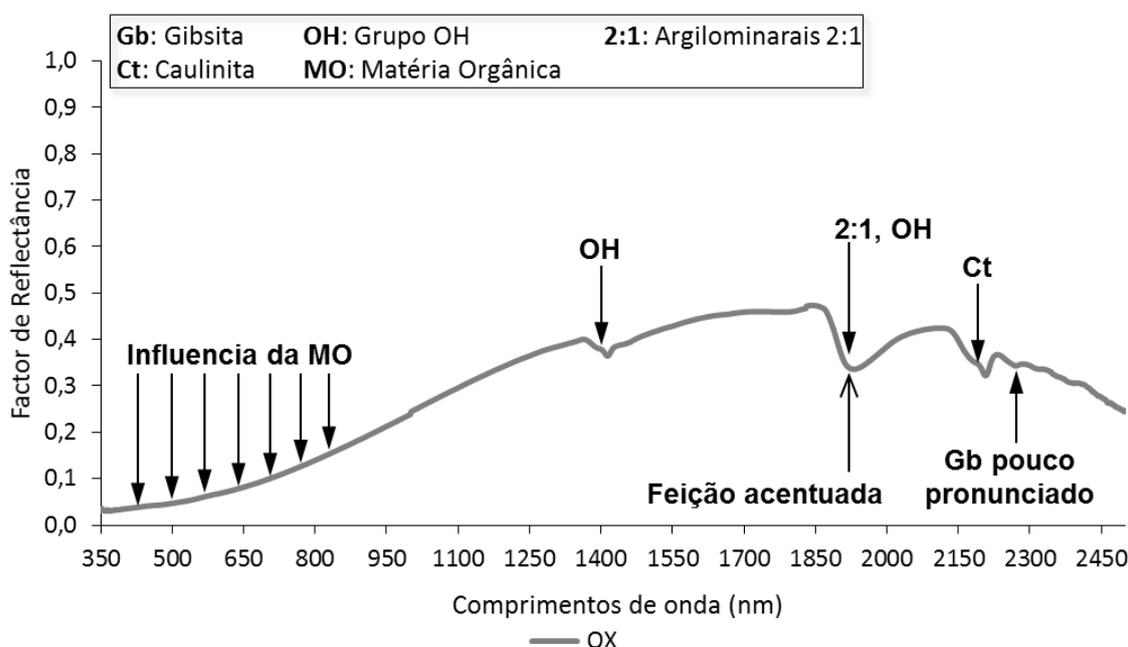


Figura 42. Espectro de Organossolo Háplico (OX) estudado na Bacia

VII.3.4. Biblioteca espectral dos solos da Bacia do Rio Jardim

A montagem da biblioteca espectral de solos da Bacia do Rio Jardim foi realizada com os espectros obtidos na etapa anterior, sendo a maioria destes obtidos partir dos agrupamentos das classes de solos. Esta biblioteca espectral contém 13 espectros (Figura 43), considerados representativos da variabilidade e distribuição dos solos da bacia estudada. Como explicado na metodologia, os perfis de GX e OX não foram incluídos na biblioteca espectral de solos.

Para comparar dados espectrorradiométricos com dados orbitais foram simuladas as bandas do sensor L5-TM, de acordo com Demattê e Nanni (2003) e Nanni e Demattê (2006a, b). Desta forma, as curvas espectrais obtidas dos solos estudados por meio de

espectrorradiômetro laboratorial *FieldSpec® Pro* (Figura 43) e por meio da reamostragem destes dados nos intervalos das bandas do sensor L5-TM (Figura 44) mostraram o mesmo padrão de reflectância, sem a riqueza de detalhamento que o sensor *FieldSpec® Pro* fornece, uma vez que gera 2.150 bandas espectrais, enquanto que uma imagem L5-TM apresenta 6 bandas espectrais, originando uma enorme diferença na resolução espectral.

Em função disso, os espectros que foram reamostrados para as bandas espectrais do L5-TM, apresentaram menor grau de detalhamento espectral (Demattê, 2002) (Figura 44).

No entanto, o padrão geral dos espectros de solos obtidos nos intervalos espectrais do espectrorradiômetro *FieldSpec® Pro* e do sensor L5-TM, foi o mesmo. Observa-se que o espectro de menor fator de reflectância foi o FF-III, e que o de maior fator de reflectância foi representado pelo LV-I e pelo CX. Ademais, percebe-se que as três bandas do visível (TM1, TM2 e TM3) estão associadas às baixas reflectâncias (ou elevadas absorções) de óxidos de ferro (goethita e hematita) e material orgânico, concordando com Galvão e Vitorello (1998). Já as outras três bandas do infravermelho – 760 a 2.350 nm (TM4, TM5 e TM7) mostraram aumento na intensidade reflectância (menor absorção) dos constituintes do solo (Demattê e Terra, 2014). O comportamento do padrão espectral dos perfis de solos da biblioteca espectral obtida neste trabalho (Figura 44) esta de acordo com Demattê e Toledo et al. (2004).

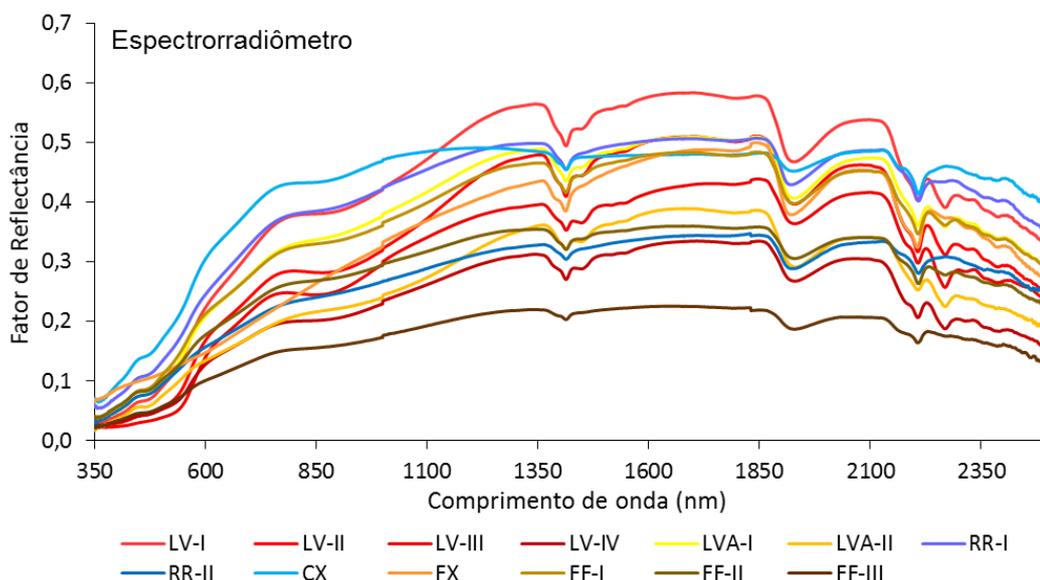


Figura 43. Biblioteca espectral dos solos estudados, obtida por meio do sensor laboratorial *FieldSpec® Pro*, na faixa de 350 a 2.500 nm.

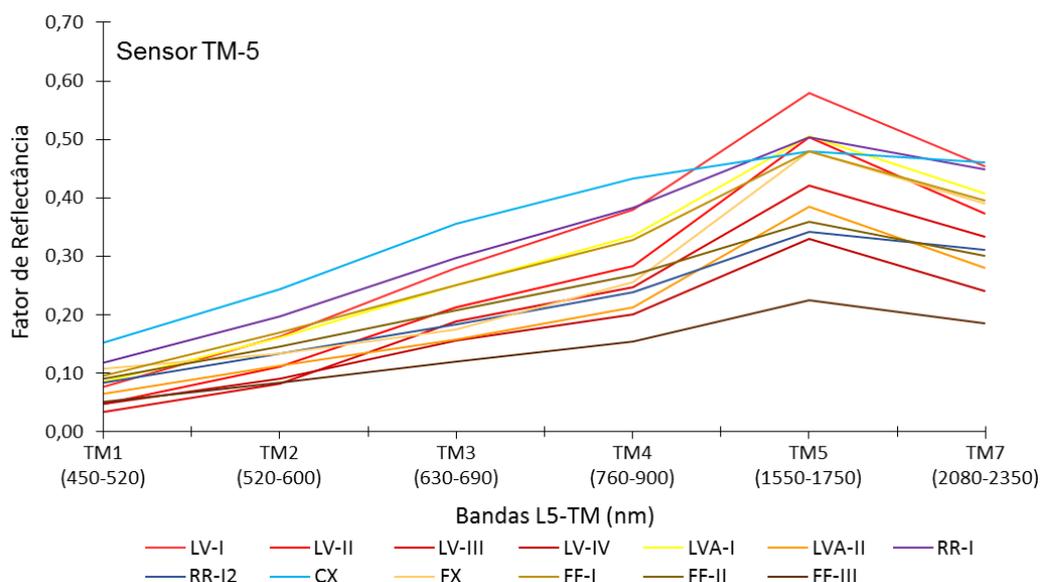


Figura 44. Biblioteca espectral dos solos estudados, reamostrada nos intervalos espectrais das bandas do L5-TM (nm), na faixa de 450 a 2.350 nm.

VII.3.5. Mapa digital de solos da Bacia do Rio Jardim

VII.3.5.1. Modelo de Análise de Mistura Espectral (SMA)

Na aplicação do SMA, foram utilizadas a IC de solos expostos e a biblioteca espectral de solos da Bacia do Rio Jardim nos intervalos espectrais das bandas do L5-TM. Foram considerados quatro espectros médios de reflectância para Latossolo Vermelho (LV-I, LV-II, LV-III e LV-IV) de textura argilosa a muito argilosa e coloração variando entre 10R4/6 a 10R4/4, dois espectros para Latossolo Vermelho-Amarelo (LVA-I e LVA-II) de textura argilosa a muito argilosa e coloração variando de 10YR3/4 a 5YR4/4, dois espectros para Neossolo Regolítico (RR-I e RR-II) de textura argilosa a argilo siltosa e coloração variando entre 5YR5/5 e 7,5YR5/6, três espectros para Plintossolo Pétrico (FF-I, FF-II e FF-III) de textura argilosa a muito argilosa e coloração variando de 10YR4/6 a 7,5YR4/4, um espectro para Cambissolo Háplico (CX) de textura argilosa e coloração 7,5YR4/6 e um espectro para Plintossolo Háplico (FX) de textura argilosa e coloração 2,5Y3/2. Estes espectros médios foram considerados como *endmembers* destas classes de solo. As imagens fração foram geradas utilizando quatro combinações de *endmembers* extraídos da biblioteca espectral de solos elaborada, não ultrapassando de cinco *endmembers* por modelo gerado, obedecendo os preceitos desta metodologia, de acordo com Schweik e Green (1999).

Para os Latossolos Vermelhos, foram obtidas quatro imagens fração pelo programa ENVI (Figura 45-a, 45-b, 45-c e 45-d) que correspondem ao LV-I, LV-II, LV-III e LV-IV, respectivamente, e uma imagem erro do modelo SMA (Figura 45-e). Estas quatro imagens fração foram somadas no ArcGIS e obtida uma única imagem com o mapeamento do LV distribuído pela Bacia do Rio Jardim. Os pixels desta imagem foram categorizados, gerando-

se um mapa com os pixels que continham as maiores proporções de LV (Figura 45-f), ou seja, mapa de distribuição de Latossolo Vermelho na Bacia do Rio Jardim. Observa-se nas imagens fração que as maiores contribuições ao mapeamento do LV pelo modelo SMA foram as imagens de LV-I e LV-II (Figura 45-a e 45-b), ou seja, para LV argilosos de colorações vermelhas mais claras do que LV-III e LV-IV. A imagem erro apresentou grande quantidade de valores de erro (Figura 45-e).

No entanto, o mapa de LV gerado pelo modelo SMA (Figura 45-f), a partir da soma das quatro imagens fração, mostrou ocorrência abundante desta classe de solos, distribuídos por toda a área da Bacia do Rio Jardim, concordando com o estudo realizado por Reatto et al. (2000).

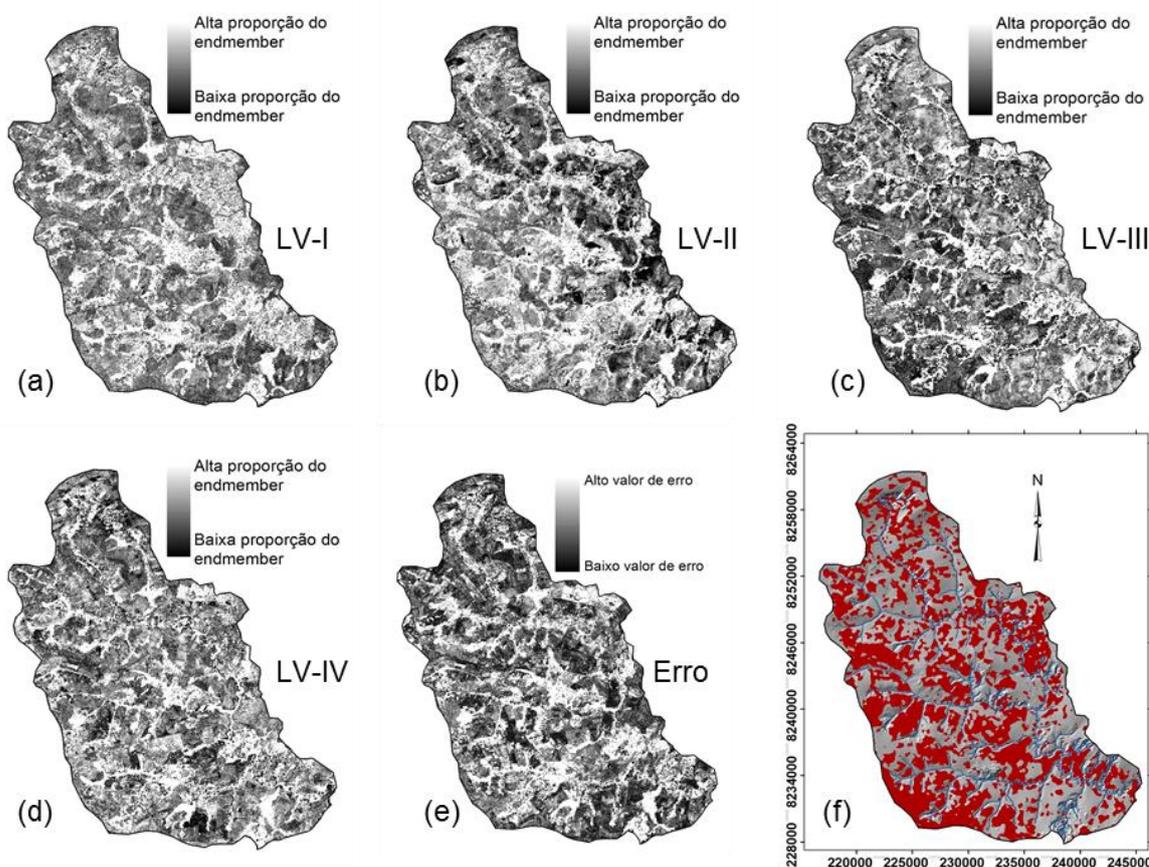


Figura 45. Imagens obtidas mediante o modelo SMA para o LV. Imagens fração (a, b, c e d), correspondentes aos agrupamentos LV-I, II, III e IV, respectivamente, imagem erro do modelo (e) e mapa de proporção de LV na Bacia do Rio Jardim gerado a partir união das imagens fração (f).

Para o LVA foram obtidas duas imagens fração no programa ENVI (Figura 46-a e 46-b) correspondente ao agrupamento dos espectros em LVA-I e LVA-II e uma imagem erro do modelo SMA (Figura 46-c). Estas duas imagens de distribuição do LVA foram somadas no ArcGIS obtendo-se uma única imagem com as contribuições do LVA na bacia estudada. Os pixels desta imagem foram classificados, elaborando-se o mapa de distribuição de Latossolo

Vermelho-Amarelo na Bacia do Rio Jardim (Figura 46-d). Nota-se nas imagens de distribuição dos LVA-I e II, que a maior proporção de LVA foi constatada na imagem de LVA-II (Figura 46-b) com relação a imagem de LVA-I (Figura 46-a). A imagem erro apresentou proporção equivalente de valores altos e baixos de erro (Figura 46-c). No mapa de LVA gerado a partir da soma das duas imagens fração verificou-se moderada a alta ocorrência destes solos na Bacia do Rio Jardim, também ocorrendo por toda a bacia, concordando com o estudo realizado por Reatto et al. (2000).

