

**UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA UNESP
CÂMPUS DE JABOTICABAL**

**CARACTERIZAÇÃO DO SOLO DO PLANALTO
OCIDENTAL PAULISTA POR ESPECTROSCOPIA DE
FLUORESCÊNCIA DE RAIOS X**

Milene Moara Reis Costa

Engenheira Agrônoma

2017

**UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA UNESP
CÂMPUS DE JABOTICABAL**

**CARACTERIZAÇÃO DO SOLO DO PLANALTO
OCIDENTAL PAULISTA POR ESPECTROSCOPIA DE
FLUORESCÊNCIA DE RAIOS X**

Milene Moara Reis Costa

Orientador: Prof. Dr. José Marques Júnior

Coorientadora: Dra. Lívia Arantes Camargo

Dissertação apresentada à Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias – UNESP, Câmpus de Jaboticabal, como parte das exigências para a obtenção do título de Mestre em Agronomia (Produção Vegetal).

2017

Costa, Milene Moara Reis.
C837c Caracterização do solo do Planalto Ocidental Paulista por
Espectroscopia de Fluorescência de Raios x / Milene Moara Reis
Costa. -- Jaboticabal, 2017
xiv, 58 p. : il. ; 29 cm

Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual Paulista,
Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias, 2017
Orientador: José Marques Júnior
Coorientadora: Lívia Arantes Camargo
Banca examinadora: Marcílio Vieira Martins, Antônio Carlos
Azevedo
Bibliografia

1. Geomorfologia. 2. Pedogênese. 3. Geoquímica. I. Título. II.
Jaboticabal-Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias.

CDU 631.416

Ficha catalográfica elaborada pela Seção Técnica de Aquisição e Tratamento da Informação –
Diretoria Técnica de Biblioteca e Documentação - UNESP, Câmpus de Jaboticabal.



UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA

Câmpus de Jaboticabal



CERTIFICADO DE APROVAÇÃO

TÍTULO DA DISSERTAÇÃO: CARACTERIZAÇÃO DO SOLO DO PLANALTO OCIDENTAL PAULISTA POR ESPECTROSCOPIA DE FLUORESCÊNCIA DE RAIOS X

AUTORA: MILENE MOARA REIS COSTA

ORIENTADOR: JOSÉ MARQUES JUNIOR

COORIENTADORA: LIVIA ARANTES CAMARGO

Aprovada como parte das exigências para obtenção do Título de Mestra em AGRONOMIA (PRODUÇÃO VEGETAL), pela Comissão Examinadora:

Livia Arantes Camargo
Pós-doutoranda LIVIA ARANTES CAMARGO
Departamento de Ciências Exatas / FCAV / UNESP - Jaboticabal

Antonio Carlos de Azevedo
Prof. Dr. ANTONIO CARLOS DE AZEVEDO
Departamento de Ciências do Solo / ESALQ/USP - Piracicaba/SP

Marcílio Vieira Martins Filho
Prof. Dr. MARCÍLIO VIEIRA MARTINS FILHO
Departamento de Solos e Adubos / FCAV / UNESP - Jaboticabal

Jaboticabal, 27 de julho de 2017

DADOS CURRICULARES DO AUTOR

MILENE MOARA REIS COSTA- Filha de Marlene Antonia Reis Costa e Antonio Cunha da Costa, nasceu em Capanema – PA, no dia 21 de março de 1989. Em março de 2010 ingressou no Curso de Engenharia Agrônômica pela Universidade Federal Rural da Amazônia, Câmpus Belém. Foi bolsista na incubadora tecnológica de Empreendimentos Solidária de 2011 a 2012 pelo programa de pesquisa interno da UFRA e bolsista de Iniciação Científica no período de 2012 a 2014, pelo programa de Inovação Tecnológica do Centro Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq). Em 2015 ingressou no Mestrado em Agronomia (Produção Vegetal), na Universidade Estadual Paulista – Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias – Câmpus de Jaboticabal – SP, desenvolvendo o projeto de pesquisa “Mapeamento Geoquímico Dos Solos Do Planalto Ocidental Paulista”. Atua como membro ativo do Grupo de Pesquisa Caracterização do Solo para fins de Manejo Específico (CSME) da UNESP, Câmpus de Jaboticabal, desde 2015.

*“Plante seu jardim e decore sua alma,
ao invés de esperar que alguém lhe
traga flores. E você aprende que
realmente pode suportar, que
realmente é forte, e que pode ir muito
mais longe depois de pensar que não
se pode mais. E que realmente a vida
tem valor e que você tem valor diante
da vida!”*

— William Shakespeare

DEDICO

Aos meus pais Antônio Cunha e Marlene Reis, a minha irmã Milena Aparecida, que sempre me apoiaram nos meus estudos.

Aos meus avós, Maria Reis e Carlos Reis e José Ferreira e Idalina Cunha (in memoriam). Pela dedicação e apoio em todos os momentos da minha vida. Amos vocês.

OFEREÇO

À Deus e Nossa Senhora de Nazaré, por sempre me conceder sabedoria nas escolhas dos melhores caminhos, coragem para acreditar, força para não desistir e proteção para me amparar.

AGRADECIMENTOS

Primeiro a Deus, Sempre presente na minha vida, por conceder-me a oportunidade de aumentar meus conhecimentos, ter me dado força e motivação para a realização deste trabalho.

Ao meu orientador Professor Dr. José Marques Junior, pelos valiosos ensinamentos e confiança, pelas palavras de incentivo em todas as etapas desse trabalho, tenho orgulho em dizer que um dia fui sua orientada.

A minha co-orientadora Livia Arantes Camargo, pelos ensinamentos e paciência na hora das dúvidas; pelo entusiasmo e pela inestimável colaboração prestada durante toda a condução desse trabalho.

Aos meus pais Antônio e Marlene e minha avó Maria, pelo amor incondicional e pela paciência. Por terem feito o possível e o impossível para me oferecerem a oportunidade de estudar, acreditando e respeitando minhas decisões e nunca deixando que as dificuldades acabassem com os meus sonhos, serei imensamente grata.

Aos meus avós José Ferreira e Idalina e Carlos Reis, que mesmo de longe sempre estiveram presentes ajudando e torcendo por mim.

A minha Irmã Milena e a minha prima Islanna, por terem sentido junto comigo, todas as angústias e felicidades, acompanhando cada passo de perto. Pelo amor, amizade, e apoio depositados.

As amigas, Aline Santos, Maria Pimentel, Suzane Moreira, pela amizade que me ajuda a dividir os problemas e a somar alegrias.

As minhas amigas e companheiras de casa Elizabeth e Daniele, por toda ajuda em nossos períodos de convivência, por sempre estenderem os braços nas horas de dificuldade, por todos os bons momentos, pelas risadas e as longas conversas até amanhecer, melhor convívio, não poderia encontrar.

Aos amigos Gustavo, Camila, Reginaldo, Hugo, Vinicius, Reynaldo, Kamila, Rafael, Maílson, pelas ótimas histórias vividas, pela amizade e por ajudar a tornar a vida acadêmica muito mais divertida.

As minhas amigas Bruna e Renata, pelos momentos divididos juntos. Aos poucos nos tornamos mais que amigas quase irmãs. Obrigada por dividirem comigo as angústias e alegrias e ouvirem minhas bobagens. Como

diz Milton Nascimento “*Amigo é coisa pra se guardar, debaixo de sete chaves, dentro do coração*”. Obrigada pela amizade!

Aos amigos e companheiros de trabalho, Renato Aquino, um irmão que encontrei perdido nessa cidade, Danilo Baldo e Laércio Santos, obrigada pelos incentivos, pelas risadas que amenizavam o stress diário, pelas conversas que muito me ajudaram e pela torcida positiva, pela amizade e companhia, que me ajudou a concluir esta jornada. Muito obrigado!

Aos demais amigos e companheiros de trabalho Diego Silva Siqueira, Nélida Queiroz, Simone Gomes, Romário, Beatriz Coelho, Frederico Siansi, Vinicius Augusto Filla, Adrien Dorvalino Ferroni, Bruno Barbosa Mialichi, Yves Soares Menon, Gustavo Silva de Sousa, Renan Radaeli dos Santos e Gabriel Augusto da Silva Cirilo, Kathleen Lourenço, Angélica Bahia. A ajuda de vocês foi essencial para esse trabalho em todos os momentos, sempre dispostos a ajudar, vocês foram fundamentais nesses dois anos de trabalho, desde os pequenos até os grandes problemas.

A Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias – UNESP, e ao programa de pós-graduação em Agronomia (Produção Vegetal) pela oportunidade.

Ao MCTI/CNPQ- Ministério da Ciência, Tecnologia, Inovações e Comunicações/ Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico- Universal 2016 (Proc. Nº 402796/2016-0) pelo apoio financeiro e concessão da bolsa.

A Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo – FAPESP pelo financiamento da pesquisa.

Aos professores Dr. Glauco de Souza Rolim, Dr. Jairo Osvaldo Cazetta e Dr. Antonio Sergio Ferraudo pela participação e contribuições no exame geral de qualificação, que ofereceram sugestões significativas para a melhoria do presente trabalho.

Aos membros da banca de defesa, professores Dr. Marcílio Vieira Martins e Dr. Antonio Carlos Azevedo, por se disponibilizarem prontamente em contribuir para a melhoria deste Trabalho e para meu crescimento profissional.

Durante esses dois anos só tenho a agradecer a todos que passaram pelo meu caminho, e que com certeza deixaram um pouco de si. Os momentos de alegria serviram para me permitir acreditar na beleza da vida, e os de

sofrimento, serviram para um crescimento pessoal único. É muito difícil transformar sentimentos em palavras, mas serei eternamente grata a vocês, pessoas imprescindíveis para a realização e conclusão deste trabalho.

“Quem tem um amigo, mesmo que um só, não importa onde se encontre, jamais sofrerá de solidão; poderá morrer de saudades, mas não estará só”

Amir Klink

SUMÁRIO

Página

LISTA DE FIGURAS	xiii
LISTA DE TABELAS	xiv
CAPÍTULO 1 – Considerações gerais	15
1.1 INTRODUÇÃO	15
1.2. REVISÃO DE LITERATURA	17
1.2.1 Importância do levantamento de solos	17
1.2.2 Relação Solo-Paisagem	20
1.2.3 Planalto Ocidental Paulista	21
1.2.4. Uso da Espectroscopia de fluorescência de raios X	23
1.3. REFERÊNCIAS	26
CAPÍTULO 2 – Caracterização do solo do planalto ocidental paulista por espectroscopia de fluorescência de raios X	33
2.1 INTRODUÇÃO	34
2.2 MATERIAL E MÉTODOS	37
2.2.1 Localização e caracterização da área de estudo	37
2.2.2 Análise dos compartimentos da paisagem	38
2.2.3 Planejamento amostral	39
2.2.4 Análises laboratoriais	39
2.2.5 Espectroscopia de fluorescência de raios X	40
2.2.6 Análises estatísticas	40
2.3. RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	41
2.3.1 Caracterização dos solos.....	41
2.3.2 Análises de Espectroscopia de Fluorescência de raios X (EFRX) 44	
2.3.3 Análises de componentes principais (ACP)	47
2.4 CONCLUSÕES	53
2.5 REFERÊNCIAS.....	53

CARACTERIZAÇÃO DOS SOLOS DO PLANALTO OCIDENTAL PAULISTA POR ESPECTROSCOPIA DE FLUORESCÊNCIA DE RAIOS X

RESUMO- A agricultura atual necessita de metodologias para determinação de atributos do solo que sejam menos agressivas ao meio ambiente. A espectroscopia de fluorescência de raios X (EFRX) tem sido uma técnica promissora no fornecimento simultâneo de análise quantitativa e elementar da composição do solo. Sobre este aspecto, o presente trabalho foi realizado com o objetivo de caracterizar as classes, geologia e geomorfologia dos solos do Planalto Ocidental Paulista, utilizando EFRX e a técnica multivariada. Foram coletadas 262 amostras de solo na profundidade de 0,0 – 0,2 m, para caracterização química, mineralógica e espectral. As intensidades dos picos dos elementos Si, Al, Fe e Ti dos espectros obtidos pela EFRX relacionaram-se com as classes de solos, formações geológicas e graus de dissecação da paisagem presentes no Planalto Ocidental Paulista. A análise de componentes principais, utilizando os dados obtidos pela EFRX, aliados aos atributos argila, areia, teores de Fe extraídos por ditionito-citrato-bicarbonato de sódio e por oxalato ácido de amônio, permitiu a caracterização das classes de solos, formações geológicas e graus de dissecação da paisagem presentes na região de estudo. A intensidade do pico do Fe apresentou o segundo maior autovetor na caracterização do eixo da componente principal 1, e as intensidade dos picos do Ti e Si apresentaram, respectivamente, o quarto e o quinto maiores autovetores neste eixo.