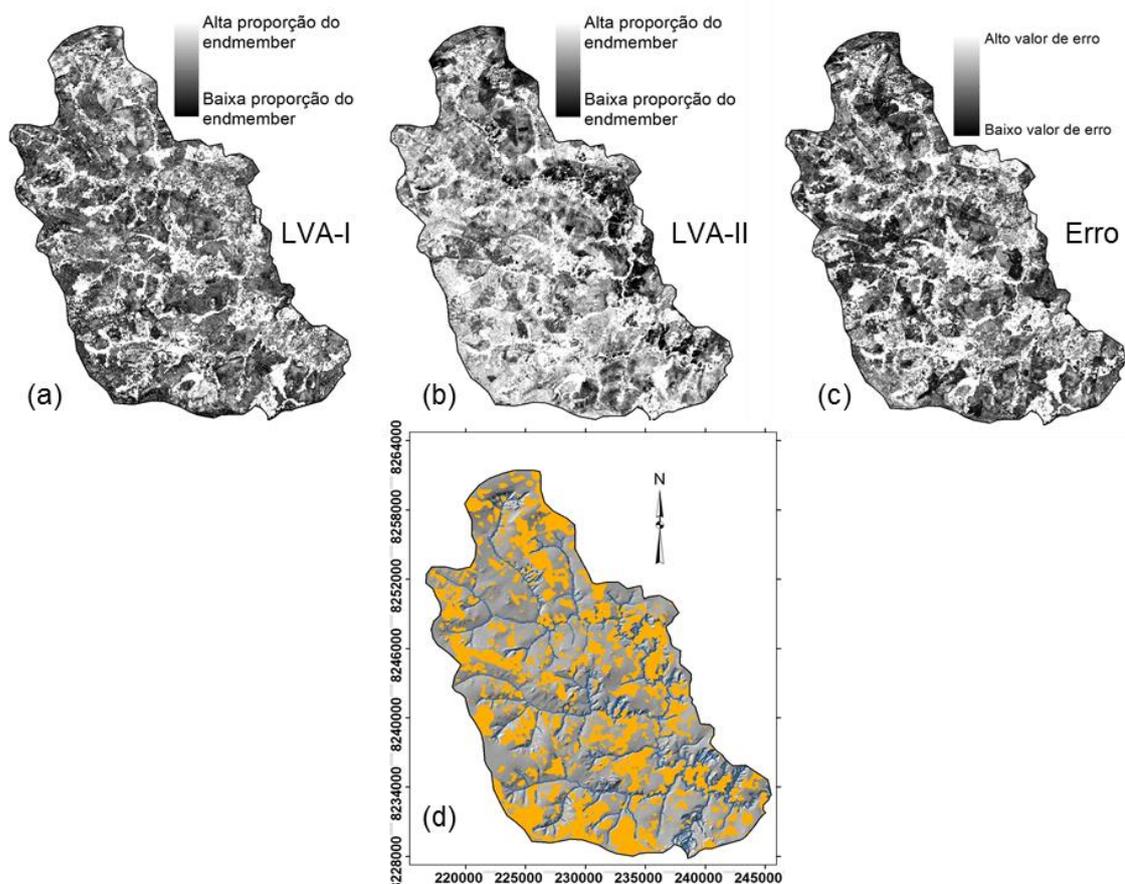


Figura 46. Imagens obtidas mediante o modelo SMA para LVA. Imagens fração (a e b), correspondentes aos agrupamentos LVA-I e LVA-II, respectivamente, imagem erro do modelo (c) e mapa de proporção de LVA na Bacia do Rio Jardim gerado a partir da união das imagens fração (d).

No caso do Cambissolo Háplico (CX) que não constituiu agrupamento e os Neossolos Regolíticos, que foram agrupados em RR-I e RR-II, foi utilizada a metodologia SMA, com os *endmembers* destas três classes de solos. Foi realizado desta forma, visto que para aplicar a metodologia SMA são necessários pelo menos dois *endmembers*, e não teria como utilizar a mesma de maneira individualizada para estas classes de solos (Schweik e Green, 1999; Exelis VIS, 2015e). Assim, o mapeamento dos CX, RR-I e RR-II foi realizado no mesmo modelo SMA, utilizando o programa ENVI. Foram obtidas três imagens fração, uma para o CX (Figura 47-a) e duas para RR-I e RR-II (Figura 47-b e 47-c) e uma imagem erro do modelo

(Figura 47-d). As duas imagens fração de RR foram somadas no ArcGis e obtida uma única imagem com as distribuições de RR (RR-I + RR-II) na Bacia do Rio Jardim. Os pixels desta imagem e da imagem de CX foram categorizados, gerando-se um mapa com os pixels representando a melhor distribuição de CX e RR (RR-I + RR-II) (Figura 47-e e 47-f). A imagem fração de CX apresentou baixa quantidade destes solos, sendo que, nas imagens dos RRs, a imagem do agrupamento RR-I (Figura 47-b) foi a que apresentou maior distribuição desta classe de solo. A imagem erro apresentou altos valores de erro nas áreas com maior exposição de RR-I e RR-II, e baixos valores nas áreas mapeadas de CX (Figura 47-d).

O mapa gerado de CX apresentou ocorrências esparsas desta classe de solo, e o mapa elaborado dos RRs a partir da soma das duas imagens fração mostrou moderada ocorrência destes solos na Bacia do Rio Jardim. Vale ressaltar que a quantidade considerável constatada de Neossolos Regolíticos, assim como a baixa ocorrência de Cambissolos verificadas neste trabalho, discorda com os mapeamentos pedológicos do DF disponíveis (Embrapa, 1978; Reatto et al., 2000).

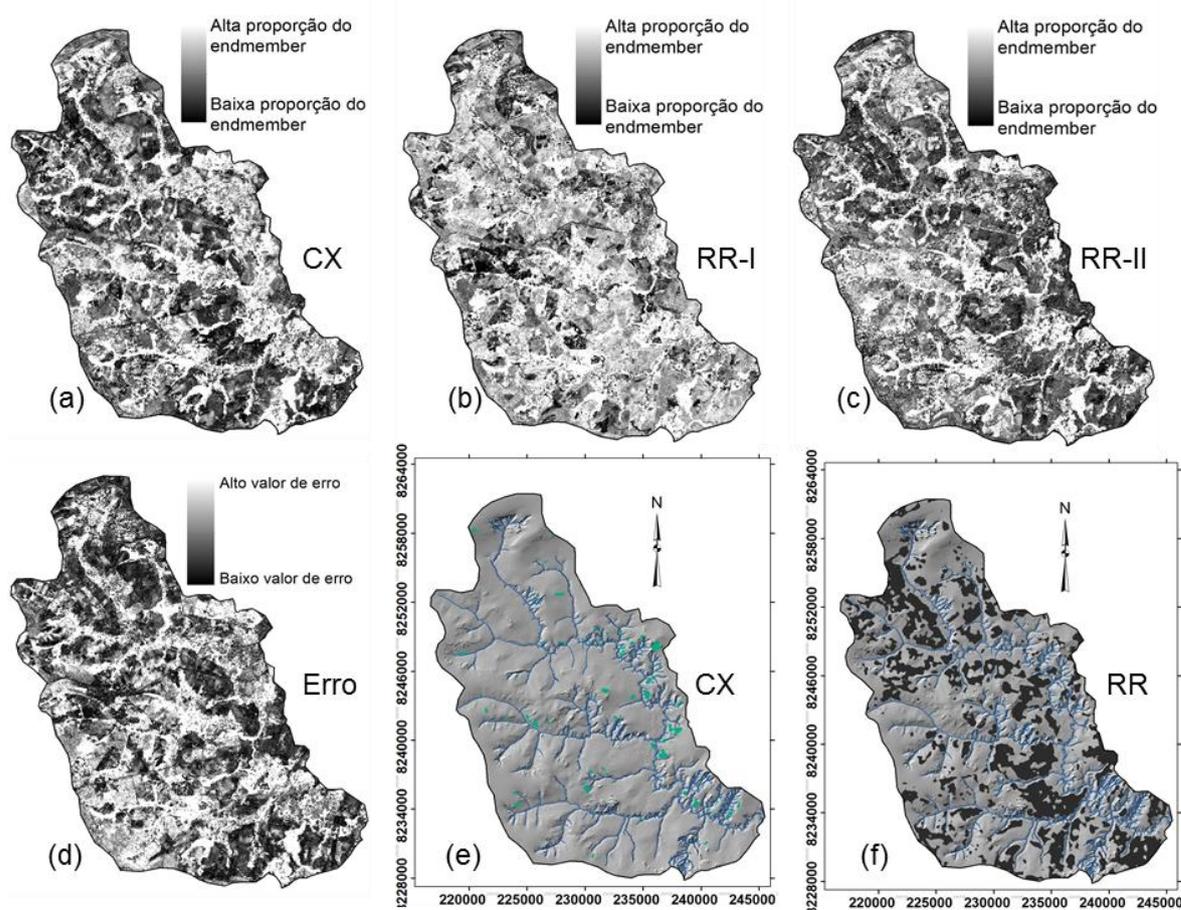


Figura 47. Imagens obtidas mediante o modelo SMA para CX e RR. Imagens fração (a, b e c) correspondentes ao CX, RR-I e RR-II, respectivamente, imagem erro do modelo (d) e mapas de proporção de CX (e) e RR (f) gerado a partir da soma das respectivas imagens fração (b e c).

Pelo mesmo motivo da utilização do modelo SMA para CX e RR-I e RR-II conjuntamente, o FX e os FF-I, FF-II e FF-III também foram mapeados pelo mesmo modelo SMA. O processamento gerou quatro imagens fração, um para FX (Figura 48-a) e três para FF-I, FF-II e FF-III (Figura 48-b, 48-c e 48-d), respectivamente, e uma imagem erro do modelo (Figura 48-e).

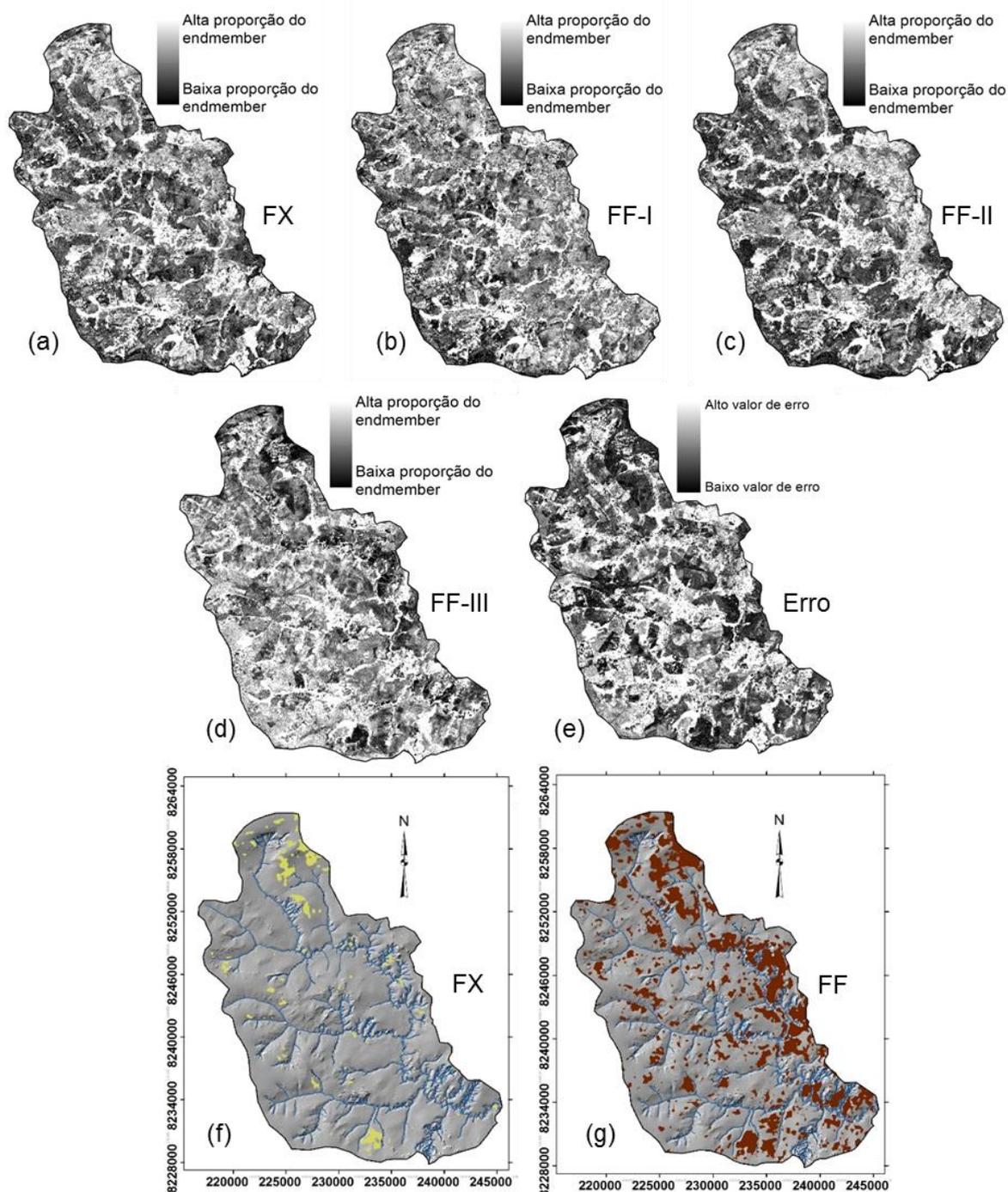


Figura 48. Imagens obtidas mediante o modelo SMA para FX e FF. Imagens fração (a, b, c e d) correspondentes ao CX, FF-I, FF-II e FF-III, respectivamente, imagem erro do modelo (e) e mapas de proporção de FX (f) e FF (g) gerado a partir da soma das respectivas imagens fração (b, c e d).

As três imagens fração de FF foram somadas no ArcGIS obtendo-se uma única imagem com a distribuição dos FFs na bacia estudada. Os pixels desta imagem e da imagem de FX foram classificados, gerando-se um mapa com os pixels que continham as maiores quantidades de FX e FF (Figuras 48-f e 48-g). A imagem fração de FX apresentou baixa proporção desta classe de solos, enquanto que nas imagens de FF, a maior distribuição foi verificada na imagem de FF-I (Figura 48-b) e a menor para FF-III (Figura 48-d). A imagem erro apresentou altos valores de erro nas áreas com maior proporção de FX e FF (Figura 48-f e 48-g). O mapa gerado de FX apresentou poucas áreas com esta classe de solos, com manchas localizadas, e o mapa de FF gerado a partir da soma das três imagens de FF-I, FF-II e FF-III, demonstraram ocorrência mediana destes solos na Bacia do Rio Jardim. Esta verificação da ocorrência comum dos Plintossolos Pétricos, também não havia sido contemplada nos mapeamentos pedológicos disponíveis do DF (Embrapa, 1978; Reatto et al., 2000).

Para avaliar o desempenho dos mapas de classes individualizadas de solos da Bacia do Rio Jardim, gerados pelo modelo SMA, foram estabelecidos pontos de validação que variaram em função da distribuição da classe de solo mapeada (Figura 49).