Palavras-chave- geomorfologia, pedogênese, geoquímica.

CHARACTERIZATION OF THE SOILS OF WESTERN PAULISTA PLANTEAU BY X-RAY FLUORESCENCE SPECTROSCOPY

ABSTRACT- Current agriculture needs methodologies to determine soil attributes that are less aggressive to the environment. X-ray fluorescence spectroscopy (EFRX) has been a promising technique in providing simultaneous quantitative and elemental analysis of soil composition. The objective of this work was to characterize the classes, geology and geomorphology of the soils of the Western Plateau, using EFRX and the multivariate technique. A total of 262 soil samples were collected at 0.0 - 0.2 m depth for chemical, mineralogical and spectral characterization. The intensities of the peaks of the Si, Al, Fe and Ti elements of the spectra obtained by the EFRX were related to the classes of soils, geological formations and degrees of dissection of the landscape present in the Western Plateau. The main components analysis, using the data obtained by EFRX, allied to the attributes clay, sand, Fe content extracted by dithionite-citrate-bicarbonate sodium and ammonium oxalate, allowed the characterization of the soil classes, geological formations and degrees of dissection of the landscape present in the study region. The intensity of the peak of Fe presented the second largest eigenvector in the characterization of the axis of the main component 1, and the intensity of the peaks of Ti and Si presented, respectively, the fourth and fifth largest eigenvectors on this axis

Key words- geomorphology, pedogenesis, geochemistry.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 (Capítulo 2) – Mapa geológico atualizado do Planalto Ocidental Paulista (escala semidetalhada 1:200.000). Fonte: Fernandes et al. (2007).

Figura 2 (Capítulo 2) – Mapa pedológico do Planalto Ocidental Paulista (Escala: 1:300.000). FONTE: Instituto Agrônômico de Campinas.

Figura 3 (Capítulo 2) – Proposta de unidades de dissecação da paisagem para o Planalto Ocidental Paulista. (Extraído de: Silva (2016).

Figura 4 (Capítulo 2) – Espectros de EFRX dos solos desenvolvidos de Basalto, em diferentes níveis de dissecação da paisagem.

Figura 5 (Capítulo 2) – Espectros de EFRX dos solos desenvolvidos de arenito, em diferentes níveis de dissecação da paisagem.

Figura 6 (Capítulo 2) – Espectros de EFRX referentes às classes de solo do Planalto Ocidental Paulista.

Figura 7 (Capítulo 2) – 5 O Gráfico biplot mostra a distribuição das classes de solo e das variáveis argila, areia, Fed, Feo, Int_Ti, Int_Fe, Int_Al, Int_Si, nos dois primeiros componentes principais. LVf= Latossolo Vermelho férrico, LVA= Latossolo Vermelho-Amarelo, LVma= Latossolo-Vermelho textura media a arenosa, PVA= Argissolo Vermelho-Amarelo.

Figura 8 (Capítulo 2) – 6 O Gráfico biplot mostra a distribuição da geologia e das variáveis argila, areia, Fed, Feo, Int_Ti, Int_Fe, Int_Al, Int_Si, nos dois primeiros componentes principais.

Figura 9 (Capítulo 2). 7 O Gráfico biplot mostra a distribuição dos graus de dissecação e das variáveis argila, areia, Fed, Feo, Int_Ti, Int_Fe, Int_Al, Int_Si, nos dois primeiros componentes principais.

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 (Capítulo 2) – Estatística descritiva das classes solos LVf= Latossolo-Vermelho férrico, LVA= Latossolo Vermelho-Amarelo, LVma= Latossolo-Vermelho textura media a arenosa, PVA= Argissolo Vermelho-Amarelo do Planalto Ocidental Paulista.

Tabela 2 (Capítulo 2) – Estatística descritiva dos compartimentos geológicos, do solo do Planalto Ocidental Paulista.

Tabela 3 (Capítulo 2) – Estatística descritiva dos graus de dissecação da paisagem, do solo do Planalto Ocidental Paulista.

Tabela 4 (Capítulo 2) – Correlação dos componentes principais (CP).

CAPÍTULO 1 – Considerações gerais

1.1 INTRODUÇÃO

O solo é a interface pela qual as quatro grandes esferas ecológicas: atmosfera, biosfera, litosfera e hidrosfera, fornecem nutrientes para as plantas, fibras e energia, além de regular as emissões de gases do efeito estufa, sendo importante seu gerenciamento de forma sustentável (MCBRATNEY et al., 2014; AMUNDSON et al., 2015; ARROUAYS et al., 2017). São cada vez mais importantes o planejamento e o gerenciamento dos recursos do solo, bem como a necessidade de gerar informações detalhadas para exercer melhor gestão de seu uso e ocupação de forma sustentável (GREALISH et al., 2015).

O melhor uso e manejo dos solos está diretamente relacionada à disponibilidade de informações acerca das interações dos atributos dos solos, Países como a China e a Austrália utilizam o mapeamento detalhado de atributos do solo como ferramenta para planejamento de práticas de conservação do solo e da água, agrícola, e urbana (LIU et al., 2013; PADARIAN et al., 2015, VISCARRA-ROSSEL; CHEN, 2011; VISCARRA-ROSSEL; WEBSTER, 2012). No Brasil, estudos semelhantes ainda são escassos para serem utilizados no planejamento regional e estadual do uso e da ocupação do solo (SIQUEIRA et al., 2014; PADARIAN; MINASNY; MCBRATNEY, 2015).

O Planalto Ocidental Paulista (POP) possui grande importância socioeconômica para o Estado de São Paulo. É uma das principais áreas de cultivo de citros do País, responsável por aproximadamente 80% da produção nacional, além de participar em grande parte da produção de álcool e açúcar. O compartimento geológico mais expressivo é o Arenito do Grupo Bauru, com diferentes feições do relevo, intensidade e duração dos processos pedológicos e as características do material de origem determinando o tipo e a distribuição do solo nas paisagens, seguindo uma lógica relacionada aos processos geomorfoгенéticos e pedogenéticos.

O mapeamento de áreas utilizando dados da variabilidade espacial dos minerais da fração argila permite obter informações mais detalhadas dos solos e de seus atributos físicos e químicos, com vantagem de economizar tempo e reduzir erros. Diante disso precisamos investi em técnicas que sejam menos

agressivas ao meio ambiente, menos onerosas para auxiliar na determinação de atributos do solo e que auxiliem no mapeamento da variabilidade destes com maiores níveis de detalhe.

A Espectrometria de Fluorescência de Raios-X (EFRX) fornece, simultaneamente, uma análise quantitativa e a composição multielementar das amostras. E vem sendo aplicada para a análise direta e simultânea da biodisponibilidade de macronutrientes do solo e níveis-traços, na caracterização de solos. O método é rápido, envolve pouca preparação de amostras e é altamente sensível na determinação de elementos químicos; assim, tem potencial para garantia de qualidade da caracterização de ambientes. Vários trabalhos demonstram a potencialidade da técnica de EFRX na viabilização dos mapeamentos de áreas específicas de manejo e de levantamentos de solo detalhados, pois auxilia a determinação de atributos diagnósticos.

Estudos com EFRX vêm sendo utilizados para fins de mapeamento, que utiliza um elevado número de amostras, aliados a estatísticas multivariadas em diferentes estudos com objetivos de determinação de parâmetros de qualidade e de classificação de solos. A EFRX é uma metodologia analítica promissora e pode ser utilizada para inferir informações sobre geoquímica, agricultura de precisão, degradação do solo e avaliação ambiental (KANIU et al., 2012; FIGUEROA-CISTERNA et al., 2011; THOMAZ; MELQUIADES, 2009).

A EFRX é uma ferramenta de análise indireta dos atributos do solo e vem de encontro com as necessidades do desenvolvimento de técnicas alternativas de análises de atributos do solo de menor impacto ambiental, menor custo e maior eficiência. Com isso o presente trabalho foi realizado com o objetivo de caracterizar as classes, a geologia e a geomorfologia dos solos do Planalto Ocidental Paulista, utilizando EFRX e a análise multivariada.

1.2. REVISÃO DE LITERATURA

1.2.1 Importância do levantamento de solos

A FAO (Organização das Nações Unidas para Alimentação e Agricultura) estima que a população mundial deverá aumentar de seis para nove bilhões de habitantes em 2050. Devido a isso, a produção de alimentos deve aumentar em mais de 60% a fim de alimentar a população até 2050 (FAO, 2013). Torna-se importante a adoção de tecnologias que promovam o desenvolvimento agrícola de forma sustentável e a redução do desperdício de alimento. Devido a isso, diversos estudos defendem que o solo se tornou uma prioridade das políticas ambientais globais (MCBRATNEY et al., 2014; AMUNDSON et al., 2015; ARROUAYS et al., 2017). O melhor planejamento e gerenciamento dos recursos do solo estão relacionados à necessidade de gerar informações detalhadas dos nossos solos, para garantir um crescimento de forma sustentável (GREALISH et al., 2015).

O Brasil é considerado o segundo maior produtor mundial de alimentos, possui áreas com potencial agrícola, porém precisa avançar na adoção de práticas sustentáveis associadas à inovação tecnológica no setor agrícola, como, por exemplo, o emprego de tecnologias que aumentem a produtividade. A necessidade de tecnologias referentes ao melhor potencial de uso e de manejo dos solos está diretamente relacionada à disponibilidade de informações sobre o solo. Os mapas representativos, hoje usados, são pouco detalhados e dificultam a disponibilidade de informação sobre o solo.

O mapeamento detalhado de atributos do solo vem sendo utilizado em Países como a China e a Austrália, visando reduzir a degradação do solo e, ao mesmo tempo, servir na tomada de decisões e no levantamento de informações básicas no planejamento do solo (LIU et al., 2013; VISCARRA-ROSSEL; CHEN, 2011; VISCARRA-ROSSEL; WEBSTER, 2012). No Brasil, estudos semelhantes ainda são escassos (SIQUEIRA et al., 2014). O levantamento de solos é importante, pois fornece informações que auxiliam na tomada de decisões nas áreas agrícolas (LEPSH, 2011).

. O projeto RADAMBRASIL, de 1986, mapeou todo o território brasileiro na escala de 1:1.000.000. Estes mapas são apresentados em escala pequena, não sendo recomendados para o planejamento de uso da terra (DALMOLIN et

al., 2004). Pequenas áreas brasileiras apresentam levantamentos maiores que as escalas de 1:50.000, e essa carência deve-se ao custo elevado para esse tipo de levantamento (MENDONÇA-SANTOS; SANTOS, 2003).

As informações sobre os solos tornaram-se uma demanda importante para geração de conhecimentos que auxiliem o planejamento correto de uso das terras. O Brasil possui apenas 75,6 % de seu território mapeado em nível exploratório, reunindo informações generalizadas dos recursos do solo em grandes áreas. Dessas informações, 17,1% estão contidas em mapas em nível de reconhecimento e apenas 0,25 % em nível detalhado, que reúne observações de campo ao longo de topossequências e correlação do solo e da superfície geomórfica (MENDONÇA-SANTOS; SANTOS, 2006). Esses levantamentos não contêm um nível de detalhe que corresponda às questões atuais, prejudicando a pesquisa, o manejo adequado e o uso racional do solo. Para suprir os métodos convencionais de mapeamento, métodos alternativos vêm sendo utilizados com o propósito de aumentar a disponibilidade de dados que ainda são escassos (MCBRATNEY et al., 2003).

Este levantamento de solos pode ser combinado com várias técnicas e métodos disponíveis, como softwares e hardwares (CATEN et al., 2012). Os métodos separam as unidades de mapeamento, gerando mapas e relatórios pedológicos que representam uma distribuição espacial e os limites dos solos (EMBRAPA, 1995). Conforme o objetivo e o grau de detalhe, os tipos de levantamentos são categorizados em: exploratório, de baixa, média e alta intensidade; semidetalhado, detalhado e ultra detalhado.

Para a execução do mapeamento, é necessário que as informações sobre os solos se baseiem em um sistema de classificação. A classificação contribui para organizar as informações de um determinado solo, facilitando o acesso às suas inúmeras informações. A classificação agrupa os solos em classes, conforme suas semelhanças ou separando-os de acordo com suas diferenças. A classificação leva em consideração as propriedades mineralógicas, morfológicas, físicas e químicas, pois são importantes para o uso correto da terra (HOFIG, 2014). Essa identificação das classes de solo tornou-se útil na transferência de conhecimento (RESENDE et al., 2012).

A classificação seguida pela FAO (Food and Agricultural Organization) para criar a carta mundial de solos é a “Soil Taxonomy” (Taxonomia dos Solos)

versão 1999 (USDA, 1999). Essa classificação diferencia doze ordens de solos, subdividindo-os em subordens, grandes grupos, grupos, famílias e séries. No Brasil, a EMBRAPA (Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária), com o serviço pedológico, realizou levantamentos ordenados no País. Após esses levantamentos, a EMBRAPA, em 1999, concretiza o Sistema Brasileiro de Classificação de Solos (SiBCS) (EMBRAPA, 1999), posteriormente atualizado em 2013 (EMBRAPA, 2013). O projeto foi fruto do envolvimento da comunidade científica da Ciência do Solo, que definiu a classificação dos tipos de solos em seis níveis categóricos diferentes: Ordem, Subordem, Grande Grupo, Subgrupo, Família e Série, correspondendo cada nível a um grau de detalhamento, em ordem crescente (COELHO, 2010).

A ligação da classificação de solos e o mapeamento são estabelecidos no momento em que os solos quando semelhantes no que se refere às propriedades, são reunidos em classes. Quando houver uma combinação das classes de solos, é formada a base para a composição das unidades de mapeamento. Contudo, a unidade de mapeamento é o agrupamento destas classes, que possibilitam uma representação cartográfica, mostrando a distribuição espacial e os limites dos solos (IBGE, 2007). Através do mapeamento de áreas, podem-se obter informações mais detalhadas dos solos a partir de seus atributos físicos e químicos, com a vantagem de economizar tempo e de reduzir erros. Desta forma, atingem-se maiores níveis de detalhamento do solo quando comparado às caracterizações encontradas em mapeamentos e em levantamentos de pesquisas convencionais.

A limitação do mapeamento de solos concerne substancialmente à abertura de perfis, pois é trabalhosa, demorada e cara. Um problema que muitos pesquisadores vêm enfrentando é conseguir mapear classes de solos em nível mais detalhado e com menos trabalho de campo, para diminuir custos e ganhar tempo. As análises de laboratório são demoradas, demandam tempo para a obtenção dos resultados. Há a necessidade de se obter resultados rápidos e confiáveis, utilizando metodologias simples e de baixo custo, capazes de minimizar ou de eliminar os resíduos tóxicos gerados durante as análises (SHEPHERD; WALSH, 2002; VISCARRA-ROSSEL; MCBRATNEY, 1998; BROWN et al., 2006). A utilização de métodos indiretos de mapeamento da variabilidade dos atributos do solo pode ser utilizada como

importante ferramenta para o planejamento sustentável das práticas agrícolas (FROGBROOK; OLIVER, 2007), uma vez que os métodos atuais empregados são onerosos, requerem grande número de observações de campo, e os resultados são processados com maior morosidade.

1.2.2 Relação Solo-Paisagem

Para auxiliar o mapeamento detalhado junto com um melhor conhecimento dos atributos do solo, a integração dos estudos pedológicos e as junções dos conhecimentos relacionados com a geomorfologia podem auxiliar no delineamento de unidades de mapeamento de solos, permitindo melhorar o conhecimento das características e a distribuição espacial dos tipos de solo (GERRARD, 1992).

O mapeamento de grandes áreas é dificultoso devido á grande variabilidade do solo e de seus atributos, quais sejam: físicos, químicos, biológicos, mineralógicos e geológicos. O estudo da evolução da paisagem (geomorfologia), ou seja, as diferentes posições do relevo, interfere na formação do solo, determina o tipo e a distribuição do solo na paisagem, determinando suas características como: textura, drenagem e a formação dos horizontes, e os atributos físicos, químicos e mineralógicos. O relevo é um dos responsáveis pelos processos erosivos, pelo escoamento superficial e interfere na temperatura do solo que atua diretamente nos processos de intemperismo dos minerais (WYSOCKI et al., 2005).

A geomorfologia é o estudo das formas de relevo (pedoformas lineares, côncavas e convexas) e da intensidade de dissecação (SILVA, 2016). A dissecação é a forma como a paisagem está modelando a variabilidade dos atributos do solo e está diretamente relacionada com a relação solo-paisagem, que é o balanço pedogenético (taxa de formação do solo) e a geomorfogênese (taxa de evolução da paisagem). A taxa de geomorfogênese está relacionada com o processo de dissecação da paisagem. Quanto maior for à proporção de formas côncavas de alta intensidade, maior será a dissecação, portanto, maior a geomorfogênese (VASCONCELOS et al., 2013)..

Por outro lado, os relevos com predominância de áreas convexas seriam os mais estáveis e com predomínio de pedogênese sobre a geomorfogênese. Para confirmar esta hipótese, é preciso realizar análise de fragmentação do

relevo, mapeando o equilíbrio da distribuição das formas côncavas e convexas em diferentes compartimentos, com controle litoestrutural, e considerando três cenários: (i) pedogênese superior à geomorfogênese; (ii) geomorfogênese superior à pedogênese, e (iii) equilíbrio entre pedogênese e geomorfogênese.

Campos et al. (2007), estudando a relação solo-paisagem em uma litossequência de transição arenito-basalto, concluíram que o estudo dos compartimentos da paisagem é importante para compreender a variação dos atributos do solo, para subsidiar levantamentos pedológicos e para estabelecer limites e a ocorrência de classes de solo, o que, por sua vez, está intimamente relacionado à sua posição na paisagem. As classes de solos estão associadas principalmente às formas do relevo, sendo este o principal fator para maiores variabilidades de atributos em ambientes convexos, de que em ambientes lineares (SILVA Jr et al., 2012). O estudo da relação solo-paisagem é importante na acurácia do mapeamento e da classificação do solo, necessária para os levantamentos de solo, principalmente no reconhecimento das séries de solo (PARSONS; HERRIMAN, 1976) e na delimitação de unidade de mapeamento (LEPSCH et al., 1977).

Para atender à demanda por informações detalhadas de áreas com representatividade regional e estadual, e para promover o avanço científico e tecnológico, torna-se importante o estudo da geomorfologia para a compreensão dos processos que atuaram e continuam modificando a paisagem (SILVA et al., 2016) e sua aplicação em estudo de funções de pedotransferência (PACHEPSKY; RAWLS, 1999; OLIVEIRA et al., 2002).

1.2.3 Planalto Ocidental Paulista

O Planalto Ocidental Paulista (POP) possui grande importância socioeconômica para o Estado de São Paulo, destacando-se na produção de álcool e açúcar, e no cultivo de citros, sendo responsável por aproximadamente 80% da produção nacional dessas culturas. Dos 13 milhões de hectares do Planalto Ocidental Paulista, aproximadamente 2 milhões de hectares são ocupados por basaltos (15,5%), 7,4 milhões de hectares pela Formação Vale do Rio do Peixe (57,1%) e 3,6 milhões de hectares pelas outras formações sedimentares (27,5%). Essas formações estão assentadas, essencialmente sobre rochas areníticas e, em menores proporções sobre rochas basálticas,

provenientes dos eventos do Cretáceo Superior (FERNANDES; COIMBRA, 2000).

O compartimento geológico mais expressivo é o Arenito do Grupo Bauru e, secundariamente, os Basaltos da Formação Serra Geral, ocorrendo nos fundos de alguns vales dos principais rios, em ocorrências descontínuas. Os solos oriundos dos arenitos são principalmente de dois tipos: os Latossolos Vermelhos de textura arenosa e os Argissolos Vermelho-Amarelos de textura arenosa / média, em relevos suave-ondulados a ondulados.

Os solos derivados dos basaltos, com ocorrência mais restrita aos fundos dos vales, são Latossolos Vermelhos de textura argilosa (Latosolos Roxos) e Nitossolos Vermelhos (Terras-Roxas Estruturadas) (OLIVEIRA, 1999). Independentemente do substrato geológico, esses solos estão situados em unidades de dissecação pouco, intermediariamente e altamente dissecadas da paisagem, isto é, são coordenados pelas características geomorfométricas, por elas condicionarem a distribuição ou o carreamento de água na paisagem.

Os solos do POP são altamente intemperizados, tal que na fração argila desses solos predominam argilominerais 1:1 (caulinita) e óxidos e hidróxidos de ferro e alumínio, como a gibbsita (CAMARGO et al., 2008). Esses minerais são responsáveis pela dinâmica química e física do solo. Contudo, a falta de caracterização desses minerais impossibilita o manejo mais específico do solo, haja vista que são covariativos com a paisagem. Segundo Coelho e Vidal-Torrado (2003), caulinita, hematita, goethita e gibbsita são os principais constituintes da fração argila dos Argissolos e Latossolos, classes de maior ocorrência nos solos brasileiros. A ocorrência desses minerais está relacionada com o material de origem e características topográficas do terreno.

Na grande extensão territorial do POP, na diversidade geomorfológica, nas classes de solos e na escassez de informações detalhadas que inviabilizam melhor o aproveitamento dos recursos do solo, torna-se necessário o uso de metodologias para a determinação de atributos do solo as quais sejam menos agressivas ao meio ambiente, menos onerosas e que auxiliem no mapeamento da variabilidade destes atributos com maiores níveis de detalhe (MARQUES Jr et al., 2009).

Através do mapeamento de áreas, utilizando dados da variabilidade espacial dos minerais da fração argila, podem-se obter informações mais

detalhadas dos solos e de seus atributos físicos e químicos, com a vantagem de economizar tempo e de reduzir erros, atingindo desta forma maiores níveis de detalhamento do solo quando comparado às caracterizações encontradas em mapeamento e em levantamento de pesquisas convencionais.

O desenvolvimento desses métodos indiretos pode ser utilizado como importante ferramenta para o planejamento sustentável das práticas agrícolas (FROGBROOK; OLIVER, 2007).

1.2.4. Uso da Espectroscopia de Fluorescência de Raios X (EFRX)

A EFRX vem sendo amplamente utilizada em ciência ambiental, mineração, química, metalurgia, arqueologia e na ciência do solo. É empregada nas análises de elementos em rochas, cimentos, dentre outros (MORI et al., 1999), com a EFRX é possível determinar o teor de elementos em uma amostra, utilizando as intensidades de raios-x característicos emitidos, possibilitando a detecção simultânea de elementos em uma ampla faixa de número atômico e teores, e quantificar suas concentrações (KANIU et al., 2012).