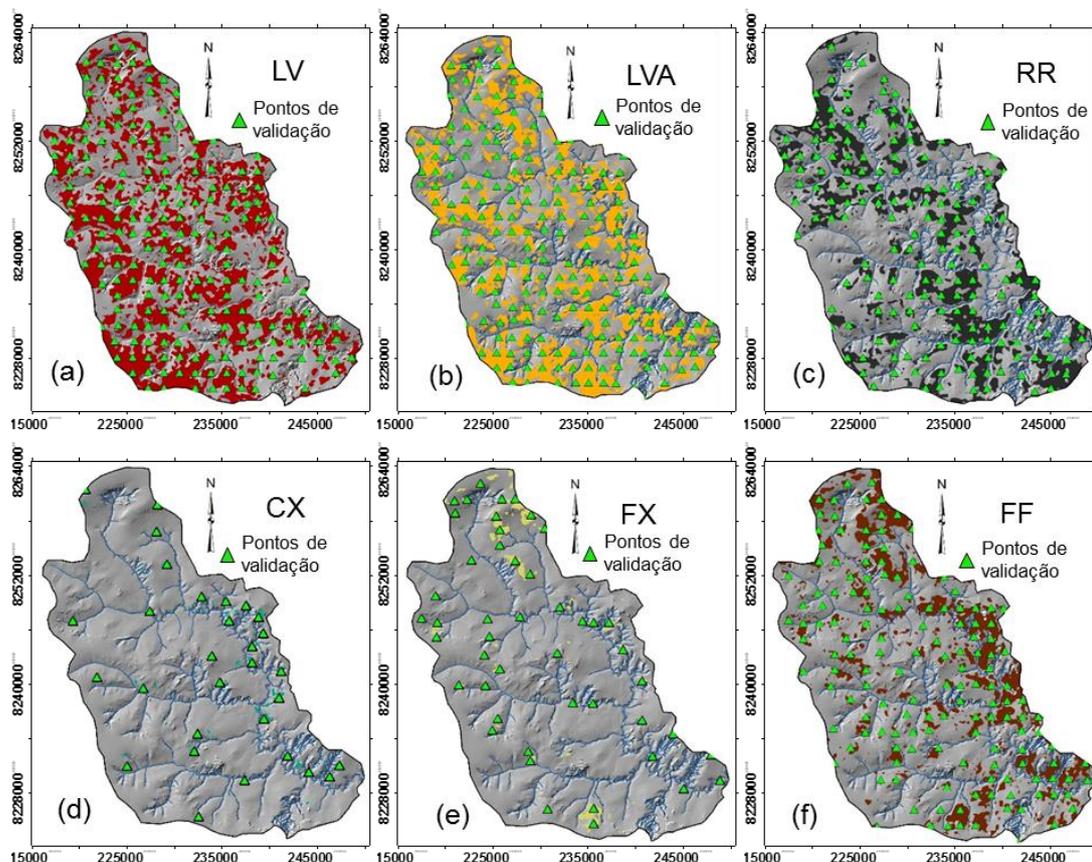


Figura 49. Mapas de classes de solos da Bacia do Rio Jardim gerados pelo modelo SMA, com a localização dos seus respectivos pontos de validação. Latossolos Vermelho (a), Latossolo Vermelho-Amarelo (b), Neossolo Regolítico (c), Cambissolo Hápico (d), Plintossolo Hápico (e) e Plintossolo Pétrico Concrecionário (f).

Foram computados os erros e acertos utilizando a matriz de dados de validação elaborada, correspondentes a verdade terrestre (Tabela 20), para cada mapa de classe de solo (LV, LVA, RR, CX, FX e FF), sendo que cada mapa foi avaliado separadamente.

Cabe ressaltar que a matriz elaborada de dados de validação ou de verdade de campo, contemplou as principais classes de solo de ocorrência na Bacia do Rio Jardim e foi utilizada para avaliar o desempenho dos mapeamentos individualizados pelo SMA das classes de solo, correspondendo a seis mapas; assim, a matriz foi utilizada seis vezes, gerando um número elevado de pontos de validação da verdade terrestre.

Observa-se na Tabela 20, que os maiores acertos para os mapas gerados foram para as classes de FX, CX e LVA com valores de 71, 45 e 40% respectivamente, refletindo uma probabilidade intermediária dessas classes de solos terem sido corretamente mapeadas pelo modelo SMA (Lillesand et al., 2007; Congalton e Green, 2010).

Tabela 20. Tabela com quantificação de acertos e erros entre a verdade de campo e os mapas digitais de distribuição de cada classe de solo gerado pela metodologia SMA, da Bacia do Rio Jardim, DF.

Classe de Solo	Mapas gerados pelo modelo SMA						Pontos validados	Acerto %
	LV	LVA	FX	FF	CX	RR		
Mapa de Latossolo Vermelho – LV								
LV	104	81	14	70	4	113	386	27
Mapa de Latossolo Vermelho-Amarelo – LVA								
LVA	55	88	9	28	2	39	221	40
Mapa de Plintossolo Háplico – FX								
FX	2	2	12	1	0	0	17	71
Mapa de Plintossolo Pétrico Concrecionário – FFc								
FF	22	17	3	26	3	9	80	33
Mapa de Cambissolo Háplico – CX								
CX	6	8	1	7	19	1	42	45
Mapa de Neossolo Regolítico – RR								
RR	16	18	8	18	2	6	68	9

Por meio dos dados apresentados na Tabela 20, também foram calculadas a proporção de confusão para cada classe de solo mapeada de ocorrência na Bacia do Rio Jardim em relação aos pontos de validação (Tabela 21).

O mapeamento do LV apresentou a segunda pior performance do modelo SMA, com somente 27% de acerto em relação aos pontos de validação (Tabela 20). As maiores confusões foram com os modelos para as classes FF, LVA e RR, com valores de 18, 21 e 29% de erros no mapeamento, respectivamente (Tabela 21).

Já para o LVA, o mapeamento foi discretamente melhor em relação ao do LV, mostrando 40% de acerto com a verdade terrestre (Tabela 20). As maiores confusões dos pontos da verdade terrestre com os mapas de LV e RR, com valores de 25% para o LV e 18% para o RR (Tabela 21).

O mapeamento de FF apresentou validade semelhante a do LVA, com 33% de acerto, sendo as maiores confusões dos pontos utilizados para validação com os mapeamentos das classes LV e LVA, com 28 e 21% de confusão com estas classes de solo, respectivamente.

O RR apresentou o pior mapeamento pelo modelo SMA, com somente 9% de acertos com os pontos de validação. O modelo confundiu com classes de solo de validação ou verdade terrestre com praticamente todos os mapeamentos das demais classes de solo, especialmente LV, LVA e FF com 24% de confusão para o mapa do LV e 26% de confusão nos mapas de LVA e FF.

Estes altos valores de confusão refletem a enorme quantidade de amostras incluídas erroneamente nos mapas de LV, LVA, FF e RR gerados pelo modelo SMA (Lillesand et al., 2007; Congalton e Green, 2010).

Já os mapas de FX e CX, apresentaram bom desempenho com 71 e 45 % de acerto dos pontos terrestres, sendo que estes mapas mostraram erros menores no mapeamento das demais classes de solo.

Tabela 21. Tabela de proporção de confusão entre os mapeamentos digitais de classe individualizada de solo obtidos pela metodologia SMA da Bacia do Rio Jardim, DF.

Classe de Solo	Mapas gerados pelo modelo SMA						
	LV	LVA	FX	FF	CX	RR	
Verdade terrestre	Mapa de Latossolo Vermelho – LV						
	LV	27%	21%	4%	18%	1%	29%
	Mapa de Latossolo Vermelho-Amarelo – LVA						
	LVA	25%	40%	4%	13%	1%	18%
	Mapa de Plintossolo Háplico – FX						
	FX	12%	12%	71%	6%	0%	0%
	Mapa de Plintossolo Pétrico Concrecionário – FFc						
FF	28%	21%	4%	33%	4%	11%	
Mapa de Cambissolo Háplico – CX							
CX	14%	19%	2%	17%	45%	2%	
Mapa de Neossolo Regolítico – RR							
RR	24%	26%	12%	26%	3%	9%	

Desta forma, como o modelo SMA considera todos os pixels como mistura de um único conjunto inicial de *endmembers*, os pixels da IC de solos expostos pertencentes às classes de solos que não foram representadas pelos conjuntos de *endmembers* no modelo, deixaram de ser modelados ou foram modelados com altos valores de erro, causando baixos valores

de desempenho do mapeamento (Tabela 20) e altos valores de confusão entre as classes de solos (Tabela 21), concordando com Schweik e Green (1999).

Assim, de modo geral, o SMA apresentou elevados valores de erro no mapeamento digital realizado de solos. Como a Bacia do Rio Jardim apresenta ocorrência de classes de solos variadas (Embrapa, 1978; Reatto et al., 2000), com áreas de transição entre classes de solos, dificultou a capacidade do SMA em distinguir um maior número de pixels na imagem, para as classes de solos ou todos os *endmembers* representativos destas classes, em razão do modelo utilizar um conjunto “fixo” de *endmembers* para cada pixel (Carvalho et al., 2003). Tais resultados concordam com Linn (2008), que avaliou o potencial de uso do modelo SMA na discriminação de classes de cobertura da Planície Costeira do Rio Grande do Sul.

A metodologia SMA é amplamente utilizada em diversos trabalhos realizados por vários autores na discriminação da cobertura do solo (Shimabukuro e Smith, 1995; Moreira et al., 1998; Ferreira, 2003; Vasconcelos e Novo, 2004; Sano et al., 2008; Ponzoni et al., 2012) e no monitoramento dos recursos naturais (Shimabukuro et al., 1998, 2005; Verona et al., 2001; Novo et al., 2005; Demattê et al., 2009; Hirye et al., 2015). Trabalhos realizados com objetivos de discriminação e mapeamento de classes de solos utilizando o método SMA é escasso, a não ser que quando o número de classes de solos não ultrapasse quatro ou cinco para mapeamento digital em imagens Landsat. Rashed et al. (2001) utilizaram o modelo SMA para realizar o mapeamento da cobertura urbana em uma imagem do sensor IRS-1C (Indian Remote Sensing) da região do Cairo (Egito), empregando quatro *endmembers* (vegetação, superfície impermeável, solo e sombra) e posterior classificação por meio de árvores de decisão, obtendo um índice Kappa de 88%.

VII.3.5.2. Modelo de Análise de Mistura Espectral com Múltiplos Endmembers (MESMA)

Como alternativa para superar as limitações do modelo SMA no mapeamento espectral de solos da Bacia do Rio Jardim, foi utilizado o modelo MESMA (*Multiple Endmember Spectral Mixture Analysis*), que considera múltiplos *endmembers* na análise de mistura espectral e estabelece para cada pixel o melhor modelo de mistura, e assim, realiza o cálculo de abundância dos *endmembers* (Roberts et al., 1998).

Na aplicação do MESMA, foram utilizadas a IC de solos expostos obtida e a biblioteca espectral de solos da Bacia do Rio Jardim nos intervalos espectrais das bandas do sensor L5-TM. Assim, o melhor modelo de mistura espectral com seus valores de abundância foi determinado pela combinação linear dos 13 *endmembers*, pré-estabelecidos para representar as classes de solo de ocorrência na bacia estudada (Roberts et al., 2007).

No modelo MESMA, os *endmembers* foram automaticamente selecionados em função do menor erro médio quadrático para cada pixel, em relação à curva espectral do pixel da IC (Carvalho, et al., 2003). Gerou-se como produto, uma imagem fração dos *endmembers*

desmisturados na IC (Figura 50-a), uma imagem erro do modelo MESMA gerado (Figura 50-b) e uma imagem dos modelos de mistura (indicando o *endmember* de maior abundância em cada pixel determinado com o menor erro médio quadrático) (Figura 50-c). Na imagem que contém os modelos de mistura, as cores, atribuída pelo próprio algoritmo MESMA no aplicativo VIPER *tools*, representam o *endmember* de maior abundância, que representa uma classe de solo e sua distribuição na bacia estudada (Roberts et al., 2007). Posteriormente, a imagem de modelos de mistura, que representa o mapa de distribuição de classes de solos da Bacia do Rio Jardim, foi suavizada por meio de filtragem (Meneses e Santa Rosa, 2012), diminuindo os ruídos e destacando áreas mais homogêneas representativas das classes de solo (Figura 50-d).

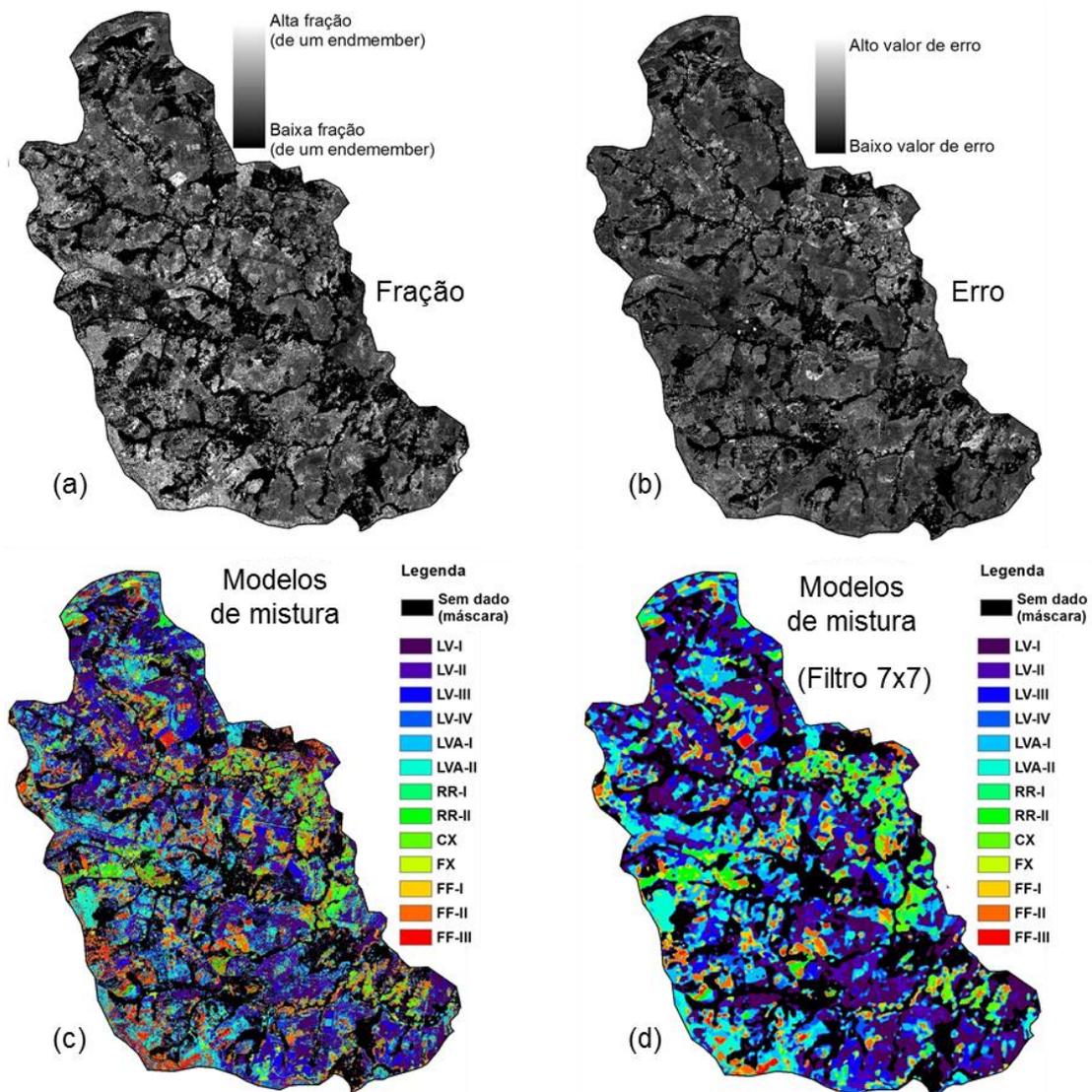


Figura 50. Imagens obtidas mediante aplicação do modelo MESMA a partir da IC de solos expostos e dos *endmembers* representativos das classes de solo de ocorrência na bacia, extraídos da biblioteca espectral de solos da Bacia do Rio Jardim, DF. Imagem fração (a), imagem erro do modelo (b), imagem de modelos de mistura (c) e imagem suavizada com filtro de mediana de tamanho 7x7 (d).