As análises convencionais que determinam os teores totais dos elementos no solo são determinadas por meio da digestão ácida e, em seguida, por técnicas espectroscópicas (RAYMENT; LYONS, 2011). Estes métodos, além de serem trabalhosos, são sujeitos a imprecisões devido à possibilidade de contaminação a partir dos reagentes químicos utilizados. Além disso, a digestão, muitas vezes, envolve aquecimento, que pode levar à perda de analitos voláteis. As vantagens da EFRX em relação às outras técnicas estão em ela ser multielementar, pela facilidade de uso, pela mínima preparação de amostras, pela ampla faixa dinâmica de análise quantitativa, pela velocidade e precisão, e pelo custo relativamente baixo (WEINDORF et al, 2012a;. SHACKLEY, 2012;. OGBURN et al, 2012;. PARSONS et al, 2012). Estudos de técnicas analíticas inovadoras são necessários para a análise dos elementos do solo.

Weindorf et al. (2012), em estudo na avaliação da qualidade ambiental em áreas agrícolas de Luisiana-EUA, concluíram que a EFRX era uma ferramenta eficaz para ser utilizada em locais contaminados com metais pesados, principalmente Pb, Cu e Zn. Diversos estudos estão sendo feitos

utilizando a FRX para determinar oligoelementos, principalmente em solos contaminados (PEINADO et al., 2010; KALNICKY; SINGHVI, 2001).

Vários trabalhos têm empregado o EFRX na caracterização química do solo, para fins de determinação de metais pesados, qualidade ambiental e mapeamento (FIGUEROA-CISTERNA et al., 2011), a exemplo de Chou et al. (2010), que usaram a EFRX para mapear Pb e As em solos de Nova Orleans (EUA).

Já Figueroa-Cisterna et al. (2011) utilizaram uma combinação de EFRX e estatística multivariada para validar amostras de rocha macroscópicas em área de mineração. Os elementos analisados foram Ca, Cu, Fe, K, Mn, Pb, Rb, Sr, Ti, e Zn. Os resultados estatísticos indicaram que o uso de EFRX pode ser aplicado diretamente no campo, sem pré-tratamento das amostras de rocha.

Hürkamp et al. (2009) estudaram as distribuições elementares bidimensionais e tridimensionais em solos e sedimentos, e sua relação com os processos geomorfológicos e a evolução da paisagem. Eles usaram EFRX para estudar a contaminação por metais pesados dos solos aluviais (um ambiente de várzea), em uma área de mineração na Alemanha. Seus resultados mostraram que a distribuição bidimensional de Pb no solo (0-20 cm) depende da geomorfologia da área de estudo. Concluíram que a EFRX pode ser utilizada para investigar a contaminação por metais em solos, permitindo a amostragem detalhada, que pode fornecer informações importantes sobre os controles geomorfológicos e sobre a contaminação de metais nos ambientes.

Por sua vez, Zhu et al. (2011) avaliaram a viabilidade de prever argila e areia a partir de dados EFRX, utilizando 584 amostras de solo de Louisiana-EUA. Um EFRX foi utilizado em amostras de solo em condições de campo e de laboratório. Quinze elementos (K, Ca, Ti, Cr, Mn, Fe, Co, Cu, Zn, As, Rb, Sr, Zr, Ba e Pb) foram quantificados, e suas concentrações foram relacionadas com dados de textura, usando regressão linear múltipla. Os resultados indicaram que Fe e Rb mostraram um significado particular para a previsão textural do solo.

Weindorf et al. (2012) utilizando EFRX para identificação dos horizontes do solo com base nas diferenças dos elementos identificados pela EFRX auxiliando a acurácia dos mapeamentos de solo. A identificação de horizontes é comumente realizada morfologicamente se tornando difícil em solos com

horizontes diagnósticos não completamente desenvolvidos ou com baixa variabilidade morfológica. Isto pode acarretar um equívoco na identificação destes solos e conseqüentemente até mesmo a classificação em classes diferentes trazendo dificuldades mapeamentos de solo. Concluíram que EFRX a é uma ferramenta poderosa para ajudar pedólogos decidir onde colocar limites do horizonte.

Beadette et al. (2009) destacaram o uso da presente técnica para desenvolver um inventário geoquímico do solo em escala de bacia. A EFRX, utilizada na versão portátil, tornou-se uma ferramenta rápida para levantamentos geoquímicos do solo *in loco*. A textura do solo também foi avaliada pela EFRX. Concentrações elementares obtidas por esta técnica foram relacionadas com a textura obtida pela análise tradicional de laboratório.

Estes trabalhos demonstram a potencialidade da técnica de EFRX na viabilização dos mapeamentos de áreas específicas de manejo e levantamentos de solo detalhados, pois auxiliam na determinação de atributos diagnósticos, como, por exemplo, a textura, e na otimização na delimitação das unidades mapeadas. Aliada a este aspecto, esta técnica viabiliza o uso da geoestatística para fins de mapeamento, que utiliza um elevado número de amostras uma vez que a EFRX é rápida e não destrutiva (KANIU et al., 2012).

1.3. REFERÊNCIAS

AMUNDSON, R.; BERHE, A. A.; HOPMANS, J. W.; OLSON, C.; SZTEIN, A. E.; SPARKS, D. L. Soil and human security in the 21st century. **Science**, v. 348, n. 6235, p. 1261071, 2015. Disponível em: < DOI: 10.1126/science.1261071.

ARROUAYS, D.; LEENAARS, J. G. B.; RICHER-DE-FORGES, A. C.; ADHIKARI, K.; BALLABIO, C.; GREVE, M.; GRUNDY, M.; GUERRERO, E.; HEMPEL, J.; HENGL, T. Soil legacy data rescue via GlobalSoilMap and other international and national initiatives. **GeoResJ**, v. 14, p. 1-19, 2017. Disponível em: < <https://doi.org/10.1016/j.grj.2017.06.001>.

BAHIA, A. S. R. S.; MARQUES JÚNIOR, J.; PANOSSO, A. R.; CAMARGO, L. A.; SIQUEIRA, D. S.; LA SCALA JÚNIOR, N. Iron oxides as proxies for characterizing anisotropy in soil CO₂ emission in sugarcane areas under green harvest. **Agriculture, Ecosystems & Environment**, Amsterdam, v. 192, p. 152–162, 2014. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.agee.2014.04.017>

BELOZEROVA, O.Y. Investigation of soil mineral component in the Baikal Region by X-ray electron probe microanalysis. **Spectrochimica Acta Part B: Atomic Spectroscopy**. v. 64, n. 11-12, 1248–1252, 2009. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.sab.2009.09.009>.

CAMARGO, L. A.; MARQUES JR, J.; PEREIRA, G. T.; HORVAT, R. A. Variabilidade espacial de atributos mineralógicos de um Latossolo sob diferentes formas de relevo I - Mineralogia da fração argila. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 32, p. 2269-2277, 2008. Disponível em: < <http://dx.doi.org/10.1590/S0100-06832008000600006>.

CAMPOS, M. C. C.; MARQUES JÚNIOR, J.; PEREIRA, G. T.; MONTANARI, R.; CAMARGO, L. A. Relações solo-paisagem em uma litossequência arenito-basalto na região de Pereira Barreto, SP. **Revista Brasileira Ciência do Solo**, Viçosa, v. 31, n. 3, p. 519–529, 2007.

COELHO, F. F. **Comparação de métodos de mapeamento digital de solos através de variáveis geomorfométricas e sistemas de informações geográficas**. 2010. 95 f. Dissertação (Mestrado em Ciência do Solo) - Faculdade de Agronomia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2010.

COELHO, F. F.; GIASSON, E. Comparison of methods for digital soil mapping using a geographical information system. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 40, n. 10, p. 497-507, 2010. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1590/S0103-84782010005000156>.

CUNHA, P.; MARQUES JÚNIOR, J.; CURI, N.; PEREIRA, G. T.; LEPSCH, I. F. Superfícies geomórficas e atributos de Latossolos em uma topossequência

arenítico-basáltica da região de Jaboticabal (SP). **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 29, p. 81-90, 2005. Disponível em: < <http://dx.doi.org/10.1590/S0100-06832005000100009>.

DALMOLIN, R. S. D.; KLAMT, E.; PEDRON, F. A.; AZEVEDO, A. C. Relação entre as características e o uso das informações de levantamentos de solos de diferentes escalas. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 34, n. 5, 2004. Disponível em: < <http://dx.doi.org/10.1590/S0103-84782004000500023>.

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

EMBRAPA. Centro Nacional de Pesquisa de Solos. **Procedimentos normativos para levantamentos pedológicos**. Brasília: EMBRAPA-SPI, 1995. 101 p.

EMBRAPA. **Manual de métodos de análise de solo**. 2. ed. Rio de Janeiro, Ministério da Agricultura, 1997. 212 p.

EMBRAPA. **Sistema Brasileiro de Classificação de Solos**. Brasília: Embrapa, 1999. 353 p.

FERNANDES L. A.; COIMBRA A. M. Revisão estratigráfica da parte oriental da Bacia Bauru (Neocretáceo). **Revista Brasileira de Geociências**, São Paulo, v. 30, n. 4, p. 717-728, 2000.

FERNANDES, L. A.; COIMBRA, A. M. Revisão estratigráfica da parte oriental da Bacia Bauru (Neocretáceo). **Revista brasileira de Geociências**, v. 30, n. 4, p. 717-728, 2017.

FIGUEROA-CISTERNA, J.; BAGUR-GONZÁLEZ, M. G.; MORALES-RUANO, S.; CARRILO-ROSÚA, J.; MARTÍN-PEINADO, F. The use of a combined portable X ray fluorescence and multivariate statistical methods to assess a validated macroscopic rock samples classification in an ore exploration survey. **Talanta**, v. 85, n. 5, p. 2307-2315, 2011.

FROGBROOK, Z.L., OLIVER, M.A. Identifying management zones in agricultural fields using spatially constrained classification of soil and ancillary data. **Soil Use And Management**, v. 23, p. 40-51, 2007.

GERRARD, A. John. **Soil geomorphology**. Springer Science & Business Media, 1992.

GREALISH, G. J.; FITZPATRICK, R. W.; HUTSON, J. L. Soil survey data rescued by means of user friendly soil identification keys and toposequence

models to deliver soil information for improved land management. **GeoResJ**, v. 6, p. 81-91, 2015. Disponível em: < <https://doi.org/10.1016/j.grj.2015.02.006>.

HAIR, J. F.; ANDERSON, R. E.; TATHAM, L.; BLACK, W. C. **Multivariate Data Analysis**. 5 ed. New Jersey: Prentice Hall, 1998. 730p.

HÖFIG, P.; GIASSON, E.; VENDRAME, P. R. S. Digital soil mapping based on map extrapolation between physiographically similar areas. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 49, n. 12, p. 958-966, 2014. Disponível em: < <http://dx.doi.org/10.1590/S0100-204X2014001200006>.

HÜRKAMP, K., RAAB, T., VÖLKEL, J. Two and three-dimensional quantification of lead contamination in alluvial soils of a historic mining area using field portable X-ray fluorescence (FPXRF) analysis. **Geomorphology**, v. 110, n. 1-2, p. 28–36, 2009.

IBGE. **Manual técnico de Pedologia**. Rio de Janeiro: IBGE, 2007

KALNICKY, D. J., SINGHVI, R. Field portable XRF analysis of environmental samples. **Journal of Hazardous Materials**. v. 83, n. 1-2, p. 93–122, 2001. Disponível em: < [https://doi.org/10.1016/S0304-3894\(00\)00330-7](https://doi.org/10.1016/S0304-3894(00)00330-7).

KALNICKY, D.J.; SINGHVI, R. Field portable XRF analysis of environmental samples. **Journal of Hazardous Materials**. v. 83, n. 1-2, p. 93–122, 2001. Disponível em:< [https://doi.org/10.1016/S0304-3894\(00\)00330-7](https://doi.org/10.1016/S0304-3894(00)00330-7).