A Figura 50-a mostra o intervalo de fração produzido pelo MESMA para as seis classes de solos representadas neste estudo por 13 *endmembers*. Verificou-se, na imagem fração, que a maior parte dos pixels da IC de solos expostos foram modelados pelo MESMA com abundância de *endmembers* superiores a 40%. Desta forma, obtiveram-se pixels modelados com frações que variaram entre 40 e 80% na classe LV, de 50 a 100% na classe LVA, de 50 a 70% na classe RR, de 40 a 60% na classe CX, de 40 a 70% na classe FX e maior que 85% na classe FF (Roberts et al., 1998). Estas elevadas porções de *endmembers*, com a qual os pixels foram modelados pelo modelo MESMA na imagem fração (tons de cinza mais claros) (Figura 51-a), refletem na imagem erro (Figura 5b-b) diminuindo o brilho (tons de cinza mais escuros) e, conseqüentemente, menores valores de erro médio quadrático (Roberts et al., 1998). O erro médio quadrático do modelo MESMA neste trabalho foi em torno de 0,84% para a área da bacia estudada, considerado baixo de acordo com Roberts et al. (1998), que estabelece um valor máximo de erro médio quadrático de até 2,5%.

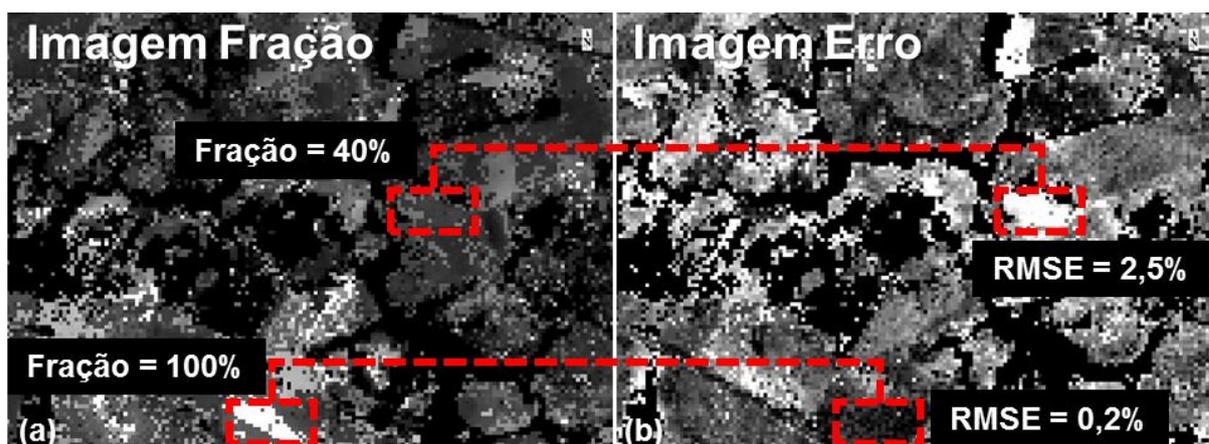


Figura 51. Valores de fração (a) e do erro médio quadrático (b) obtidos pela metodologia MESMA.

As porções mais destacadas da imagem fração (tonalidades de cinza mais claras, com maior brilho) correspondem às áreas de menor confusão entre os *endmembers*, ou seja, com maior probabilidade de acerto de uma classe de solo específica (Figura 50-a), sendo a classe de solo FF-III a que apresentou menor mistura espectral (Roberts et al., 1998) (Figura 52).

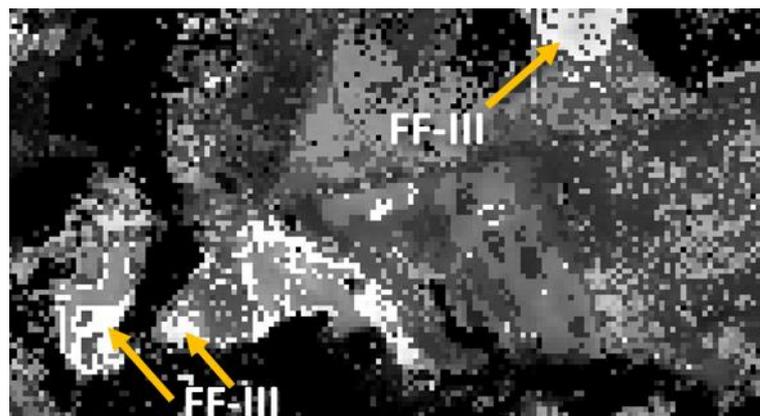


Figura 52. Imagem fração obtida mediante o modelo MESMA, indicando pixels da classe FF-III modelados com os maiores valores fração.

A imagem erro (Figura 50-a) indicou que os maiores valores de erros foram produzidos pelo modelo MESMA ao modelar pixels de CX e FF-II (Figura 53), possivelmente, devido à perda do detalhamento espectral das bandas de absorção características destas classes de solo no processo de reamostragem para intervalos das bandas espectrais do sensor L5-TM (Demattê, 2002).

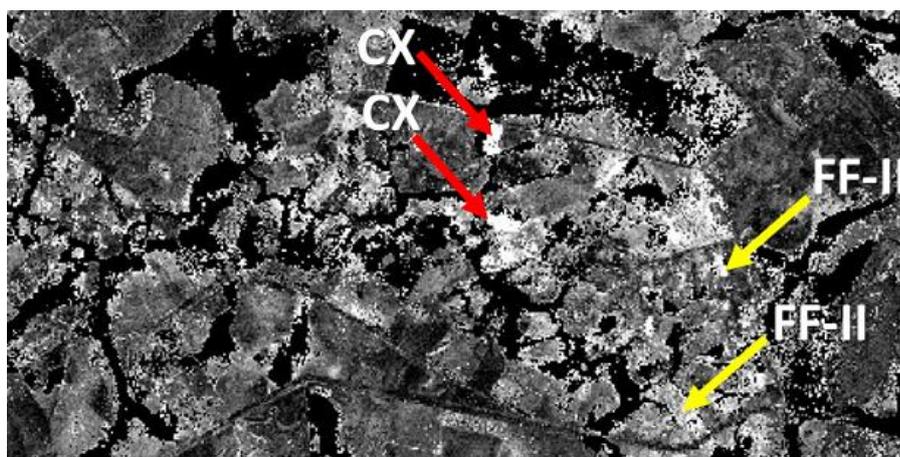


Figura 53. Imagem fração obtida mediante o modelo MESMA, indicando pixels das classes CX e FF-II modelados com os maiores valores de erro.

Desta forma, a individualização das classes de solos por meio do modelo MESMA constituiu o mapa digital espectral de solos da Bacia do Rio Jardim, DF (Figura 52), mostrando a distribuição das seis classes de solos estudadas, representadas por 13 unidades de mapeamento simples. Este mapa de solos foi obtido a partir da imagem de modelos de mistura suavizada (Figura 50-d). As áreas vazias no mapa correspondem a vegetação, água e palhada retiradas por máscaras no processo de obtenção das imagens de solo exposto (Fongaro, 2015; Gallo, 2015).

No mapa digital espectral gerado de solos da Bacia do Rio Jardim (Figura 54), as classes de solos foram classificadas até o 2º nível categórico do Sistema Brasileiro de Classificação de Solos (Embrapa, 2013).

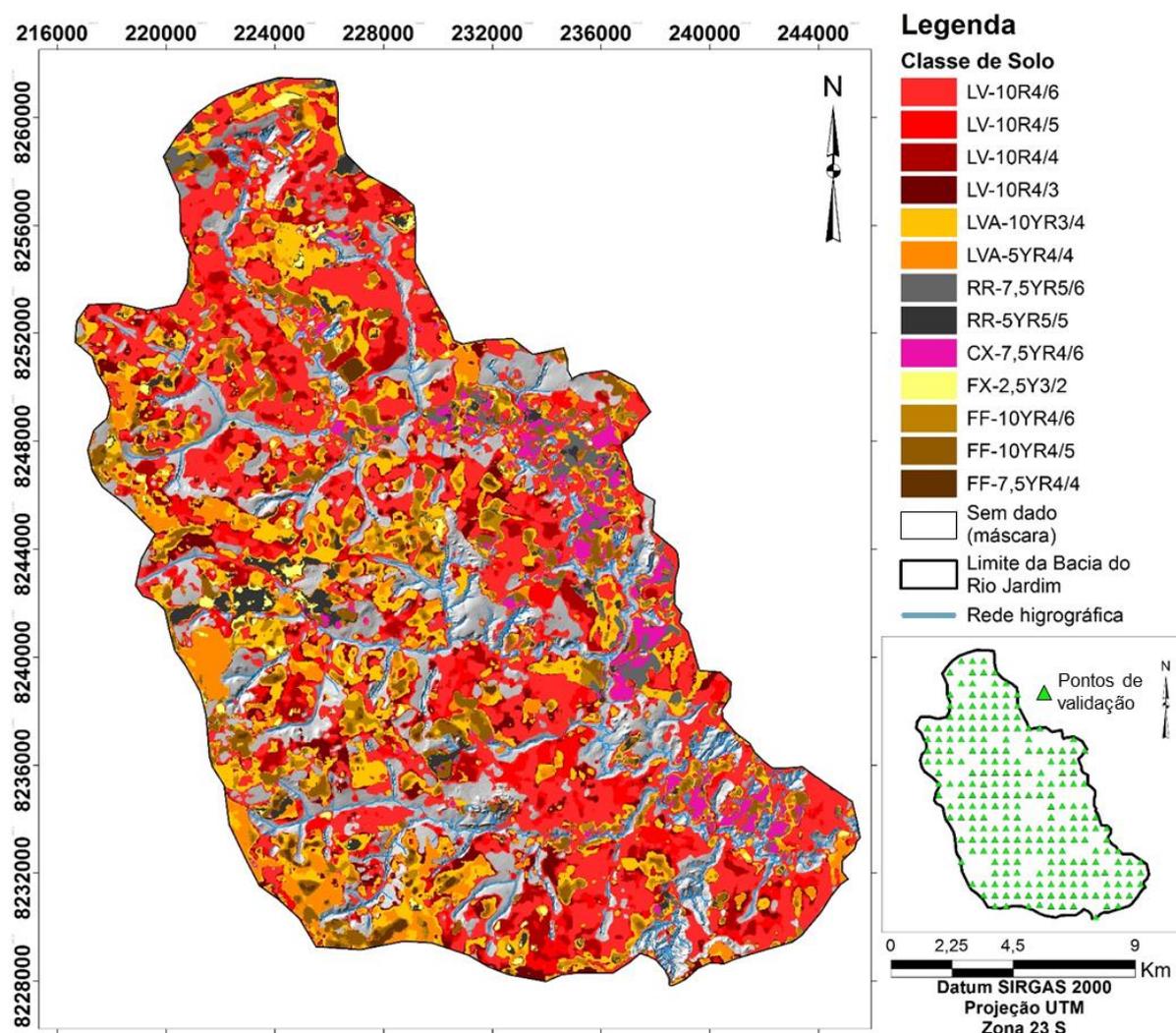


Figura 54. Mapa digital espectral de solos da Bacia do Rio Jardim, DF, obtido pelo modelo MESMA.

Assim, para melhor interpretação do mapeamento digital realizado, as unidades de mapeamento com 13 *endmembers* utilizados foram nomeadas em função do principal atributo responsável pelos agrupamentos de uma classe de solo. Sendo assim, temos as seguintes classes de solos:

- LV-I → LV-10R4/6
- LV-II → LV-10R4/5
- LV-III → LV-10R4/4
- LV-IV → LV-10R4/3
- LVA-I → LVA-10YR3/4
- LVA-II → LVA-5YR4/4

- RR-I → RR-7,5YR5/6
- RR-II → RR-5YR5/5
- CX → CX-7,5YR4/6
- FX → FX-2,5Y3/2
- FF-I → FF-10YR4/6
- FF-II → FF-10YR4/5
- FF-III → FF-7,5YR4/4

O mapa gerado apresenta a individualização das classes de solos de ocorrência na Bacia do Rio Jardim, cujas respectivas áreas foram calculadas e dispostas na tabela 22.

Tabela 22. Área de classes de solos que compõem o mapa digital da Bacia do Rio Jardim-DF obtido.

Unidade de mapeamento	Área		Total por Classe	Total mapeado	Total ⁽²⁾
	ha	% ⁽¹⁾			
LV-10R4/6	13.701	33,27%	22.467	41.182	53.614
LV-10R4/5	3.480	8,45%			
LV-10R4/4	2.555	6,20%			
LV-10R4/3	2.732	6,63%			
LVA-10YR3/4	7.274	17,66%	10.411		
LVA-5YR4/4	3.137	7,62%			
RR-7,5YR5/6	1.131	2,75%	2.228		
RR-5YR5/5	1.098	2,67%			
CX-7,5YR4/6	1.178	2,86%	1.178		
FX-2,5Y3/2	508	1,23%	508		
FF-10YR4/6	2.092	5,08%	4.390		
FF-10YR4/5	1.977	4,80%			
FF-7,5YR4/4	321	0,78%			
Sem Dado (máscara)	12.431	100%	12.431	12.431	

⁽¹⁾ Porcentagem calculada em função da área total mapeada de solos, ⁽²⁾ Valor correspondente ao total da área da Bacia do Rio Jardim, DF.

Observa-se que, na área de estudo, há um predomínio de Latossolos Vermelhos, com um total de 22.467 ha, seguido por Latossolos Vermelhos-Amarelos, contabilizando uma área de 10.411 ha. Estas áreas obtidas de LV e LVA estão de acordo com o levantamento semidetalhado dos solos da Bacia do Rio Jardim, DF, realizado por Reatto et al. (2000) por metodologia convencional, na escala 1:50.000, que determinou uma área de ocorrência de 21.139 ha e 10.277 ha de LV e LVA, respectivamente. Os LV ocupam as áreas geomorfológicas mais elevadas, de relevo geralmente plano a suave ondulado, sobre as rochas de origem pelítica do Grupo Paranoá, concordando com os trabalhos de Motta et al. (2002), Barbosa et al. (2009), Campos et al. (2010) e Lacerda e Barbosa (2012). Já os LVA se desenvolvem em declividades discretamente maiores (2–5%) em relação aos LV, correspondendo à unidade geomorfológica Planos Intermediários (SEMARH, 2012).

Além destas classes de solos, foram mapeadas neste trabalho 4.390 ha de Plintossolos Pétricos, 2.228 ha de Neossolos Regolíticos, 1.178 ha de Cambissolos Háplicos e 508 ha de Plintossolos Háplicos.

No mapa digital gerado, observa-se que a ocorrência de FF e RR é muito frequente, fato que não tinha sido demonstrado nos mapeamentos anteriores, tais como no Levantamento de Reconhecimento dos Solos do DF realizado por Embrapa (1978) e o Levantamento Semidetalhado dos Solos da Bacia do Rio Jardim (DF) realizado por Reatto et al. (2000), assim como a ocorrência pouco expressiva de CX. Nos mapeamentos anteriores, estas classes de solo se confundem, geralmente associadas ao acréscimo da declividade do terreno, que deve ter sido um critério dos levantamentos e mapeamentos pedológicos anteriores.

Percebe-se que os FF apresentam distribuição em morrotes ao longo da bacia, fato que também não tinha sido descrito nos trabalhos anteriores (Embrapa, 1978; Reatto et al. 2000). Outra característica muito importante, refere-se à forma de ocorrência e distribuição destes solos, sendo os morrotes mais abundantes e de maiores dimensões a montante e ao longo dos divisores da bacia, diminuindo em quantidade e dimensões a jusante da mesma, evidenciando acréscimo da atuação de processos erosivos e pedogenéticos em direção à bacia do Rio Preto. Esta distribuição expressa a evolução geomorfológica da área a partir da superfície geomorfológica de Chapadas Elevadas, preservadas a montante da Bacia do Rio Jardim (Novaes Pinto, MARIA, 1994; Barbosa et al., 2009; Lacerda e Barbosa, 2012). Este padrão de distribuição permite interpretar os morrotes de Plintossolos Pétricos como residuais dos solos da Superfície Geomorfológica Chapadas Elevadas (Novaes Pinto, 1994; Lacerda e Barbosa, 2012).