KANIU, M. I.; ANGEYO, K. H.; MWALA, A. K.; MANGALA, M. J. Direct rapid analysis of trace bioavailable soil macronutrients by chemometrics-assisted energy dispersive X-ray fluorescence and scattering spectrometry. **Analytica Chimica Acta**, v. 729, p. 21-25, 2012. Disponível em: < <http://dx.doi.org/10.1016/j.aca.2012.04.007>.

LEPSCH, I. F. **19 lições de Pedologia**. São Paulo: Oficina de Textos, 2011.

LIU, Y.; LV, J.; ZHANG, B.; BI, J. Science of the Total Environment Spatial multiscale variability of soil nutrients in relation to environmental factors in a typical agricultural region, Eastern China. **Science of the Total Environment**, v. 450–451, p. 108–119, 2013.

MALHOTRA, N. K. **Pesquisa de marketing: uma orientação aplicada**. 3 ed. Porto Alegre: Bookman, 2001. 720p.

MARQUES Jr, J. **Caracterização de áreas de manejo específico no contexto das relações solo-relevo**. 2009. 113f. Tese (Livre-Docência) – Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias, Universidade Estadual Paulista, Jaboticabal, 2009.

MARQUES Jr, J. **Distribuição e atributos dos solos em relação à forma e evolução de uma vertente em Monte Alto, SP.** Tese (Doutorado em Agronomia). Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Piracicaba, 1995. 226p.

MARQUES Jr, J.; SIQUEIRA, D. S.; CAMARGO, L. A.; TEIXEIRA, D. D. B.; BARRÓN, V.; TORRENT, J. Magnetic susceptibility and diffuse reflectance spectroscopy to characterize the spatial variability of soil properties in a Brazilian Haplustalf. **Geoderma**, Amsterdam, v. 219–220, p. 63–71, 2014. Disponível em: < <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2013.12.007>. >

McBRATNEY, A. B.; MENDONÇA-SANTOS, M. L.; MINASNY, B. On digital

McBRATNEY, A.; FIELD, D. J.; KOCH, A. The dimensions of soil security. **Geoderma**, Amsterdam, v. 213, p. 203-213, 2014. Disponível em: < <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2013.08.013>. >

MENDONÇA-SANTOS, M. 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, M. (Ed.). **Digital Soil Mapping: an introductory perspective.** Developments in soil science. Amsterdam: Elsevier, 2007. p. 39-54

MORI, P. E.; REEVES, S.; CORREIA, C. T.; HAUKKA, M. Development of a fused glass disc XRF facility and comparison with the pressed powder pellet technique at Instituto de Geociências, São Paulo University. **Revista Brasileira de Geociências**, v. 29, p. 441 -446, 1999.

OGBURN, D.; SILLAR, B.; SIERRA, J. C. Evaluating effects of chemical weathering and surface contamination on the in situ provenance analysis of building stones in the Cuzco region of Peru with portable XRF. **Journal of Archaeological Science**, v. 40, n. 4, p. 1823-1837, 2013. Disponível em: < <https://doi.org/10.1016/j.jas.2012.09.023>. >

OLIVEIRA, J. B.; CAMARGO, M. N.; ROSSI, M.; CALDERANO FILHO, B. 1999. **Mapa pedológico do Estado de São Paulo: legenda expandida.** Campinas: Instituto Agrônomo/EMBRAPA Solos, 1999. v.1. 64p

OLIVEIRA, L. B.; Ribeiro, M. R.; Jacomine, P. K. T.; Rodrigues, J. J. V.; Marques, F. A. Funções de pedotransferência para predição da umidade retida a potenciais específicos em solos do Estado de Pernambuco. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 26, n. 2, p. 315-323, 2002. Disponível em: < <http://dx.doi.org/10.1590/S0100-06832002000200004>. >

OLIVEIRA, P. C. A.; RODRIGUES, S. C. Cartografia do relevo: um estudo aplicado na região oeste de Minas Gerais. **Revista Brasileira de Geomorfologia**, v.8, p. 37-44, 2007.

PACHEPSKY, Y. A.; RAWLS, W. J. Accuracy and reliability of pedotransfer functions as affected by grouping soils. **Soil Science Society of America**

Journal, Madison, v. 63, n. 6, p. 1.748-1.756, 1999. Disponível em: < DOI: 10.2136/sssaj1999.6361748x.

PADARIAN, J.; MINASNY, B.; MCBRATNEY, A. B. **Using Google's cloud-based platform for digital soil mapping. Computers & Geosciences**, v. 83, n. 6, p. 80–88, 2015.

PARSONS, C.; GRABULOSA, E.M.; PILI, E.; FLOOR, G.H.; ROMAN-ROSS, G.; CHARLET, L. Quantification of trace arsenic in soils by field-portable X-ray fluorescence spectrometry: considerations for sample preparation and measurement conditions. **Journal of Hazardous Materials**. v. 262, p. 1213-1222. 2012. Disponível em: < 10.1016/j.jhazmat.2012.07.001.

PARSONS, R. B.; HERRIMAN, R. C. Geomorphic surfaces and soil development in the upper Rogue River valley, Oregon: **Soil Science of America Journal**, v. 40, n. 6, p. 933-938, 1976. Disponível em: < doi:10.2136/sssaj1976.03615995004000060034x.

PEINADO, F. M.; RUANO, S. M.; GONZÁLEZ, M. G. B.; MOLINA, C. E. A rapid field procedure for screening trace elements in polluted soil using portable X-ray fluorescence (PXRF). **Geoderma**, Amsterdam, v. 159, p. 76–82, 2010. Disponível em: < <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2010.06.019>.

QUEIROZ NETO, J. P. O estudo de formações superficiais no Brasil. **Revista do Instituto Geológico**. v.22, n.1-2, p. 65-78, 2001. Disponível em: < <http://dx.doi.org/10.5935/0100-929X.20010003>.

RAWLS, W. J.; PACHEPSKY, Y. A. Using field topographic to estimate soil water retention. **Soil Science**, Philadelphia, v. 167, n. 7, p. 423–435, 2002.

RAYMENT, G. E., LYONS, D. J. **Phosphorus soil chemical methods-** Australasia. CSIRO Publ., Collingwood, VIC. 2011.

RAYMENT, G. E.; LYONS, D. J. **Soil chemical methods: Australasia**. CSIRO publishing, 2011.

RESENDE, M.; SANTANA, D. P. REZENDE, S. B. Susceptibilidade magnética em Latossolos do Sudeste e do Sul do Brasil. In: REUNIÃO DE CLASSIFICAÇÃO, CORRELAÇÃO DE SOLOS E INTERPRETAÇÃO DE APTIDÃO AGRÍCOLA, 3., 1988, Rio de Janeiro. **Resumos...** Rio de Janeiro, EMBRAPA: SNLCS/SBCS, 1988. p. 233–258.

SHACKLEY, M. S. Portable X-ray fluorescence spectrometry (pXRF): the good, the bad, and the ugly. **Archaeology Southwest Magazine**, v. 26, n. 2, p. 8, 2012.

SHEPHERD, K. D.; WALSH, M. G. Development of reflectance spectral libraries for characterization of soil properties. **Soil science society of America journal**, v. 66, n. 3, p. 988-998, 2002.

SILVA, L. S. **Mineralogia Da Fração Argila Dos Solos Do Planalto Ocidental Paulista**. 2016. 83 f. Dissertação (Mestrado em Agronomia - Ciência do Solo). Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinária, Universidade Estadual Paulista (UNESP), Jaboticabal, 2016.

SIQUEIRA, D. S.; MARQUES Jr, J.; PEREIRA, G. T.; BARBOSA, R. S.; TEIXEIRA, D. B.; PELUCO, R. G. Sampling density and proportion for the characterization of the variability of Oxisol attributes on different materials. **Geoderma**, Amsterdam, v. 232–234, p. 172–182, 2014. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2014.04.037>.

soil mapping. **Geoderma**, Amsterdam, v. 117, n. 1-2, p. 3-52, 2003. Disponível em: < [https://doi.org/10.1016/S0016-7061\(03\)00223-4](https://doi.org/10.1016/S0016-7061(03)00223-4).

SOUZA, Z. M.; MARQUES Jr, J.; PEREIRA, G. T. Variabilidade espacial de atributos físicos do solo em diferentes formas do relevo sob cultivo de cana-de-açúcar. R. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 28, p. 937-944, 2004. Disponível em: < <http://dx.doi.org/10.1590/S0100-06832004000600001>.

SURFER 7.0. **Contouring and 3D surface mapping for scientist's engineers**. User's Guide. New York: Golden software, Inc, 1999. 619p.

TEN CATEN, A.; DALMOLIN, R. S. D.; MENDONCA-SANTOS, M. L.; GIASSON, E. Mapeamento digital de classes de solos: características da abordagem brasileira. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 42, n. 11, 2012. Disponível em:< <http://dx.doi.org/10.1590/S0103-84782012001100013>.

THOMAZ, E. L.; MELQUIADES, F. L. Discriminação de marcadores de proveniência de sedimento em bacia rural por meio de EDXRF. **Revista Brasileira de Geomorfologia**, São Paulo, v. 10, n. 1, 2009. Disponível em: < DOI: <http://dx.doi.org/10.20502/rbg.v10i1.122>.

VASCONCELOS, V. **Classificação das formas de terreno e a sua relação com ossolos do Chapadão do Zagaia, Serra da Canastra – MG**. 2011. 91 f. Dissertação (Mestrado em Geografia) – Universidade de Brasília, Brasília, 2011.

VASCONCELOS, V.; CARVALHO JÚNIOR, A. O.; MARTINS, E. S.; COUTO JÚNIOR, A. F.; GUIMARAES, R. F.; GOMES, R. A. T. Sistema de classificação geomorfométrica baseada em uma arquitetura sequencial em duas etapas: árvore de decisão e classificador espectral, no Parque Nacional da Serra da Canastra. **Revista Brasileira de Geomorfologia**, São Paulo, v. 13, n. 2, p. 171–186, 2012. Disponível em: < DOI: <http://dx.doi.org/10.20502/rbg.v13i2.248>.

VASCONCELOS, V.; MARTINS, E. S.; CARVALHO JÚNIOR, O. A.; MARQUES JÚNIOR, J.; SIQUEIRA, D. S.; COUTO JÚNIOR, A. F.; GUIMARAES, R. F.; GOMES, R. A. T.; REATTO, A. Modelo de evolução pedogeomorfológica da Serra da Canastra, MG. **Revista Brasileira de Geomorfologia**, São Paulo, v. 14, n. 2, p. 195–210, 2013.

VIEIRA, S. R.; MILLETE, J.; TOPP, G. C.; REYNOLDS, W. D. **Handbook for geostatistical analysis of variability in soil and climate data**. Tópicos Ciência do Solo, v. 2, p. 145, 2002.

VISCARRA-ROSSEL, R. A.; CHEN, C. Digitally mapping the information content of visible-near infrared spectra of surficial Australian soils. **Remote Sensing of Environment**, v. 115, n. 6, p. 1443–1455, 2011. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.rse.2011.02.004>>.

VISCARRA-ROSSEL, R. A.; 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. Disponível em: <<https://doi.org/10.1111/j.1365-2389.2012.01495.x>>.

WEINDORF, D. C.; ZHU, Y Haggard, B.; LOFTON, J. Enhanced pedon horizonation using portable x-ray fluorescence spectrometry. **Soil Science Society of America Journal**, v. 76, n. 2, p.522-531, 2012. Disponível em: <<https://doi.org/10.2136/sssaj2011.0174>>.

WYSOCKI, D. A.; SCHOENEBERGER, P. J.; LAGARRY, H. E. Soil surveys: a window to the subsurface. **Geoderma**, Amsterdam, v. 126, n. 2, p. 167-180, 2005. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2004.11.012>>.

ZHU, A. X.; HUDSON, B.; BURT, J.; LUBICH, K.; SIMONSON, D. Soil mapping using GIS, expert knowledge, and fuzzy logic. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 65, p.1463–1472, 2001.