O mapeamento mostra claramente os morrotes com ocorrência de FF rodeados por FX ou LVA geralmente concrecionários que gradam para LVA plíntico, LVA e LV demonstrando o processo pedogenético evolutivo das classes de solo da bacia, acompanhando a evolução geomorfológica (Motta et al., 2002).

Os Neossolos Regolíticos apresentam uma distribuição peculiar em função do encaixamento das drenagens que constituem a Bacia do Rio Jardim, uma vez que a declividade do terreno se acentua nas encostas das drenagens, onde se formam os RR (Motta et al., 2002).

Os Cambissolos ocorrem dispersamente pela Bacia do Rio Jardim, geralmente associados aos RR, pela mesma condição pedogenética destes (Motta et al., 2002). Esses solos distribuem-se ainda em condições atípicas na bacia, associados ou desenvolvendo-se sob os morrotes de FF, em áreas planas, por vezes associados aos materiais de origem meta-pelíticos do Grupo Canastra e/ou Bambuí (Freitas-Silva e Campos, 1998a), ainda preservados, demonstrando o alto grau de resistência ao intemperismo dos Plintossolos Pétricos (Motta et

al., 2002). Esta condição impediu a evolução da pedogênese dos materiais litológicos ou se mostram discretamente pedogenizados, localizados sob os Plintossolos Pétricos relictuais (Lacerda e Barbosa, 2012).

Desta forma, a área total de solos mapeada foi de 41.182 ha, a qual representa o 76% da área total da Bacia do Rio Jardim (Tabela 22).

O MESMA é uma metodologia que tem sido pouco aplicada no mapeamento digital de solos. Alguns destes trabalhos, como o realizado por Palacios-Orueta et al. (1998), aplicaram o modelo MESMA em imagens do sensor AVIRIS de uma área de estudo localizadas na Califórnia (EUA), determinando que o algoritmo MESMA foi capaz de discriminar os conteúdos matéria orgânica de solos com um alto grau de precisão. Do mesmo modo, Genú et al. (2013) realizaram o mapeamento dos atributos do solo em Rafard (SP) por meio da análise da mistura espectral, determinando que o modelo MESMA demonstrou ser um método eficaz para o mapeamento de atributos do solo relacionados a textura, matéria orgânica, ferro total e CTC. Ademais, observou que o modelo MESMA mostrou um nível elevado de semelhança quando comparado com o método Kriging, pelo que concluíram que a metodologia MESMA pode ser utilizada como uma ferramenta robusta no mapeamento digital de solos.

Uma matriz de erros entre a verdade de campo e o mapa digital de solos gerado foi criada para avaliar os 231 pontos de validação (Tabela 23). Por meio desta matriz de erros foi calculado o índice Kappa do mapeamento, obtendo-se um valor estimado de 0,73 ou 73%, onde tal desempenho da classificação foi considerado muito boa segundo a classificação proposta por Landis e Koch (1977). Assim, de acordo com Ten Caten et al. (2012), o valor Kappa obtido neste trabalho é superior aos valores reportados na literatura internacional como em Hengl e Rossiter (2003), de 0,58 em locais montanhosos e de 0,39 para áreas planas, e por Scull et al. (2003), que observaram valores de 0,44 e 0,52 em áreas montanhosas e planas, respectivamente.

Tabela 23. Matriz de erros entre a verdade de campo e o mapa digital de solos da Bacia do Rio Jardim, DF, obtido pela metodologia MESMA.

Classe de solo	Mapa Digital de Solos						Total	AU %	EO %	EC %	
	LV	LVA	FX	FF	CX	RR					
Verdade terrestre	LV	114	3	1	2	0	0	120	95	5	13
	LVA	5	44	0	8	0	2	59	75	25	8
	FX	1	0	2	0	0	0	3	67	33	33
	FF	4	0	0	19	0	1	24	79	21	44
	CX	1	0	0	1	4	0	6	67	33	0
	RR	6	1	0	4	0	8	19	42	58	27
Total	131	48	3	34	4	11	231				
AP%	87	92	67	56	100	73		191			

Kappa = 73%

AU: Acurácia do Usuário, AP: Acurácia do Produtor, EO: Erro de Omissão, EC: Erro de Comissão.

Por meio da matriz de erros (Tabela 23) também foram calculadas a acurácia do produtor e a acurácia do usuário para as classes de solos estudadas. Assim, verificou-se que as classes de solos CX, LVA e LV apresentaram os maiores resultados de AP, com valores de 100%, 92% e 87%, respectivamente, refletindo a elevada probabilidade dessas classes de solos terem sido corretamente classificadas de acordo com os pontos de referência (Lillesand et al., 2007; Congalton e Green, 2010).

Com relação a acurácia do usuário, todas as classes mapeadas apresentaram elevados valores de AU, a exemplo das unidades de mapeamento LV e FF que apresentaram AU de 95 e 79% respectivamente, indicando a probabilidade em 95 e 79% dessas classes de solos representarem a classe de solo no campo (Lillesand et al., 2007; Congalton e Green, 2010). Apenas a unidade de mapeamento RR apresentou valor de AU baixo, 42%, possivelmente, devido à perda do detalhamento espectral das bandas de absorção características destas classes de solo no processo de reamostragem para intervalos das bandas espectrais do sensor L5-TM (Demattê, 2002).

Os erros de omissão e de comissão foram calculados a partir da matriz de erros elaborada (Tabela 23). Deste modo, constatou-se que a maioria das classes de solos apresentaram valores baixos de EO, variando de 5 a 33%, mostrando baixa porcentagem de amostras de solos que não foram incluídas nas correspondentes classes de solos (Congalton e Mead, 1986). Somente a classe RR apresentou maiores valores de EO, 58%, ocasionado pela confusão em 32%(6) com LV e em 21% (4) com FF. Observou-se que, as classes de solos CX e LVA obtiveram os menores valores de EC, com valores de 0 e 8%, refletindo a baixa quantidade de amostras incluídas erroneamente nestas duas classes de solos (Congalton e Mead, 1986). Embora as classes CX e FF (FF-III) tenham apresentado uma certa quantidade de pixels com altos valores na imagem erro do modelo MESMA, estes ainda permaneceram inferiores ao valor limite de 2,5% de erro médio quadrático, de acordo com Roberts et al. (1998).

Os altos valores de acurácia do mapa digital de solos obtido, são decorrentes da metodologia MESMA ser capaz de identificar o melhor modelo de mistura para cada pixel na imagem com o menor valor de erro (Carvalho et al., 2003).

De acordo com Ten Caten et al. (2012) o valor médio do índice Kappa entre os estudos realizados no Brasil é de 0,48 ou 48%. Desta forma, vários estudos de mapeamentos digitais de solos obtiveram valores distintos de índice Kappa aplicando as demais técnicas de mapeamento digital de solos: Figueiredo et al. (2008) obtiveram Kappa de 38% utilizando regressões logísticas múltiplas no Planalto Médio do Rio Grande do Sul. Sano et al. (2007) utilizou imagens do satélite Landsat ETM+ para mapeamento visual da cobertura vegetal do Bioma Cerrado, obtendo valores Kappa de 68,31%. Crivelenti et al. (2009) observaram kappa de 43% utilizando árvores de decisão no mapeamento digital de solos da folha topográfica de

Dois Córregos (SP). Chagas et al. (2010) empregou redes neurais artificiais em uma bacia hidrográfica no noroeste do estado do Rio de Janeiro, determinando valores do índice Kappa de 74%. Caten et al. (2011) empregaram a Análise de Componentes Principais (ACP) na regressão logística múltipla multinomial (RLMM) para mapeamento de classes de solos na microrregião de Santa Maria (RS), observaram valores de índice Kappa de 37,3% e 48,5%. Valladares (2012) aplicou geoestatística no mapeamento digital de solos dos tabuleiros costeiros no litoral norte do estado do Ceará, obtendo índice Kappa de 41%. Arruda et al. (2013) observou valores de índice Kappa de 74,5%, utilizando redes neurais artificiais em uma área localizada no município de Barra Bonita (SP).

O mapa digital de solos gerado se mostrou bem representativo da distribuição das classes de solos verificadas nas atividades de campo. Em relação ao mapa de solos disponível para o DF realizado pela Embrapa (1978) na escala 1:100.000, e o mapa de solos da área da Bacia do Rio Jardim realizado por Reatto et al. (2000) na escala 1:50.000, o mapa digital gerado (Figura 54) mostrou uma melhor e mais realista distribuição das classes de solos.

VII.4. CONCLUSÕES

1. As principais classes de solos de ocorrência na Bacia do Rio Jardim são: Latossolos Vermelhos, Latossolos Vermelho-Amarelos, Neossolos Regolíticos, Plintossolos Pétricos Concrecionários Cambissolos Háplicos, Plintossolos Háplicos, Gleissolos Háplicos e Organossolos Háplicos.
2. As metodologias de sensoriamento remoto aplicadas à série histórica de imagens Landsat permitiram gerar uma imagem composta com 74% de solos expostos.
3. A biblioteca espectral de solos gerada a partir de amostras do horizonte A permitiu a individualização de classes de solos na bacia estudada.
4. Na análise da mistura espectral, o modelo MESMA destacou-se amplamente em relação ao modelo SMA no mapeamento digital do solo, obtendo um índice Kappa de 73%.
5. O uso de técnicas digitais para o mapeamento de solos torna-se mais rápido e menos oneroso, com a possibilidade de extrapolar a metodologia proposta para outras regiões do DF carentes de mapas de solos em escala mais detalhada.

VII.5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ADLER-GOLDEN, S.; BERK, A.; BERNSTEIN, L. S.; RICHTSMEIER, S.; ACHARYA, P. K.; MATTHEW, M. W.; ANDERSON, G. P.; ALLRED, C. L.; JEONG, L. S.; CHETWYND, J. H. FLAASH, a MODTRAN4 atmospheric correction package for hyperspectral data retrievals and simulations. In: GREEN, R. O. (Org.). **Summaries of the Seventh JPL Airborne Earth Science Workshop**. 1. ed. California: NASA, 1998. p. 9–14.
- ALMEIDA, F. F. M.; HASUI, Y. **O Pré-Cambriano do Brasil**. São Paulo, SP: Edgard Bluncher Ltda, 1984. Disponível em: <<https://books.google.com.br/books?id=uPZeAAAAMAAJ>>.
- ANDRONIKOV, V. L.; DOBROLVSHIY, G. V. Theory and methods for the use of remote sensing in the study of soils. **Mapping Science and Remote Sensing**, v. 28, p. 92–101, 1991.
- ANJOS, L. H. C.; FRANZMEIER, D. P.; SCHULZE, D. G. Formation of soils with plinthite on a toposequence in Maranhão State, Brazil. **Geoderma**, v. 64, n. 3-4, p. 257–279, 1995.
- ARRUDA, G. P. DE; DEMATTÊ, J. A. M.; CHAGAS, C. DA S. Mapeamento digital de solos por redes neurais artificiais com base na relação solo-paisagem. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 37, n. 2, p. 327–338, 2013.
- ASD INC - ANALYTICAL SPECTRAL DEVICES INC. **FieldSpec Pro User's Guide**. Boulder, CO, USA: ASD INC, 2002. Disponível em: <<http://support.asdi.com/Document/FileGet.aspx?f=600000.PDF>>.
- ASD INC - ANALYTICAL SPECTRAL DEVICES INC. **RS3™ User Manual**. Boulder, CO, USA: ASD Inc, 2008a. Disponível em: <<http://support.asdi.com/Document/Viewer.aspx?id=46>>.
- ASD INC - ANALYTICAL SPECTRAL DEVICES INC. **ViewSpec Pro™ User Manual**. Boulder, CO, USA: ASD INC, 2008b. Disponível em: <<http://geoinfo.amu.edu.pl/geoinf/m/spektr/viewspecpro.pdf>>.
- BARBOSA, I. O. **Distribuição dos Solos nas Chapadas Elevadas do Distrito Federal, com Emprego de Geoprocessamento**. Dissertação (Mestrado em Ciências Agrárias) - Universidade de Brasília, 2007, 125 p.
- BARBOSA, I. O.; LACERDA, M. P. C.; BILICH, M. R. Relações pedomorfogeológicas nas chapadas elevadas do Distrito Federal. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 33, p. 1373–1383, 2009.
- BARET, F.; JACQUEMOUD, S.; HANOCQ, J. F. The soil line concept in remote sensing. **Remote Sensing Reviews**, v. 7, p. 65–82, 1993.
- BATISTA, M.; SANTOS, M. C. Morfologia e gênese de dois solos com plintita da região Meio-Norte do Brasil. **Revista brasileira de ciência do solo**, v. 19, n. 2, p. 287–296, 1995.
- BAUMGARDNER, M. F.; SILVA, L. F.; BIEHL, L. L.; STONER, E. R. Reflectance properties of soils. **Advances in agronomy**, v. 38, p. 1–44, 1985.
- BELCHER, J. **O relatório técnico sobre a nova capital: relatório Belcher**. Brasília, DF: CODEPLAN, 1954.
- BELLINASSO, H.; DEMATTÊ, J. A. M.; ROMEIRO, S. A. Soil Spectral Library and its Use in Soil Classification. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 34, p. 861–870, 2010.
- BEN-DOR, E. Quantitative remote sensing of soil properties. **Advances in Agronomy**, v. 75, p. 173–243, 2002. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0065211302750050>>.
- BIARD, F.; BARET, F. Crop residue estimation using multiband reflectance. **Remote Sensing**

- of Environment**, v. 59, n. 3, p. 530–536, 1997.
- BRASIL. MINISTÉRIO DAS MINAS E ENERGIA. PROJETO RADAMBRASIL. **Folha SD. 23 - Brasília: geologia, geomorfologia, pedologia, vegetação e uso potencial da terra.** Rio de Janeiro, RJ: MME, 1982.
- BRAUN, O. P. G. Contribuição à geomorfologia do Brasil central. **Revista Brasileira de Geografia**, v. 32, n. 3, p. 3–39, 1971.
- BRITES, R. S.; SOARES, V. P.; RIBEIRO, C. Verificação da exatidão em classificações de uma imagem orbital mediante a utilização de três índices. **Revista Árvore**, v. 20, p. 415–424, 1996.
- BUOL, S. W.; SOUTHARD, R. J.; GRAHAM, R. C.; MCDANIEL, P. A. **Soil genesis and classification**. 6. ed. Hoboken, NJ: John Wiley & Sons, 2011.
- CAMPOS, J. E. G. Hidrogeologia do Distrito Federal: bases para a gestão dos recursos hídricos subterrâneos. **Brazilian Journal of Geology**, v. 34, n. 1, p. 41–48, 2004.
- CAMPOS, P. M.; LACERDA, M. P. C.; BILICH, M. R.; ALMEIDA PAPA, R.; SILVA, R. A. B. Adequabilidade do Uso Agrícola das Terras no Núcleo Rural do PAD/DF. In: Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, 15, 2010, Curitiba. **Anais...** Curitiba, p. 0507–0513, 2011. Disponível em: <<http://www.dsr.inpe.br/sbsr2011/files/p0173.pdf>>.
- CAMPOS, P. M.; LACERDA, M. P. C.; SILVA, C. L. DA; SÁ, M. A. C.; SOUSA, D. M. G. DE. Drenagem interna como fator de diferenciação de Latossolos do Distrito Federal. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 45, n. 3, p. 306–314, 2010.
- CAMPOS, R. C.; DEMATTÊ, J. A. M. Cor do solo: uma abordagem da forma convencional de obtenção em oposição à automatização do método para fins de classificação de solos. **Revista Brasileira de Ciencia do Solo**, v. 28, p. 853–863, 2004.
- CARNEIRO, P. J. R.; MALDANER, V. I.; ALVES, P. F.; DE QUEIRÓS, I. A.; MAURIZ, T. V.; PACHECO, R. F. Evolução do uso da água na bacia do rio Preto no Distrito Federal. **Espaço & Geografia**, v. 10, n. 2, p. 325–353, 2007.
- CARVALHO, F. A.; LACERDA, M. P. C. Caracterização da adequação do uso agrícola das terras no Distrito Federal. In: Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, 13, 2007, Florianópolis. **Anais...** Florianópolis: INPE, 2007. p. 111–117. Disponível em: <<http://martel.sid.inpe.br/col/dpi.inpe.br/sbsr@80/2006/11.15.15.25.49/doc/111-117.pdf>>.
- CARVALHO, O. A. J.; CARVALHO, A. P. F.; MENESES, P. R.; GUIMARÃES, R. F.; MARTINS, É. S. Análise de Imagens Hiperespectrais pelo Método Multiple Endmember Spectral Mixture Analysis (MESMA) em depósito supergênico de Níquel. **Revista Brasileira de Geociências**, v. 33, n. 1, p. 63–74, 2003.
- CEZAR, E.; NANNI, M. R.; CHICATI, M. L.; OLIVEIRA, R. B.; DEMATTÊ, J. A. M. Discriminação entre solos formados em região transicional por meio de sua resposta espectral. **Bioscience Journal**, v. 29, n. 3, p. 644–654, 2013.
- CHAGAS, C. S.; FERNANDES FILHO, E. I.; VIEIRA, C. A. O.; SCHAEFER, C. E. G. R.; CARVALHO JÚNIOR, W. DE. Atributos topográficos e dados do Landsat7 no mapeamento digital de solos com uso de redes neurais. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 45, n. 5, p. 497–507, 2010.
- CHANDER, G.; MARKHAM, B. L.; HELDER, D. L. Summary of current radiometric calibration coefficients for Landsat MSS, TM, ETM+, and EO-1 ALI sensors. **Remote Sensing of Environment**, v. 113, p. 893–903, 2009.
- CHAVES, A. A. A.; LACERDA, M. P. C.; KATO, E.; GOEDERT, W. J.; RAMOS, M. L. G. Uso das terras da parte norte da bacia do Rio Descoberto, Distrito Federal, Brasil. **Bragantia**, v. 69, p. 711–718, 2010.

- CLEMENTE, C. A.; DEMATTÊ, J. A. M.; MAFRA, Á. L.; BENTIVENHA, S. R. P. Reflectância espectral e mineralogia de materiais formados sobre diabásio. **Scientia Agricola**, v. 57, n. 1, p. 159–168, 2000.
- CLINE, M. G.; BUOL, S. W. Soils of the Central Plateau of Brazil and extension of results of field research conducted near Planaltina, Federal District. **Agronomy Mimeo**, v. 73, n. 13, p. 43, 1973.
- CODEPLAN - COMPANHIA DE PLANEJAMENTO DO DISTRITO FEDERAL. **Atlas do Distrito Federal**. Brasília, DF: CODEPLAN, 1984. v. 1.
- CODEPLAN - COMPANHIA DE PLANEJAMENTO DO DISTRITO FEDERAL. **Cartas Planialtimétricas em Formato Vetorial, na escala 1:25.000 e 10.000, Sistema Cartografico do Distrito Federal - SICAD, com informações sobre sistema viário, hidrografia, hipsometria e áreas urbanas**. Brasília, DF: CODEPLAN, 1991.
- COHEN, J. A coefficient of agreement of nominal scales. **Educational and Psychological Measurement**, v. 20, n. 1, p. 37–46, 1960.
- 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**, v. 155, n. 4, 1993.
- CONGALTON, R. G.; GREEN, K. **Assessing the Accuracy of Remotely Sensed Data: Principles and Practices**. New York: Taylor & Francis Group, v. 25, 2010. Disponível em: <http://doi.wiley.com/10.1111/j.1477-9730.2010.00574_2.x>.
- CONGALTON, R. G.; MEAD, R. A. A review of three discrete multivariate analysis techniques used in assessing the accuracy of remotely sensed data from error matrices. **Geoscience and Remote Sensing, IEEE Transactions on**, v. GE-24, n. 1, p. 169–174, 1986.
- COOLEY, T.; ANDERSON, G. P.; FELDE, G. W.; HOKE, M. L.; RATKOWSKI, A. J.; CHETWYND, J. H.; GARDNER, J. A.; ADLER-GOLDEN, S. M.; MATTHEW, M. W.; BERK, A.; BERNSTEIN, L. S.; ACHARYA, P. K.; MILLER, D.; LEWIS, P. FLAASH, a MODTRAN4-based atmospheric correction algorithm, its application and validation. In: International Geoscience and Remote Sensing Symposium - IGARSS, 3, 2002, Toronto. **Proceedings...** Toronto, p. 1414–1418, 2002.
- COSTA, H. C.; MARCUZZO, F.; FERREIRA, O. M.; ANDRADE, L. R. Espacialização e Sazonalidade da Precipitação Pluviométrica do Estado de Goiás e Distrito Federal. **Revista Brasileira de Geografia Física**, v. 5, n. 1, p. 87–100, 2012.
- CRIVELENTI, R. C.; COELHO, R. M.; ADAMI, S. F.; DE MEDEIROS OLIVEIRA, S. R. Mineração de dados para inferência de relações solo-paisagem em mapeamentos digitais de solo. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 44, n. 12, p. 1707–1715, 2009.
- DALMOLIN, R. S. D.; GONÇALVES, C. N.; KLAMT, E.; DICK, D. P. Relação entre os constituintes do solo e seu comportamento espectral. **Ciência Rural**, v. 35, p. 481–489, 2005.
- DAMACENA, F. A.; GUIMARÃES, R. F.; CATÃO, R. DE C.; GOMES, R. A. T.; BARBOSA, F. L. R.; CARVALHO, O. A. J.; MARTINS, É. S. Identificação de zonas de saturação na paisagem a partir de dados de transmissividade obtidos em campo na Bacia Hidrográfica do Rio Jardim (DF). **Espaço & Geografia**, v. 12, n. 1, p. 105–123, abr. 2010.
- DEMATTÊ, J. A. M. Characterization and discrimination of soils by their reflected electromagnetic energy. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 37, p. 1445–1458, 2002.
- DEMATTÊ, J. A. M.; ARAÚJO, S. R.; FIORIO, P. R.; FONGARO, C. T.; NANNI, M. R.

- Espectroscopia VIS-NIR-SWIR na avaliação de solos ao longo de uma topossequência em Piracicaba (SP). **Revista Ciência Agronômica**, v. 46, n. 4, p. 679–688, 2015.
- DEMATTÊ, J. A. M.; BELLINASSO, H.; ROMERO, D. J.; FONGARO, C. T. Morphological Interpretation of Reflectance Spectrum (MIRS) using libraries looking towards soil classification. **Scientia Agricola**, v. 71, p. 509-520, 2014.
- DEMATTÊ, J. A. M.; CAMPOS, R. C.; ALVES, M. C. Avaliação espectral de solos desenvolvidos em uma topossequência de diabásio e folhelho da região de Piracicaba, SP. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 35, p. 2447–2460, 2000.
- 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**, v. 23, p. 343–355, 1999.
- DEMATTÊ, J. A. M.; GENÚ, A. M.; FIORIO, P. R.; ORTIZ, J. L.; MAZZA, J. A.; LEONARDO, H. C. L. Comparação entre mapas de solos obtidos por sensoriamento remoto espectral e pelo método convencional. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 39, p. 1219–1229, 2004.
- DEMATTÊ, J. A. M.; HUETE, A. R.; FERREIRA JÚNIOR, L. G.; NANNI, M. R.; ALVES, M. C.; FIORIO, P. R. Methodology for Bare Soil Detection and Discrimination by Landsat TM Image. **The Open Remote Sensing Journal**, v. 2, n. 1, p. 24–35, 2009.
- 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**, v. 24, n. 23, p. 4715–4738, 1 jan. 2003. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1080/0143116031000075116>>.
- DEMATTÊ, J. A. M.; NANNI, M. R.; FORMAGGIO, A. R.; EPIPHANIO, J. C. N. Spectral reflectance for the mineralogical evaluation of Brazilian low clay activity soils. **International Journal of Remote Sensing**, v. 28, n. 20, p. 4537–4559, 2007.
- DEMATTÊ, J. A. M.; TERRA, F. S. Comportamento espectral de perfis modais dos principais solos de Rafard, SP. **Bragantia**, v. 69, n. 2, p. 249–252, 2010.
- DEMATTÊ, J. A. M.; TERRA, F. S. Spectral pedology: A new perspective on evaluation of soils along pedogenetic alterations. **Geoderma**, v. 217–218, p. 190–200, abr. 2014. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S001670611300428X>>.
- DEMATTÊ, J. A. M.; TOLEDO, A. M. A.; SIMÕES, M. S. Metodologia para reconhecimento de três solos por sensores: laboratorial e orbital. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 28, p. 877–889, 2004.
- DOLABELLA, R. H. C. **Caracterização agroambiental e avaliação da demanda e da disponibilidade dos recursos hídricos para a agricultura irrigada na bacia hidrográfica do Rio Jardim (DF)**. Dissertação (Mestrado em Ecologia) – Universidade de Brasília, Brasília, 1996. 106 p.
- DUDLEY, K. L.; DENNISON, P. E.; ROTH, K. L.; ROBERTS, D. A.; COATES, A. R. A multi-temporal spectral library approach for mapping vegetation species across spatial and temporal phenological gradients. **Remote Sensing of Environment**, v. 167, p. 121–134, 15 set. 2015.
- EMBRAPA – EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA – SERVIÇO NACIONAL DE LEVANTAMENTO E CONSERVAÇÃO DE SOLOS. **Levantamento de reconhecimento dos solos do Distrito Federal**. Rio de Janeiro, RJ: EMBRAPA-SNLCS, 1978.
- EMBRAPA – EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA – SERVIÇO NACIONAL DE LEVANTAMENTO E CONSERVAÇÃO DE SOLOS. **Procedimentos**

- normativos de levantamentos pedológicos.** Rio de Janeiro, RJ: EMBRAPA-SPI, 1995.
- EMBRAPA – EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. CENTRO NACIONAL DE PESQUISAS DE SOLOS. **Manual de métodos de análise de solo.** 2. ed. Rio de Janeiro: EMBRAPA-CNPQ, 1997.
- EMBRAPA – EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. CENTRO NACIONAL DE PESQUISAS DE SOLOS. **Sistema Brasileiro de Classificação de Solos.** 3. ed. Brasília: EMBRAPA-CNPQ, 2013.
- ENVI - ENVIRONMENT FOR VISUALIZING IMAGES. **Atmospheric Correction Module: QUAC and FLAASH User's Guide.** [S.l.]: ITT Visual Information Solutions, 2009. v. 4.
- EPIPHANIO, J. C. N.; FORMAGGIO, A. R.; VALERIANO, M. M.; OLIVEIRA, J. B. **Comportamento espectral de solos do Estado de São Paulo.** São José dos Campos: INPE, 1992. 132 p.
- ESRI. **ArcGIS Desktop: Release 10.3. Redlands CA.** CA: Environmental Systems Research Institute, 2014.
- EXELIS - VISUAL INFORMATION SOLUTIONS. **Calibrating Images Tutorial.** Disponível em: <<http://www.exelisvis.com/docs/calibratingimagestutorial.html>>. Acesso em: 12 mar. 2015a.
- EXELIS - VISUAL INFORMATION SOLUTIONS. **Classification Tutorial.** Disponível em: <<http://www.exelisvis.com/docs/classificationtutorial.html>>. Acesso em: 11 dez. 2015b.
- EXELIS - VISUAL INFORMATION SOLUTIONS. **ENVI Tutorials.** Disponível em: <<http://www.exelisvis.com/docs/Tutorials.html>>. Acesso em: 5 maio 2015c.
- EXELIS - VISUAL INFORMATION SOLUTIONS. **Fast Line-of-sight Atmospheric Analysis of Hypercubes (FLAASH).** Disponível em: <<http://www.exelisvis.com/docs/FLAASH.html>>. Acesso em: 1 mar. 2015d.
- EXELIS - VISUAL INFORMATION SOLUTIONS. **Linear Spectral Unmixing.** Disponível em: <<http://www.exelisvis.com/docs/LinearSpectralUnmixing.html>>. Acesso em: 16 nov. 2015e.
- EXELIS - VISUAL INFORMATION SOLUTIONS. **Manage Raster Data.** Disponível em: <<http://www.exelisvis.com/docs/ManageRasterData.html#Masking>>. Acesso em: 11 nov. 2015f.
- EXELIS - VISUAL INFORMATION SOLUTIONS. **SPEAR Vegetation Delineation.** Disponível em: <<http://www.exelisvis.com/docs/SPEARVegetationDelineation.html>>. Acesso em: 12 out. 2015g.
- EXELIS - VISUAL INFORMATION SOLUTIONS. **Spectral Libraries.** Disponível em: <<https://www.exelisvis.com/docs/spectrallibraries.html#Spectral>>. Acesso em: 1 jan. 2015h.
- FERNANDES, R. B. A.; BARRÓN, V.; TORRENT, J.; FONTES, M. P. F. Quantificação de óxidos de ferro de Latossolos brasileiros por espectroscopia de refletância difusa. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 28, n. 2, p. 245–257, 2004.
- FERREIRA, C. S. **Avaliação Temporal do Uso e Ocupação das Terras na Bacia do Rio São Bartolomeu, DF.** Dissertação (Mestrado em Ciências Agrárias) - Faculdade de Agronomia e Medicina Veterinária - Universidade de Brasília, DF, 2005. 120 p.
- FERREIRA, L. G.; YOSHIOKA, H.; HUETE, A.; SANO, E. E. Seasonal landscape and spectral vegetation index dynamics in the Brazilian Cerrado: An analysis within the Large-Scale Biosphere–Atmosphere Experiment in Amazônia (LBA). **Remote Sensing of Environment**, v. 87, n. 4, p. 534–550, 15 nov. 2003.
- FERREIRA, M. E. **Análise do modelo linear de mistura espectral na discriminação de fitofisionomias do Parque Nacional de Brasília (bioma cerrado).** Dissertação (Mestrado em Geologia) - Instituto de Geociências - Universidade de Brasília, 2003. 127

p.

- FIGUEIREDO, G. C.; VIEIRA, C. A. O. Estudo do comportamento dos índices de exatidão global, Kappa e Tau, comumente usados para avaliar a classificação de imagens de sensoriamento remoto. In: Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, 13, 2007, Florianópolis **Anais...** Florianópolis, p. 5755–5762, 2007.
- FIGUEIREDO, S. R.; GIASSON, E.; TORNQUIST, C. G.; NASCIMENTO, P. C. Uso de regressões logísticas múltiplas para mapeamento digital de solos no Planalto Médio do RS. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 32, p. 2779–2785, 2008.
- FIORIO, P. R.; DEMATTÊ, J. A. M. Orbital and laboratory spectral data to optimize soil analysis. **Scientia Agricola**, v. 66, 2009.
- FIORIO, P. R.; DEMATTÊ, J. A. M.; NANNI, M. R.; FORMAGGIO, A. R. Diferenciação espectral de solos utilizando dados obtidos em laboratório e por sensor orbital. **Bragantia**, v. 69, n. 2, p. 453–466, 2010.
- FONGARO, C. T. **Mapeamento granulométrico do solo via imagens de satélite e atributos de relevo**. Dissertação (Mestrado em Ciências) - Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2015. 106 p.
- FORTES, C.; DEMATTÊ, J. A. M.; GENÚ, A. M. Estimativa de produtividade agroindustrial de cana-de-açúcar por dados espectrais orbitais ETM+/LANDSAT 7. **Ambiência**, v. 5, n. 3, p. 489–504, 2009.
- FRANCESCHINI, M. H. D.; DEMATTÊ, J. A. M.; SATO, M. V.; VICENTE, L. E.; GREGO, C. R. Abordagens semiquantitativa e quantitativa na avaliação da textura do solo por espectroscopia de reflectância bidirecional no VIS-NIR-SWIR. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 48, p. 1569–1582, 2013.
- FREITAS-SILVA, F. H.; CAMPOS, J. E. G. Geologia do Distrito Federal. In: Instituto de Geociências da Universidade De Brasília. IEMA/SEMATEC/UNB (Org.). **Inventário hidrogeológico e dos recursos hídricos superficiais do Distrito Federal**. Brasília, DF: Universidade de Brasília, 1998a. p. 45.
- FREITAS-SILVA, F. H.; CAMPOS, J. E. G. Hidrogeologia do Distrito Federal. In: Instituto de Geociências da Universidade De Brasília. IEMA/SEMATEC/UNB (Org.). **Inventário hidrogeológico e dos recursos hídricos superficiais do Distrito Federal**. Brasília, DF: Universidade de Brasília, 1998b. v. 2. p. 66.
- GALLO, B. C. **Imagens multitemporais do Landsat TM como estratégia no apoio ao levantamento pedológico**. Dissertação (Mestrado em Ciências) - Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2015. 78 p.
- GALVÃO, L. S.; VITORELLO, Í. Variability of Laboratory Measured Soil Lines of Soils from Southeastern Brazil. **Remote Sensing of Environment**, v. 63, n. 2, p. 166–181, fev. 1998.
- GARCÍA-HARO, F. J.; SOMMER, S.; KEMPER, T. A new tool for variable multiple endmember spectral mixture analysis (VMESMA). **International Journal of Remote Sensing**, v. 26, n. 10, p. 2135–2162, 1 maio 2005.
- GENÚ, A. M.; DEMATTÊ, J. A. M. Espectrorradiometria de solos e comparação com sensores orbitais. **Bragantia**, v. 71, n. 1, p. 82–89, 2012.
- GENÚ, A. M.; ROBERTS, D. A.; DEMATTÊ, J. A. M. The use of multiple endmember spectral mixture analysis (MESMA) for the mapping of soil attributes using Aster imagery. **Acta Scientiarum. Agronomy**. v. 35, p. 377-386, 2013.
- GOEDERT, W. J. **Solos do cerrado: tecnologías e estrategias de manejo**. Brasília, DF: Embrapa-CPAC, 1985. 422 p.