CAPÍTULO 2 – Caracterização do Solo do Planalto Ocidental Paulista por Espectroscopia de Fluorescência de Raios X

RESUMO- A agricultura atual necessita de metodologias para determinação de atributos do solo que sejam menos agressivas ao meio ambiente. A espectroscopia de fluorescência de raios X (EFRX) tem sido uma técnica promissora no fornecimento simultâneo de análise quantitativa e elementar da composição do solo. Sobre este aspecto, o presente trabalho foi realizado com o objetivo de caracterizar as classes, geologia e geomorfologia dos solos do Planalto Ocidental Paulista, utilizando EFRX e a técnica multivariada. Foram coletadas 262 amostras de solo na profundidade de 0,0 – 0,2 m, para caracterização química, mineralógica e espectral. As intensidades dos picos dos elementos Si, Al, Fe e Ti dos espectros obtidos pela EFRX relacionaram-se com as classes de solos, formações geológicas e graus de dissecação da paisagem presentes no Planalto Ocidental Paulista. A análise de componentes principais, utilizando os dados obtidos pela EFRX, aliados aos atributos argila, areia, teores de Fe extraídos por ditionito-citrato-bicarbonato de sódio e por oxalato ácido de amônio, permitiu a caracterização das classes de solos, formações geológicas e graus de dissecação da paisagem presentes na região de estudo. A intensidade do pico do Fe apresentou o segundo maior autovetor na caracterização do eixo da componente principal 1, e as intensidade dos picos do Ti e Si apresentaram, respectivamente, o quarto e o quinto maiores autovetores neste eixo.

Palavras-chave- geomorfologia, pedogênese, geoquímica.

Characterization of the soils of western Paulista Plateau by x-ray fluorescence spectroscopy

ABSTRACT- Current agriculture needs methodologies to determine soil attributes that are less aggressive to the environment. X-ray fluorescence spectroscopy (EFRX) has been a promising technique in providing simultaneous quantitative and elemental analysis of soil composition. The objective of this work was to characterize the classes, geology and geomorphology of the soils of the Western Plateau, using EFRX and the multivariate technique. A total of 262 soil samples were collected at 0.0 - 0.2 m depth for chemical, mineralogical and spectral characterization. The intensities of the peaks of the Si, Al, Fe and Ti elements of the spectra obtained by the EFRX were related to the classes of soils, geological formations and degrees of dissection of the landscape present in the Western Plateau. The main components analysis, using the data obtained by EFRX, allied to the attributes clay, sand, Fe content extracted by dithionite-citrate-bicarbonate sodium and ammonium oxalate, allowed the characterization of the soil classes, geological formations and degrees of dissection of the landscape present in the study region. The intensity of the peak of Fe presented the second largest eigenvector in the characterization of the axis of the main component 1, and the intensity of the peaks of Ti and Si presented, respectively, the fourth and fifth largest eigenvectors on this axis

Key words- geomorphology, pedogenesis, geochemistry.

2.1 INTRODUÇÃO

O Planalto Ocidental Paulista (POP) possui uma grande importância socioeconômica para o Estado de São Paulo, destacando-se na produção de álcool e açúcar e o cultivo de citros, sendo responsável por aproximadamente 80% da produção nacional destas culturas.

Dos 13 milhões de hectares do Planalto Ocidental Paulista, aproximadamente 2 milhões de hectares são ocupados por basaltos (15,5%), 7,4 milhões de hectares pela Formação Vale do Rio do Peixe (57,1%) e 3,6 milhões de hectares pelas outras formações sedimentares (27,5%). Essas formações estão assentadas, essencialmente, sobre rochas areníticas e, em menores proporções, sobre rochas basálticas, provenientes dos eventos do Cretáceo Superior (Fernandes e Coimbra, 2000).

O compartimento geológico mais expressivo é o Arenito do Grupo Bauru e, secundariamente, os Basaltos da Formação Serra Geral, ocorrendo nos fundos de alguns vales dos principais rios, em ocorrências descontínuas. A paisagem do POP pode ser dividida em unidades de dissecação (pouco, intermediária, alta) da paisagem, isto é, os solos oriundos dos arenitos são principalmente de dois tipos: os Latossolos Vermelhos de textura arenosa e os Argissolos Vermelho-Amarelos de textura arenosa / média, em relevos suave-ondulados a ondulados.

Os solos derivados dos basaltos, com ocorrência mais restrita aos fundos dos vales, são Latossolos Vermelhos de textura argilosa (Latosolos Roxos) e Nitossolos Vermelhos (Terras-Roxas Estruturadas) (OLIVEIRA, 1999). Independentemente do substrato geológico, esses solos estão situados em unidades de dissecação pouco, intermediariamente e altamente dissecadas da paisagem, isto é, são coordenados pelas características geomorfométricas, por elas condicionarem a distribuição ou o carreamento de água na paisagem.

Na grande extensão territorial do POP, na diversidade geomorfológica, nas classes de solos e na escassez de informações detalhadas que inviabilizam o melhor aproveitamento dos recursos do solo, torna-se necessário o uso de metodologias para determinação de atributos do solo que sejam menos agressivas ao meio ambiente, menos onerosas, e que auxiliem no mapeamento da variabilidade destes atributos com maiores níveis de detalhe

(MARQUES Jr et al., 2009). O mapeamento dos atributos do solo requer elevado custo, além de provocar maior impacto ambiental, devido ao uso de reagentes utilizados nas análises de laboratório. A utilização de métodos indiretos de mapeamento da variabilidade dos atributos do solo pode ser utilizada como importante ferramenta para o planejamento sustentável das práticas agrícolas (FROGBROOK; OLIVER, 2007).

A EFRX é uma técnica instrumental empregada nas análises de elementos em rochas, cimentos, dentre outros (MORI et al., 1999) e permite determinar o teor de elementos em uma amostra, utilizando as intensidades de raios X característicos emitidos, possibilitando a detecção simultânea de elementos em uma ampla faixa de número atômico e teores. Os teores totais dos elementos no solo são determinados, tradicionalmente, por meio da digestão ácida e em seguida por técnicas espectroscópicas (RAYMENT; LYONS, 2011). Estes métodos, além de serem trabalhosos, são sujeitos a imprecisões devido à possibilidade de contaminação a partir dos reagentes químicos utilizados. Além disso, a digestão, muitas vezes, envolve aquecimento, que pode levar à perda de analitos voláteis. Portanto, estudos de técnicas analíticas inovadoras são necessários para a análise dos elementos do solo.

A EFRX vem sendo utilizada na identificação de horizontes baseada nas diferenças dos elementos identificados pela EFRX, auxiliando na precisão dos mapeamentos de solo em nível de série (WEINDORF et al., 2012). O'Rourke et al. (2016) destacaram o uso da presente técnica para desenvolver um inventário geoquímico do solo em escala de bacia. Estes autores concluíram que a EFRX, utilizada na versão portátil tornou-se uma ferramenta rápida para levantamentos geoquímicos do solo *in loco*. A textura do solo também foi avaliada pela EFRX. Concentrações elementares obtidas por esta técnica foram relacionadas com a textura obtida pela análise tradicional de laboratório (ZHU et al., 2011). Estes trabalhos assinalaram a potencialidade da técnica de EFRX na viabilização de trabalhos futuros de mapeamentos de áreas específicas de manejo e levantamentos de solo detalhados, pois auxiliam a determinação de atributos diagnósticos, como, por exemplo, a textura, e na otimização da delimitação das unidades mapeadas (KANIU et al., 2012).

O presente trabalho foi realizado com o objetivo de caracterizar as classes, a geologia e a geomorfologia dos solos do Planalto Ocidental Paulista, utilizando EFRX e análise multivariada.

2.2 MATERIAL E MÉTODOS

2.2.1 Localização e caracterização da área de estudo

O estudo foi desenvolvido no Planalto Ocidental Paulista (POP), que corresponde a aproximadamente 13 milhões de hectares (~48% do Estado de São Paulo) (Figura 1). A geologia da área é caracterizada principalmente por sedimentos arenosos, argilosos e cascalho, rochas vulcânicas de composição básica e sequências sedimentares. Aproximadamente 2 milhões de hectares da área são ocupados por basaltos da Formação Serra Geral (15,5%), 7,4 milhões hectares pela Formação Vale do Rio do Peixe (VRP) (57,1%) e 3,6 milhões de hectares pelas outras formações sedimentares (27,5%).

As formações geológicas do POP são divididas em dois Grupos: (i) Grupo Caiuá, composto pelas Formações Santo Anastácio e Rio Paraná, no Estado de São Paulo, correspondente a depósitos de lençóis de areia, de clima seco, acumulados em extensas e monótonas planícies desérticas, marginais dos grandes complexos de dunas do “sand sea” (Deserto Caiuá), que se estende para a região norte do Estado do Paraná. O Grupo Bauru é composto pelas formações Uberaba, Vale do Rio do Peixe (VRP), Araçatuba, São José do Rio Preto, Presidente Prudente e Marília. Incluem ainda os Analcimitos Taiúva, rochas vulcânicas localmente intercaladas na sequência (FERNANDES, 2004; FERNANDES et al., 2007).

Os solos de maior ocorrência são classificados como Argissolo Vermelho-Amarelo, Latossolos, Latossolo Férricos, Neossolo Litólico, Nitossolo Vermelho e Gleissolo Háptico (OLIVEIRA et al., 1999; Escala 1:5.000.000) (Figura 2). Nas regiões Norte e Noroeste do Planalto prevalece o clima tropical com estação seca de inverno, enquanto na região Sul, prevalece o clima temperado úmido com verão quente. Nas partes Leste e Sudeste, o clima é temperado úmido com inverno seco e verão quente pela classificação de Köppen. A vegetação natural da área era Mata Atlântica na região Oeste e

Cerrado nas regiões Leste e Sudoeste do Planalto, sendo o uso atual mais representativo do cultivo de cana-de-açúcar e pastagem.

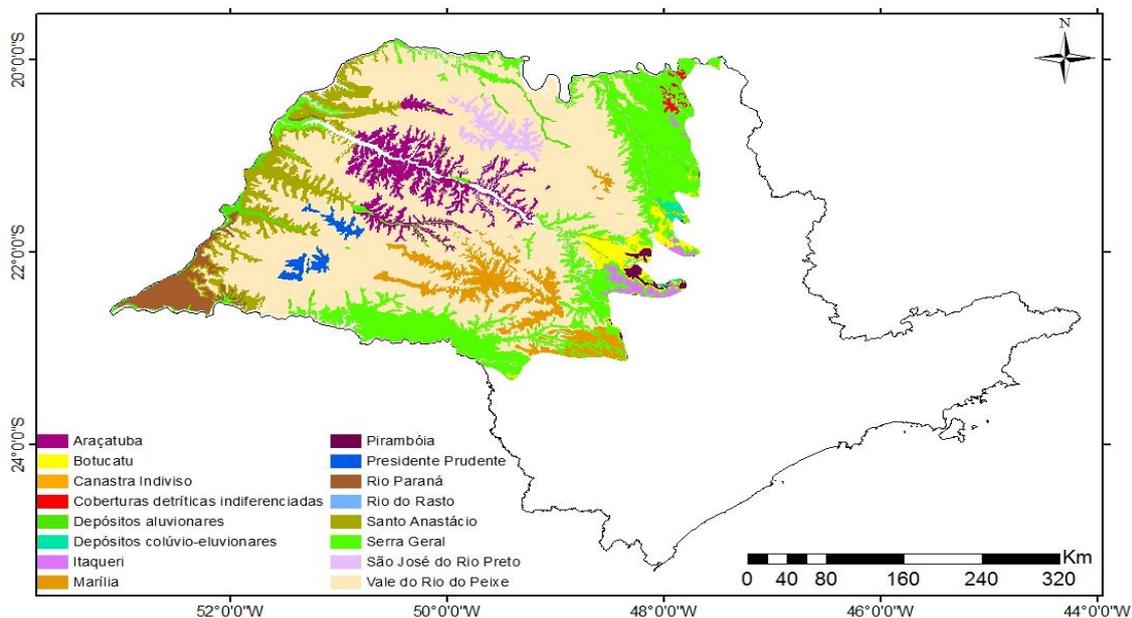


Figura 1. Mapa geológico atualizado do Planalto Ocidental Paulista (escala semidetalhada 1:200.000). Fonte: Fernandes et al. (2007).

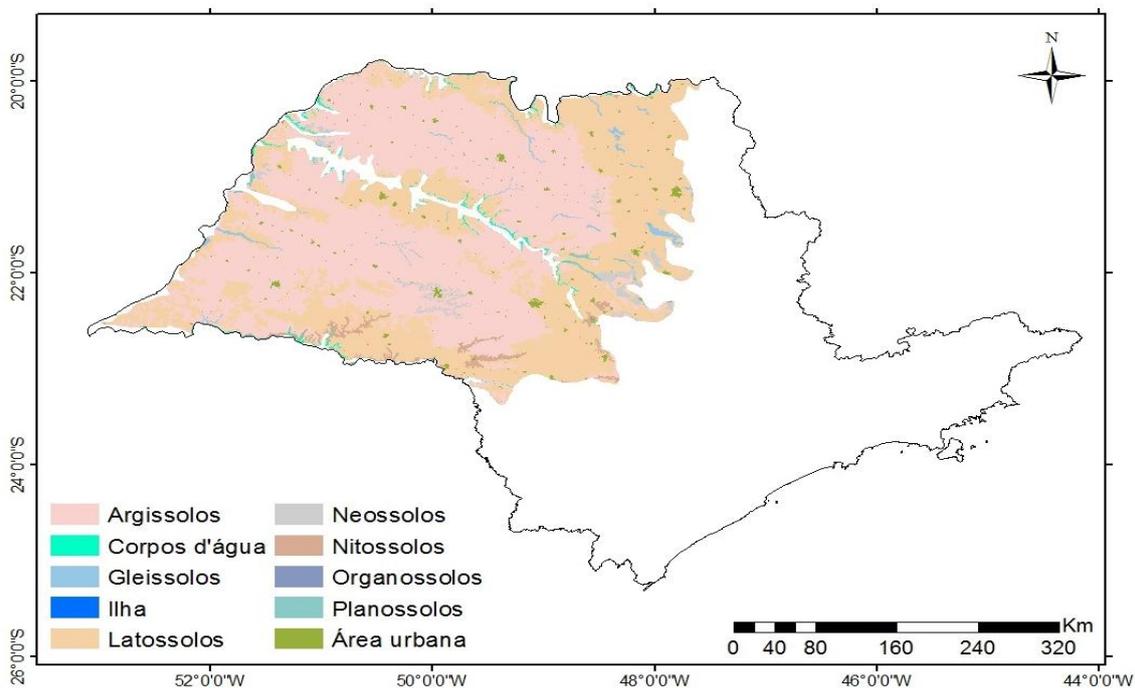


Figura 2. Mapa pedológico do Planalto Ocidental Paulista (Escala: 1:300.000). FONTE: Instituto Agrônômico de Campinas.

2.2.2 Análise dos compartimentos da paisagem

Com base na classificação geomorfológica proposta por Vasconcelos et al. (2012), que classifica as formas da paisagem como expressão da

evolução pedogeomorfológica, foi proposto o mapa de unidades de dissecação, em três níveis: pouco dissecada, moderadamente (intermediariamente) dissecada e altamente dissecada (Figura 3). As unidades de dissecação foram relacionadas aos modelos de relação solo-paisagem, ligados ao balanço pedogênese (taxa de formação do solo) – geomorfogênese (taxa de evolução da paisagem) (ESPINDOLA, 2008).

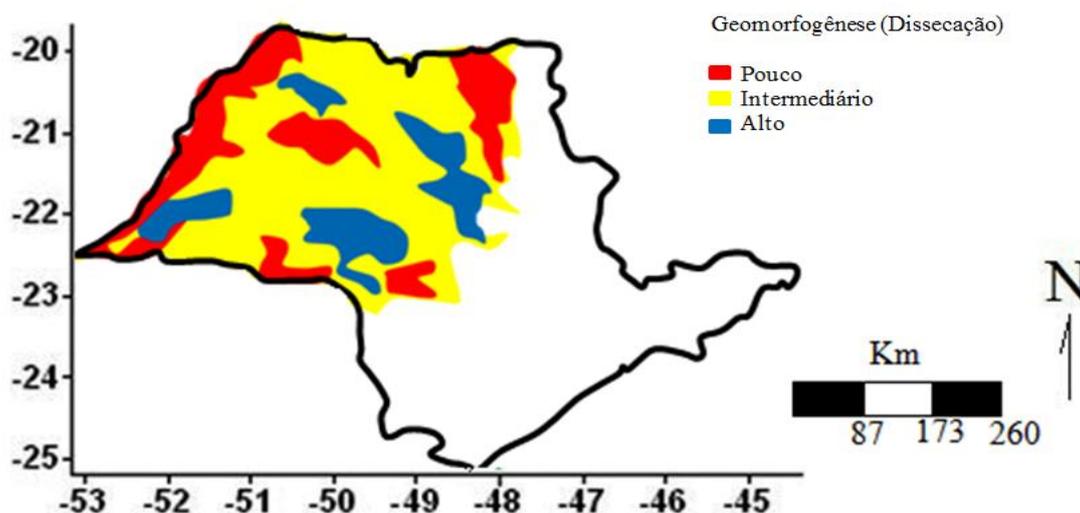


Figura 3. Proposta de unidades de dissecação da paisagem para o Planalto Ocidental Paulista. (Extraído de: SILVA, 2016).

2.2.3 Planejamento amostral

Foram coletadas 262 amostras na profundidade de 0,0-0,2 m ao longo das rodovias do Estado, em locais representativos e que tenham sofrido mínima interferência antrópica. O espaçamento mínimo entre as amostras foi de 10 km, e o espaçamento máximo foi de 60 km. Com base no arquivo de rodovias do Estado fornecidas pelo Departamento de Estradas de Rodagem, foi elaborado o plano de amostragem, utilizando a ferramenta ET GeoWizards no ArcView 9.3. Houve boa distribuição espacial dos pontos planejados, garantindo a representatividade dos compartimentos majoritários.

2.2.4 Análises laboratoriais

A análise granulométrica foi realizada pelo método da pipeta, utilizando uma solução de NaOH 0,1 mol L⁻¹ como dispersante químico e agitação mecânica em aparato de baixa rotação, por 16 horas, seguindo metodologia preconizada pela Embrapa (1997).

A determinação dos teores de ferro relativa à totalidade dos óxidos de ferro pedogenéticos, extraídos por ditionito-citrato-bicarbonato de sódio (Fed), seguiu a metodologia de Mehra e Jackson (1960), em temperatura de 25 °C e agitação mecânica por 16 horas. A determinação dos teores de ferro extraídos por oxalato ácido de amônio (Feo), relativos aos óxidos de ferro pedogenéticos de baixa cristalinidade, seguiu a metodologia citada por Camargo et al. (1986) adaptado de Schwertmann (1973).

2.2.5 Espectroscopia de Fluorescência de Raios X

Aproximadamente 2 gramas de solo peneirados e homogêneos foram escaneados em um equipamento de espectroscopia de fluorescência de raios X, modelo NexQc da marca Rigaku. O equipamento foi operado de 0 a 10 KeV. Foram utilizadas para as análises as intensidades dos picos atribuídos aos elementos silício (Si), alumínio (Al), ferro (Fe) e titânio (Ti).

2.2.6 Análises estatísticas

Os dados obtidos das análises de laboratório foram submetidos à estatística descritiva para a caracterização da área de estudos e, posteriormente foi realizada a análise de componentes principais (ACP). A ACP é uma técnica de interdependência, a qual gera novas variáveis latentes ou autovalores, definidos como combinações lineares das variáveis originais medidas, chamadas componentes principais. Por meio destes componentes, são determinados seus autovetores, que atribuem pesos para cada variável e determinam seu padrão de distribuição no plano bidimensional, formado pelos componentes principais, o que evidencia a influência de cada fator e sua interação com os demais fatores, nos diversos pontos da área estudada (SILVA et al., 2010). Primeiramente foi realizada a padronização dos dados ($\mu = 0$, $\sigma = 1$) e, em seguida, foram gerados os componentes principais. Para a interpretação dos resultados foram considerados os dois primeiros componentes principais (CP1 e CP2) (HAIR et al., 2009). Para a interpretação dos resultados apresentados em cada componente principal, observaram-se o sinal e o peso que cada variável apresentou no componente. As análises foram realizadas pelo pacote estatístico Statistica 7.0 (STATISTICA, 2005).

2.3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

2.3.1 Caracterização dos solos

Os teores de argila variaram de 107 a 433 g kg⁻¹ e estão de acordo com os teores característicos das classes de solos estudadas. Estes valores coincidiram com os maiores valores das intensidades dos picos de Fe obtidos pela EFRX (Tabela 1).

Os valores de mediana apresentaram-se distantes em relação a média dos atributos analisados, e a assimetria e a curtose indicaram melhor simetria no LVf, enquanto para os demais tenderam a alta assimetria. O CV nas classes de solos apresentou, em sua grande maioria, domínio de alta variabilidade nos atributos analisados, sendo exceção no Lva (Int Al, Int Si, areia e Fed), no Lvma (Int Ti, areia e argila) e no PVa (Int Si), que apresentaram moderada variabilidade de CV, e ocorreu também baixa variabilidade de CV, representados pelo Feo no LVma e areia no PVa. Essa variabilidade, de acordo com os valores de coeficiente de variação (CV), foi classificada, segundo Warrick e Nielsen (1980), como baixo <12%, médio de 12% a 24% e alto >24%.

Quanto aos compartimentos geológicos mais representativos (basaltos do Grupo São Bento, Formação Serra Geral, e a média dos arenitos dos Grupos Bauru e Caiuá) (Tabela 2), os solos de origem arenítica apresentaram domínio da fração areia (732 g kg⁻¹), predominando argila nos solos de origem basáltica (448,6 g kg⁻¹). Isto ocorreu porque, nos solos de origem basáltica, predominam “minerais” de fácil intemperização como plagioclásio, olivina, ao contrário do arenito, com minerais mais resistentes, a exemplo, de quartzo, presente na fração areia. Já o Fed apresentou valores bem superiores nos solos de origem basáltica (67,0 g kg⁻¹), em relação aos solos de origem arenítica (27,9 g kg⁻¹). Em ambos os compartimentos geológicos, os solos apresentaram teores de Fed>Feo, evidenciando solos mais intemperizados (SCHAEFFE, 2008).

As intensidades de Al, Fe e Ti foram superiores nos solos de origem basáltica (15055,0; 62602,0; 59229,0 c.p.s) e somente a intensidade de Si (167876,0 c.p.s) foi mais elevada nos solos de origem arenítica. Foi verificado pela mediana que, nos compartimentos geológicos estudados, os valores

observados apresentaram-se distantes dos valores da média, dando um indicativo de que estes valores se encontram anormais. Outra medida que dá um indicativo da simetria dos atributos é quanto, mais próximos os valores estiverem do valor central zero, melhor será sua simetria. Neste sentido, foi observada maior assimetria nos solos de origem arenítica.

Tabela 1. Estatística descritiva das classes de solo LVf= Latossolo Vermelho férrico, LVA= Latossolo Vermelho-Amarelo, LVma= Latossolo Vermelho textura média a arenosa, PVA= Argissolo Vermelho-Amarelo do Planalto Ocidental Paulista.