- GOMES, D.; VICENTE, L. E.; CARVALHO, S.; VICTORIA, D.; ANDRADE, R. G.; AGNESE, M. L.; DA-SILVA, R. F. B. Avaliação comparativa de correção atmosférica de imagens Landsat utilizando MODTRAN e Dark Object Subtraction. In: Simpósio Internacional SELPER, 15, 2012, Curitiba. **Anais...** Curitiba, 236-245, 2012.
- GROVE, C. I.; HOOK, S. J.; PAYLOR III, E. D. **Laboratory reflectance spectra of 160 minerals, 0.4 to 2.5 micrometers**. Pasadena: NASA, 1992. 335 p.
- HAUBROCK, S. N.; CHABRILLAT, S.; LEMMNITZ, C.; KAUFMANN, H. Surface soil moisture quantification models from reflectance data under field conditions. **International Journal of Remote Sensing**, v. 29, n. 1, p. 3–29, 2008.
- HENGL, T.; ROSSITER, D. G. Supervised Landform Classification to Enhance and Replace Photo-Interpretation in Semi-Detailed Soil Survey. **Soil Science Society of America Journal**, v. 67, n. 6, p. 1810, 2003.
- HIRYE, M. C. D. M.; ALVES, D.; KUX, H. Mapeamento Da Cobertura Da Terra Na Cidade De Altamira (Pa) Em 2000 E 2010, Com a Utilização Do Modelo Linear De Mistura Espectral De Imagens Do Sensor Tm. **Revista Brasileira de Cartografia**, v.67, n. 1, p.157–168, 2015. Disponível em: <<http://www.lsie.unb.br/rbc/index.php/rbc/article/view/901>>.
- IBGE - INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **FAQ (Frequently Asked Questions - Perguntas Mais Frequentes)**. Disponível em: <<http://www.ibge.gov.br/home/geociencias/geodesia/pmrg/faq.shtm>>. Acesso em: 19 abr. 2015.
- IBGE - INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Grografia do Brasil: Região Centro-Oeste**. 4. ed. Rio de Janeiro, RJ: IBGE, 1977.
- IBGE - INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Mapa Índice Digital – MID: mapeamento geral do Brasil**. 4. ed. Rio de Janeiro: IBGE / DSG, 2011.
- IBRAM - INSTITUTO BRASÍLIA AMBIENTAL. **Bioma Cerrado**. Disponível em: <<http://www.ibram.df.gov.br/informacoes/meio-ambiente/bioma-cerrado.html>>. Acesso em: 21 ago. 2015.
- INPE - INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS. **Sensoriamento Remoto Orbital aplicado a estudos urbanos**. São José dos Campo, SP: INPE, 2012. Disponível em: <<http://urlib.net/8JMKD3MGP7W/3BEFCJH>>.
- JENSEN, J. R. **Sensoriamento remoto do ambiente: uma perspectiva em recursos terrestres**. 2. ed. São José dos Campo, SP: Parêntese Editora, 2009. 587 p.
- JOHANN, J. A.; ROCHA, J. V.; DUFT, D. G.; LAMPARELLI, R. A. C. Estimativa de áreas com culturas de verão no Paraná, por meio de imagens multitemporais EVI/Modis. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 47, n. 9, p. 1295–1306, 2012.
- JUNIOR, F. R.; ARAÚJO, L. G.; SOUZA, R. Q.; SILVA BATISTA, F. P.; OLIVEIRA, D. N. S.; LACERDA, M. P. C. Relações solo-paisagem em topossequências na Fazenda Água Limpa, Distrito Federal. **Nativa**, v. 3, n. 1, p. 27–35, 2015.
- KÄMPF, N.; CURI, N. Formação e evolução do solo (pedogênese). In: KER, J. C.; CURI, N.; SCHAEFER, C. E.; TORRADO, P. V. (Org.). **Pedologia: Fundamentos**. 1. ed. Viçosa, MG: SBCS, 2012. p. 248–302.
- KÄMPF, N.; MARQUES, J. J.; CURI, N. Mineralogia de solos brasileiros. **Pedologia: Fundamentos**. Viçosa, MG: SBCS, 2012. p. 82–145.
- KING, L. C. A geomorfologia do Brasil Central. **Revista Brasileira de Geografia**, v. 18, n. 2, p. 147–265, 1956.
- KÖPPEN, W. Klassifikation der Klimate nach Temperatur, Niederschlag und Jahresablauf (Classification of climates according to temperature, precipitation and seasonal cycle).

Petermanns geographische Mitteilungen, v. 64, p. 193–203, 1918.

- LABSPHERE. **Spectralon® diffuse reflectance standards**. Disponível em: <<http://www.labsphere.com>>. Acesso em: 20 abr. 2015.
- LACERDA, M. P. C.; BARBOSA, I. O. Relações pedomorfogeológicas e distribuição de pedoformas na estação ecológica de águas emendadas, Distrito Federal. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 36, p. 709–722, 2012.
- LAGO, W. N. M.; LACERDA, M. P. C.; NEUMANN, M. R. B. Indicadores de qualidade dos solos na microbacia do Ribeirão Extrema, Distrito Federal: parte II. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 16, n. 7, p. 721–729, 2012.
- LAGO, W. N. M.; LACERDA, M. P. C.; NEUMANN, M. R. B.; BORGES, T. D. Ocupação e adequação do uso das terras na microbacia do Ribeirão Extrema, Distrito Federal: Parte I. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 16, p. 289-296, 2012.
- LAMPARELLI, R. A. C.; NERY, L.; ROCHA, J. V. Utilização da técnica por componentes principais (ACP) e fator de iluminação, no mapeamento da cultura do café em relevo montanhoso. **Engenharia Agrícola**, v. 31, p. 584–597, 2011.
- LANDIS, J. R.; KOCH, G. G. The measurement of observer agreement for categorical data. **Biometrics**, v. 33, n. 1, p. 159–174, 1977.
- LILLESAND, T. M.; KIEFER, R. W.; CHIPMAN, J. **Remote Sensing and Image Interpretation**. 6. ed. Madison, USA: John Wiley & Sons, 2007. 621 p.
- LINDENMAYER, Z. C. **Sobre a Geologia do estado de Goiás**. Goiânia: Ministério de Minas e Energia - DNPM, 1972. 43 p.
- LINN, R. M. **Avaliação dos modelos de mistura espectral mesma e SMA aplicados aos dados hiperespectrais hyperion/eo-1 adquiridos na Planície Costeira do Rio Grande do Sul**. Dissertação (Mestrado em Sensoriamento Remoto) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul-UFRGS, Porto Alegre, RS, 2008. 140 p.
- LIU, T.; YANG, X. Mapping vegetation in an urban area with stratified classification and multiple endmember spectral mixture analysis. **Remote Sensing of Environment**, v. 133, p. 251–264, 15 jun. 2013.
- LOBELL, D. B.; ASNER, G. P. Moisture effects on soil reflectance. **Soil Science Society of America Journal**, v. 66, n. 3, p. 722–727, 2002.
- MADEIRA NETO, J. D. S. Spectral reflectance properties of soils. **Photo interpretation**, v. 34, n. 2, p. 59–76, 1996.
- MADEIRA NETTO, J. S. Comportamento Espectral dos Solos. In: MENESES, P. R.; MADEIRA NETTO, J. S. (Org.). **Sensoriamento remoto: reflectância dos alvos naturais**. 1. ed. Brasília, DF: Editora Universidade de Brasília; Planaltina: Embrapa Cerrados, 2001. p. 127–154.
- MADEIRA NETTO, J. S.; BAPTISTA, G. M. DE M. **Reflectância espectral de solos**. Planaltina, DF: Embrapa Cerrados, 2000. 55 p.
- MADEIRA NETTO, J. S.; BEDIDI, A.; CERVELLE, B.; POUGET, M.; FLAY, N. Visible spectrometric indices of hematite (Hm) and goethite (Gt) content in lateritic soils: The application of a Thematic Mapper (TM) image for soil-mapping in Brasilia, Brazil. **International Journal of Remote Sensing**, v. 18, n. 13, p. 2835–2852, 1997.
- MARTINS, E. S.; BAPTISTA, G. M. M. Compartimentação geomorfológica e sistemas morfodinâmicos do Distrito Federal. In: IEMA/SEMATEC/UNB (Org.). **Inventário Hidrogeológico e dos Recursos Hídricos Superficiais do Distrito Federal. Brasília**. 1. ed. Brasília, DF: IEMA/SEMATEC/UnB, 1998. p. 2–53.
- MATHEWS, H. L.; CUNNINGHAM, R. L.; PETERSEN, G. W. Spectral reflectance of selected

- Pennsylvania soils. **Soil Science Society of America Journal**, v. 37, n. 3, p. 421–424, 1973.
- MCBRATNEY, A. B.; MENDONÇA-SANTOS, M. DE L.; MINASNY, B. On digital soil mapping. **Geoderma**, v. 117, n. 1–2, p. 3–52, nov. 2003.
- MCKENZIE, N. J.; RYAN, P. J. Spatial prediction of soil properties using environmental correlation. **Geoderma**, v. 89, n. 1–2, p. 67–94, abr. 1999.
- MENESES, P. R. **Avaliação e seleção de bandas do sensor thematic mapper do Landsat-5 para a discriminação de rochas carbonáticas do Grupo Bambuí como subsídio ao mapeamento de semidetalhe**. Tese (Doutorado em Geologia Geral e Aplicação) - Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo-USP, 1986. 233 p.
- MENESES, P. R.; ALMEIDA, T. **Introdução ao processamento de imagens de sensoriamento remoto**. Brasília: CNPq / UnB, 2012. 276 p.
- MENESES, P. R.; SANO, E. E. Classificação pixel a pixel de imagens. In: MENESES, P. R.; ALMEIDA, T. (Org.). **Introdução ao Processamento de Imagens de Sensoriamento Remoto**. Brasília: CNPq / UnB, 2012. p. 191–208.
- MENESES, P. R.; SANTA ROSA, A. N. DE C. Filtragem. In: MENESES, P. R.; ALMEIDA, T. (Org.). **Introdução ao Processamento de Imagens de Sensoriamento Remoto**. Brasília: CNPq / UnB, 2012. p. 168–190.
- MOREIRA, H. L.; OLIVEIRA, V. Á. Evolução e gênese de um Plintossolo Pétrico concrecionário éutrico argissólico no município de Ouro Verde de Goiás. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 32, p. 1683–1690, 2008.
- MOREIRA, M. A. **Fundamentos do Sensoriamento Remoto e Metodologias de Aplicação**. 3. ed. Viçosa, MG: Universidade Federal de Viçosa, 2007. 315 p.
- MOREIRA, M. A.; AULICINO, L. C. M.; SHIMABUKURO, Y. E.; DUARTE, V.; RUDORFF, B. F. T.; YI, J. L. R.; SOUZA, I. M. Modelo de Mistura Espectral para identificar e mapear áreas de soja e milho em quatro municípios do Estado de Minas Gerais. In: Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, 9, 1998, Santos, SP. **Anais...** Santos, SP: INPE, 1998. p. 53–57.
- MOTTA, P. E. F. DA; CARVALHO FILHO, A. DE; KER, J. C.; PEREIRA, N. R.; CARVALHO JUNIOR, W. DE; BLANCANEUX, P. Relações solo-superfície geomórfica e evolução da paisagem em uma área do Planalto Central Brasileiro. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 37, n. 6, p. 869–878, 2002.
- MULDER, V. L.; DE BRUIN, S.; SCHAEPMAN, M. E.; MAYR, T. R. The use of remote sensing in soil and terrain mapping — A review. **Geoderma**, v. 162, n. 1–2, p. 1–19, 15 abr. 2011.
- MYINT, S. W.; OKIN, G. S. Modelling land cover types using multiple endmember spectral mixture analysis in a desert city. **International Journal of Remote Sensing**, v. 30, p. 2237–2257, 2009.
- NAGLER, P. L.; DAUGHTRY, C. S. T.; GOWARD, S. N. Plant litter and soil reflectance. **Remote Sensing of Environment**, v. 71, n. 2, p. 207–215, 2000.
- NANNI, M. R.; DEMATTÊ, J. A. M. Comportamento da linha do solo obtida por espectrorradiometria laboratorial para diferentes classes de solo. **Revista Brasileira de Ciência do solo**, v. 30, n. 6, p. 1031–1038, 2006a.
- NANNI, M. R.; DEMATTÊ, J. A. M. Spectral Reflectance Methodology in Comparison to Traditional Soil Analysis. **Soil Science Society of America Journal**, v. 70, n. 2, p. 393–407, mar. 2006b.
- NAWAR, S.; BUDDENBAUM, H.; HILL, J. Estimation of soil salinity using three quantitative methods based on visible and near-infrared reflectance spectroscopy: a case study from

- Egypt. **Arabian Journal of Geosciences**, v. 8, n. 7, p. 5127–5140, 2015. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1007/s12517-014-1580-y>>.
- NAZEER, M.; NICHOL, J. E.; YUNG, Y. K. Evaluation of atmospheric correction models and Landsat surface reflectance product in an urban coastal environment. **International Journal of Remote Sensing**, v. 35, n. 16, p. 6271–6291, 18 ago. 2014.
- NOLASCO-CARVALHO, C. C.; FRANCA-ROCHA, W.; UCHA, J. M. Mapa digital de solos: uma proposta metodológica usando inferência fuzzy . Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. p. 46-55, 2009.
- NOVAES FILHO, J. P.; COUTO, E. G.; OLIVEIRA, V. A. DE; JOHNSON, M. S.; LEHMANN, J.; RIHA, S. S. Variabilidade espacial de atributos físicos de solo usada na identificação de classes pedológicas de microbacias na Amazônia meridional. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 31, p. 91–100, 2007.
- NOVAES PINTO, M. Caracterização geomorfológica do Distrito Federal. In: NOVAES PINTO, M. (Org.). **Cerrado: caracterização, ocupação e perspectivas**. Brasília, DF: Universidade de Brasília/SEMATEC, 1994. p. 285–344.
- NOVAES PINTO, M. Superfícies de aplainamento do Distrito Federal. **Revista Brasileira de Geografia**, v. 49, p. 9–27, 1987.
- NOVAES PINTO, M.; CARNEIRO, P. J. R. Análise preliminar das feições geomorfológicas do Distrito Federal. 1984, São Paulo, SP: EDUSP, 1984. p. 190–213.
- NOVAES PINTO, Maria. Aplainamento nos trópicos: uma revisão conceitual. **Geografia**, Rio Claro, 1988. , v. 13, n. 26, p. 119–129.
- NOVO, E. M. L. DE M. **Sensoriamento remoto: princípios e aplicações**. 4. ed. São Paulo, SP: Blucher, 2010. 383 p.
- NOVO, E. M. L. M.; FERREIRA, L. G.; BARBOSA, C.; CARVALHO, C.; SANO, E. E.; SHIMABUKURO, Y.; HUETE, A.; POTTER, C.; ROBERTS, D. A.; HESS, L. L.; MELACK, J. J.; YOSHIOKA, H.; KLOOSTER, S.; KUMAR, V.; MYNENI, R.; RATANA, P.; DIDAN, K.; MIURA, T. Técnicas avançadas de sensoriamento remoto aplicadas ao estudo de mudanças climáticas e ao funcionamento dos ecossistemas amazônicos. **Acta Amazonica**, v. 35, p. 259-272, 2005.
- PALACIOS-ORUETA, A.; PINZON, J. E.; ROBERTS, D. A.; USTIN, S. L. Remote sensing of soil properties in the Santa Monica Mountains: Hierarchical Foreground and Background Analysis. **Seventh Annual JPL Airborne Earth Science Workshop**, v. 4257, n. 98, 1998. Disponível em: <<http://cstars.ucdavis.edu/papers/html/palaciosoruetaetal1998c/>>.
- PALUDO, A; J. A. JOHANN; M. A. U. OPAZO; J. RICHETTI; W. R. BECKER. Uso de Sensoriamento Remoto no Mapeamento da Cobertura Florestal, Corpos Hídricos e Cidades para o Estado do Paraná. In: Congresso Brasileiro de Engenharia Agrícola - CONBEA, 43, 2014, Campo Grande, MS. **Anais...** Campo Grande, MS, p. 595-603, 2014.
- PENTEADO, M. M. Tipos de concreções ferruginosas nos compartimentos geomorfológicos do Planalto de Brasília. **Notícia Geomorfológica**, v. 16, p. 39–53, 1976.
- PEREIRA, T. T. C.; KER, J. C.; SCHAEFER, C. E. G. R.; BARROS, N. F. DE; NEVES, J. C. L.; ALMEIDA, C. C. Gênese de latossolos e cambissolos desenvolvidos de rochas pelíticas do grupo Bambuí - Minas Gerais. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 34, n. 4, p. 1283–1295, 2010.
- PHILLIPS, T. L.; DAVIS, S. M.; LANDGREBE, D. A.; SWAIN, P. H.; HOFFER, R. M.; LINDENLAUB, J. C.; SILVA, L. F. **Remote sensing: The quantitative approach**. 1 ed. New York: McGraw-Hill International Book Co, 1978.

- PONZONI, F. J.; SHIMABUKURO, Y. E.; KUPLICH, T. M. **Sensoriamento remoto da vegetação**. 2. ed. São Paulo, SP: Oficina de Textos, 2012. 127 p.
- PUGLIERO, V. S.; V. D. MANABE; J. V. ROCHA. Aplicação de diferentes métodos de classificadores em imagens Landsat para mapeamento temático do uso da terra. In: Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto - SBSR, 16, 2013, Foz do Iguaçu, PR, **Anais...** Foz do Iguaçu, PR, p. 7746–7753, abr. 2013.
- QUANTUM GIS DEVELOPMENT TEAM. **Quantum GIS Geographic Information System 2.2.0 - Valmiera**. 2014. Disponível em: <<http://www.qgis.org/>>.
- QUINTANO, C.; FERNÁNDEZ-MANSO, A.; ROBERTS, D. A. Multiple Endmember Spectral Mixture Analysis (MESMA) to map burn severity levels from Landsat images in Mediterranean countries. **Remote Sensing of Environment**, v. 136, p. 76–88, set. 2013. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0034425713001466>>.
- R CORE TEAM. **R: A Language and Environment for Statistical Computing**. Viena, Austria: R Foundation for Statistical Computing, 2015. v. 55.
- RASHED, T.; WEEKS, J. R.; GADALLA, M. S.; HILL, A. G. Revealing the Anatomy of Cities through Spectral Mixture Analysis of Multispectral Satellite Imagery: A Case Study of the Greater Cairo Region, Egypt. **Geocarto International**, v. 16, n. 4, p. 7–18, 2001.
- REATTO, A.; CORREIA, J. R.; SPERA, S. T.; CHAGAS, C. S.; MARTINS, E. S.; ANDAHUR, J. P.; GODOY, M. J. S.; ASSAD, M. L. C. L. **Levantamento semi-detalhado dos solos da bacia do rio Jardim-DF, escala 1:50.000**. Planaltina, DF: Embrapa Cerrados, 2000. 63 p.
- REATTO, A.; MARTINS, E. DE S.; FARIAS, M. F. R.; SILVA, A. V.; CARVALHO, O. A. J.; OLIVEIRA, R. C. J.; RODRIGUES, T. E.; SANTOS, P. L.; VALENTE, M. A. **Mapa pedológico digital - SIG atualizado do Distrito Federal escala 1:100.000 e uma síntese do texto explicativo**. Planaltina, DF: Embrapa Cerrados, 2004.
- REATTO, A.; SPERA, S. T.; MARTINS, E. DE S.; CORREIA, J. R.; BLOISE, G. L. F.; SILVA, A. V. DA. **Aptidão agrícola das terras da Bacia do Rio Jardim, DF**. Planaltina, DF: Embrapa Cerrados, 2002. 38 p.
- RESENDE, M.; CURTI, N.; CORREA, G. F.; REZENDE, S. B. **Pedologia: base para distinção de ambientes**. Lavras: UFLa, 2007.
- RIBEIRO, M. R.; OLIVEIRA, L. B.; ARAÚJO FILHO, J. C. Caracterização morfológica do solo. In: KER, J. C.; CURTI, N.; SCHAEFER, C. E.; TORRADO, P. V. (Org.). **Pedologia: Fundamentos**. 1. ed. Viçosa, MG: SBCS, 2012. p. 48–78.
- ROBERTS, D. A.; GARDNER, M.; CHURCH, R.; USTIN, S.; SCHEER, G.; GREEN, R. O. Mapping chaparral in the Santa Monica Mountains using multiple endmember spectral mixture models. **Remote Sensing of Environment**, v. 65, n. 3, p. 267–279, 1998.
- ROBERTS, D. A.; HALLIGAN, K.; DENNISON, P. **VIPER Tools User Manual**. Santa Barbara: University of California, 2007. 91 p. Disponível em: <<http://www.vipertools.org/>>.
- RODRIGUES, T. E.; KLAMT, E. Mineralogia e gênese de uma sequência de solos do Distrito Federal. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 2, n. 2, p. 132–139, 1978.
- ROUSE, J. W.; R. H. HAAS; J. A. SCHELL; D. W. DEERING. Monitoring vegetation systems in the Great Plains with ERTS. In: ERTS Symposium, 3, 1973, Washington, DC, USA, **Proceedings...** Washington, DC, USA, p. 309–317, 1973.
- SANO, E. E.; ROSA, R.; BRITO, J. L. S.; FERREIRA, L. G. **Mapeamento de cobertura vegetal do bioma Cerrado**. Planaltina: Embrapa Cerrados, 2008. 60 p. (Boletim de Pesquisa e Desenvolvimento - Embrapa Cerrados, n. 205).

- SANO, E. E.; ROSA, R.; LUÍS, J.; BRITO, S.; FERREIRA, G. Mapeamento semidetalhado do uso da terra do Bioma Cerrado. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 43, n. 1, p. 153–156, 2008.
- SANTOS, J. C. B.; SOUZA JÚNIOR, V. S.; CORRÊA, M. M.; RIBEIRO, M. R.; ALMEIDA, M. DA C.; BORGES, L. E. P. Caracterização de neossolos regolíticos da região semiárida do Estado de Pernambuco. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 36, n. 3, p. 683–696, 2012.
- SANTOS, R. D.; LEMOS, R. C. DE; SANTOS, H. G.; KER, J. C.; ANJOS, L. H. C. **Manual de descrição e coleta de solo no campo**. 6. ed. Viçosa, MG: SBCS / EMBRAPA-CNPQ, 2013. 100 p.
- SATO, M. V. **Primeira aproximação da biblioteca espectral de solos do Brasil: caracterização de espectros de solos e quantificação de atributos**. Dissertação (Mestrado em Ciências) - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2015. 102 p.
- SCHOBENHAUS, C.; CAMPOS, D. A. **Geologia do Brasil**. Brasília, DF: DNPM, 1984. 45 p.
- SCHOWENGERDT, R. A. **Remote Sensing: Models and Methods for Image Processing**. 3. ed. San Francisco, CA: Academic Press, 2007. 560 p.
- SCHULZE, D. G.; NAGEL, J. L.; VAN-SCOYOC, G. E.; HENDERSON, T. L.; BAUMGARDNER, M. F.; STOTT, D. E. Significance of Organic Matter in Determining Soil Colors. In: BIGHAM, J. M.; CIOLKOSZ, E. J. (Org.). **Soil Color**. 31. ed. Madison: SSSA, 1993. p. 71–90.
- SCHWEIK, C. M.; GREEN, G. M. The Use of Spectral Mixture Analysis to Study Human Incentives, Actions, and Environmental Outcomes. **Social Science Computer Review**, v. 17, n. 1, p. 40–63, 1999.
- SCHWERTMANN, J. M. Relations Between Iron Oxides, Soil Color, and Soil Formation. In: CIOLKOSZ, E. J.; BIGHAM, U. (Org.). **Soil Color**. Madison, 1993. p. 51–69.
- SCULL, P.; FRANKLIN, J.; CHADWICK, O. A.; MCARTHUR, D. Predictive soil mapping: a review. **Progress in Physical Geography**, v. 27, n. 2, p. 171–197, 2003.
- SEMARH. SECRETARIA DE ESTADO DE MEIO AMBIENTE E RECURSOS HIDRICOS. **Zoneamento Ecológico-Econômico do Distrito Federal (ZEE-DF) - Subproduto 3.1**. Brasília, DF: SEMARH, 2012. 172 p.
- SHIMABUKURO, Y. E.; DUARTE, V.; MOREIRA, M. A.; ARAI, E.; RUDORFF, B. F. T.; ANDERSON, L. O.; SANTO, F.; FREITAS, R.; AULICINO, L.; MAURANO, L. **Deteção de áreas desflorestadas em tempo real: conceitos básicos, desenvolvimento e aplicação do Projeto DETER**. São José dos Campos, SP: INPE, 2005. 63 p.
- SHIMABUKURO, Y. E.; NOVO, E. M. L. DE M.; PONZONI, F. J. Índice de vegetação e modelo linear de mistura espectral no monitoramento da região do pantanal. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 33, p. 1729–1737, 1998.
- SHIMABUKURO, Y. E.; SMITH, J. A. Fraction images derived from Landsat TM and MSS data for monitoring reforested areas. **Canadian Journal of Remote Sensing**, v. 21, n. 1, p. 67–74, 1995.
- SHIMABUKURO, Y. E.; SMITH, J. A. The least-squares mixing models to generate fraction images derived from remote sensing multispectral data. **Geoscience and Remote Sensing**, v. 29, p. 16–20, 1991.
- SILVA, A. A.; GALON, L.; FERREIRA, F. A.; TIRONI, S. P.; FERREIRA, E. A.; SILVA, A. F. DA; ASPIAZÚ, I.; AGNES, E. L. Sistema de plantio direto na palhada e seu impacto na agricultura brasileira. **Revista Ceres**, v. 56, n. 4, p. 496–506, 2009.

- SONNENTAG, O.; CHEN, J. M.; ROBERTS, D. A.; TALBOT, J.; HALLIGAN, K. Q.; GOVIND, A. Mapping tree and shrub leaf area indices in an ombrotrophic peatland through multiple endmember spectral unmixing. **Remote Sensing of Environment**, v. 109, n. 3, p. 342–360, 2007.
- STONER, E. R.; BAUMGARDNER, M. F.; BIEHL, L. L.; ROBINSON, B. F. **Atlas of Soil Reflectance Properties**. West Lafayette, Indiana, USA: Purdue University, 1980. 89 p. Disponível em: <<http://ntrs.nasa.gov/archive/nasa/casi.ntrs.nasa.gov/19800009266.pdf>>.
- STRECK, N. A.; RUNDQUIST, D.; CONNOT, J. Estimating residual wheat dry matter from remote sensing measurements. **Photogrammetric Engineering and Remote Sensing**, v. 68, n. 11, p. 1193–1201, 2002.
- TEN CATEN, A.; DALMOLIN, R. S. D.; PEDRON, F. A.; SANTOS, E. M. L. M. Componentes principais como preditores no mapeamento digital de classes de solos. **Ciência Rural**, v. 41, n. 7, p. 1170–1176, 2011.
- TEN CATEN, A.; DALMOLIN, R. S. D.; SANTOS, E. M. L. M.; GIASSON, E. Mapeamento digital de classes de solos: características da abordagem brasileira. **Ciência Rural**, v. 42, n. 11, p. 1989–1997, 2012.
- TERRACAP – AGÊNCIA DE DESENVOLVIMENTO DO DISTRITO FEDERAL. **Ortofotos de reconhecimento do Distrito Federal, na escala 1:5.000**. Brasília, DF: TERRACAP, 2013.
- TRENTIN, R.; M. LOHMANN; F. DEPPE; J. GRASSI. Mascaras de cultivo de cana-de-açúcar das safras 2008, 2009 e 2010 no estado do Paraná. In: Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, 15, 2011, Curitiba, PR. **Anais...** Curitiba, PR, p. 607–614, 2011.
- VALLADARES, G. S. Mapeamento Digital de solos dos Tabuleiros Costeiros no Litoral Norte do Ceará. **Revista Equador**, v. 1, n. 1, p. 26–43, 2012.
- VALLADARES, G. S.; PEREIRA, M. G.; ANJOS, L. H. C.; EBELING, A. G. Caracterização de solos brasileiros com elevados teores de material orgânico. **Magistra**, v. 20, n. 1, p. 95–104, 2008.
- VASCONCELOS, C. H.; NOVO, E. M. L. M. Mapeamento do uso e cobertura da terra a partir da segmentação e classificação de imagens-fração solo, sombra e vegetação derivadas do modelo linear de mistura aplicado a dados do sensor TM/Landsat5, na região do reservatório de Tucuruí - PA. **Acta Amazonica**, v. 34, p. 487-493, 2004.
- VERONA, J. D.; SHIMABUKURO, Y. E.; SANTOS, J. R. Detecção de mudanças em área sob influência da Floresta Nacional do Tapajós-PA, utilizando o modelo linear de mistura espectral. In: Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, 10, 2001, Foz do Iguaçu, PR. **Anais...** Foz do Iguaçu, PR, p. 1773–1780. 2001.
- VIEIRA, V. A. S.; MELLO, C. R.; LIMA, J. M. Variabilidade espacial de atributos físicos do solo em uma microbacia hidrográfica. **Ciência e Agrotecnologia**, v. 31, n. 5, p. 1477–1485, 2007.
- WEIDONG, L.; BARET, F.; XINGFA, G.; QINGXI, T.; LANFEN, Z.; BING, Z. Relating soil surface moisture to reflectance. **Remote Sensing of Environment**, v. 81, n. 2-3, p. 238–246, 2002.
- YOSHIOKA, H.; MIURA, T.; DEMATTÊ, J. A. M.; BATCHILY, K.; HUETE, A. R. Soil Line Influences on Two-Band Vegetation Indices and Vegetation Isolines: A Numerical Study. **Remote Sensing**, v. 2, p. 545–561, 2010.
- YOUNG, T. The Bakerian Lecture: On the Theory of Light and Colours. **Philosophical Transactions of the Royal Society of London**, v. 92, n. 0, p. 12–48, 1802.