Atributos	Média	Mediana	CV	Mínimo	Máximo	Assimetria
Lva						
Int Al	27580,00	32746,00	40,22	10975,00	33851,00	-1,97
Int Si	129844,00	122534,00	13,71	118181,00	156128,00	1,83
Int Fe	32436,00	37107,00	31,47	17158,00	38371,00	-1,97
Int Ti	1547,00	1758,00	35,69	730,00	1942,00	-1,84
Areia	612,50	602,80	14,32	523,80	720,70	0,46
Argila	317,70	298,50	19,38	267,00	407,00	1,61
Fed	43,80	42,80	60,74	15,90	73,50	0,12
Feo	0,85	0,80	31,13	0,60	1,20	0,86
LVf						
Int Al	27078,00	27464,00	45,13	10312,00	50140,00	0,25
Int Si	87034,00	76544,00	44,77	43983,00	191845,00	1,30
Int Fe	54607,00	55003,00	39,58	10393,00	86961,00	-0,55
Int Ti	2904,00	2873,00	43,37	787,00	5421,00	0,32
Areia	374,50	342,40	54,31	95,90	837,60	0,78
Argila	433,00	463,50	32,00	65,00	644,00	-1,22
Fed	62,85	75,10	35,66	23,70	86,30	-0,83
Feo	1,90	2,00	53,79	0,30	4,70	0,72
Lvma						
Int Al	38998,00	41260,00	18,14	16563,00	53107,00	-1,19
Int Si	173939,00	177334,00	19,46	70920,00	246404,00	-0,51
Int Fe	13890,00	10732,00	86,37	2993,00	78576,00	3,52
Int Ti	766,00	613,20	65,14	136,50	2814,10	2,03
Areia	755,90	779,80	16,73	213,50	907,00	-2,19
Argila	148,10	140,00	47,89	33,00	463,50	1,68
Fed	31,71	24,90	64,39	11,10	83,80	1,44
Feo	0,66	0,60	71,81	0,10	3,10	2,62
PVA						
Int Al	39618,00	41033,00	25,41	12196,00	58834,00	-0,62
Int Si	175776,00	179787,00	19,38	100254,00	252511,00	-0,41
Int Fe	9374,00	8991,00	41,14	2718,00	23689,00	1,02
Int Ti	791,50	757,70	48,43	97,30	1741,70	0,51
Areia	773,92	781,60	10,64	439,60	944,90	-1,26
Argila	107,33	98,50	40,24	49,00	265,00	1,43
Fed	20,95	20,10	40,27	8,40	77,20	2,80
Feo	0,44	0,40	69,57	0,10	1,50	1,16

CV= coeficiente de variação; Int Al= intensidade de alumínio; Int Si= intensidade de silício; Int Fe= intensidade de ferro; Int Ti= intensidade de titânio; Fed= ferro ditionito; Feo= ferro oxalato.

Com base na classificação de Warrick e Nielsen (1980), o CV dos solos de origem basáltica apresentou alta variabilidade ($CV > 24\%$) em todos os seus atributos, com exceção da Intensidade de Si ($CV > 12$ e $< 24\%$), e os solos de

origem arenítica seguiram a mesma tendência com CV de alta variabilidade, sendo exceção somente a areia, que apresentou moderada variabilidade ($CV > 12$ e $< 24\%$).

Tabela 2. Estatística descritiva dos compartimentos geológicos, dos solos do Planalto Ocidental Paulista.

Atributos	Média	Mediana	CV	Mínimo	Máximo	Assimetria
Basalto						
Int Al	15055,00	14202,00	29,00	10312,00	26915,00	1,98
Int Si	62602,00	62555,00	20,46	43983,00	93135,00	0,90
Int Fe	59229,00	64892,00	35,86	10925,00	86961,00	-0,95
Int Ti	3664,00	3556,00	28,68	1907,00	5421,00	0,24
Areia	371,70	344,20	51,90	102,40	843,30	1,00
Argila	448,60	474,00	30,85	67,00	644,00	-1,68
Fed	67,01	75,35	30,76	26,80	86,30	-1,40
Feo	1,90	1,90	53,65	0,60	4,40	0,86
Arenito						
Int Al	38741,00	40059,00	24,14	10975,00	58834,00	-0,64
Int Si	167876,00	175470,00	24,21	44660,00	252511,00	-0,68
Int Fe	14644,00	10282,00	101,92	2718,00	81320,00	2,86
Int Ti	935,40	758,30	73,40	97,30	4696,00	2,37
Areia	732,40	776,00	21,44	95,90	944,90	-2,11
Argila	149,89	114,75	72,87	33,00	589,50	2,23
Fed	27,91	22,45	66,53	8,40	83,80	1,88
Feo	0,65	0,50	98,11	0,10	4,70	2,93

CV= coeficiente de variação; Int Al= intensidade de alumínio; Int Si= intensidade de silício; Int Fe= intensidade de ferro; Int Ti= intensidade de titânio; Fed= ferro ditionito; Feo= ferro oxalato;

Em relação ao grau de dissecação da paisagem (Tabela 3), observa-se, em média, que os valores da fração areia, em todos os compartimentos (773,8; 678,3 e 714,10 g kg⁻¹), superam os da fração argila. O mesmo comportamento foi verificado para Fed, que assumiu valores elevados (21; 32; 33 g kg⁻¹), enquanto o Feo apresentou valores mais discretos (0,48; 0,86; 0,70 g kg⁻¹), respectivamente. Os maiores valores de areia, nos compartimentos altamente dissecados, devem-se à menor intensidade de intemperismo em relação às unidades pouco disseçadas.

Os valores de mediana, em relação à média, ficaram distantes, seguindo a mesma tendência do compartimento geológico, indicando assimetria dos dados estudados. A assimetria apresentou valores mais próximos do valor central zero somente na Intensidade de Si e Al, em todos os compartimentos de dissecação (alto, intermediário e pouco).

Em relação ao CV classificado conforme os critérios de Warrick e Nielsen (1980), todos os atributos em seus respectivos compartimentos de dissecação apresentaram alta variabilidade ($CV > 24\%$), sendo exceção apenas

a intensidade de Al, Si e areia, no compartimento de alta dissecação, que apresentou moderado CV (CV>12 e <24%).

Tabela 3. Estatística descritiva dos graus de dissecação da paisagem, dos solos do Planalto Ocidental Paulista.

Atributos	Média	Mediana	CV	Mínimo	Máximo	Assimetria
Alto						
Int Al	40753,00	42307,00	21,66	18866,00	56028,00	-0,69
Int Si	176770,00	178989,00	21,72	74520,00	241693,00	-0,61
Int Fe	9853,00	8447,00	95,26	3744,00	66599,00	5,35
Int Ti	697,20	637,00	65,14	185,10	2873,40	2,82
Areia	773,80	782,40	13,58	291,00	944,90	-2,68
Argila	117,70	109,00	61,67	52,00	528,00	4,36
Fed	21,65	19,60	67,56	8,40	83,80	3,47
Feo	0,48	0,40	91,02	0,10	2,40	2,43
Intermediário						
Int Al	36463,00	39083,00	29,62	11547,00	58834,00	-0,50
Int Si	155500,00	164912,00	28,74	44660,00	224354,00	-0,75
Int Fe	19944,00	11865,00	97,21	4017,00	81320,00	1,81
Int Ti	1210,00	960,40	73,87	246,90	4696,00	1,76
Areia	678,30	746,70	28,65	95,90	896,00	-1,54
Argila	192,10	142,00	73,15	49,00	589,50	1,34
Fed	32,05	23,80	69,78	10,80	84,20	1,29
Feo	0,86	0,60	92,73	0,10	4,70	2,31
Pouco						
Int Al	36792,00	39251,00	30,19	10312,00	56883,00	-0,90
Int Si	161885,00	173276,00	31,46	43983,00	252511,00	-0,70
Int Fe	18622,00	10387,00	113,41	2718,00	86961,00	2,11
Int Ti	1183,00	798,00	100,57	97,30	5421,00	2,22
Areia	714,10	785,90	26,78	102,40	920,00	-1,59
Argila	167,50	110,50	84,87	33,00	644,00	1,89
Fed	33,34	25,65	63,06	10,50	86,30	1,41
Feo	0,70	0,50	108,28	0,10	4,40	2,59

CV= coeficiente de variação; Int Al= intensidade de alumínio; Int Si= intensidade de silício; Int Fe= intensidade de ferro; Int Ti= intensidade de titânio; Fed= ferro ditionito; Feo= ferro oxalato.

2.3.2 Análises de Espectroscopia de Fluorescência de raios X (EFRX)

Os espectros obtidos pela fluorescência de raios X revelaram diferença nas intensidades dos picos atribuídos ao Fe, Al, Si e Ti, quando as amostras de solo representativas foram classificadas pelo grau de dissecação da paisagem, dentro dos compartimentos geológicos mais representativos (Basaltos da Formação Serra Geral e arenitos dos Grupos Bauru e Caiuá) (Figuras 4 e 5) e pelas classes de solo (Figura 6).

Quanto ao grau de dissecação da paisagem, nas amostras representativas dos solos desenvolvidos de basalto, foram observados os picos dos elementos Si, Al, Fe e Ti, em todos os graus de dissecação, porém os picos de Fe e Ti aumentaram das amostras classificadas como altamente

dissecadas para as classificadas como pouco dissecadas, e o contrário ocorreu com os picos de Si e Al (Figura 4).

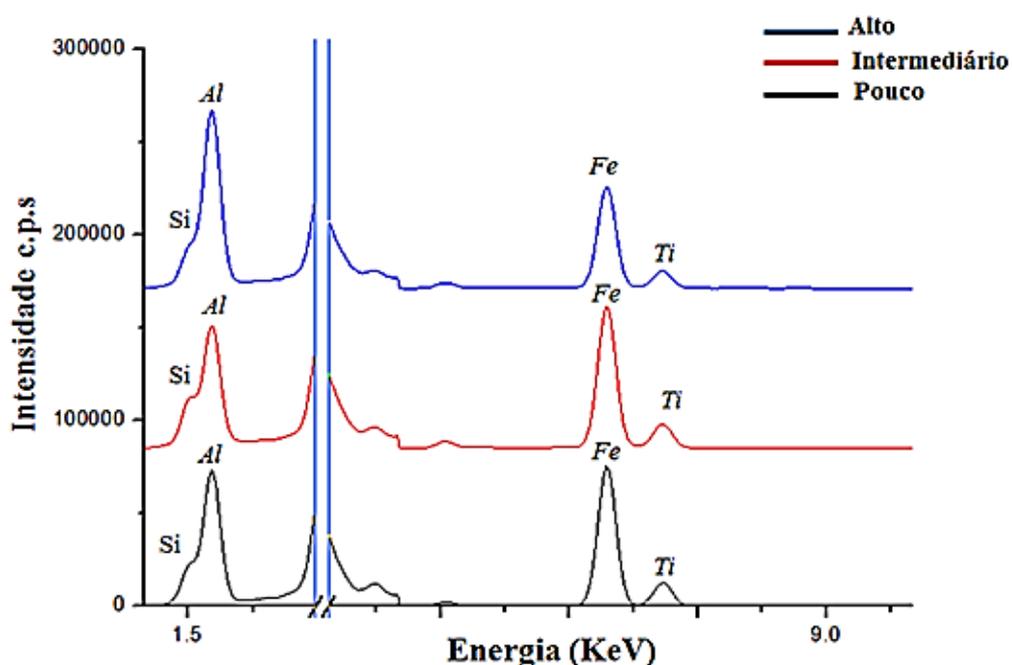


Figura 4. Espectros de EFRX dos solos desenvolvidos de Basalto, em diferentes níveis de dissecção da paisagem.

Estes resultados são explicados devido aos solos presentes em paisagens pouco dissecadas, ou seja, mais evoluído pedogeneticamente, serem mais intemperizados e mineralogicamente mais oxídicos (MONTANARI et al., 2010). A mineralogia da fração argila de solos tropicais altamente intemperizados, desenvolvidos de basalto, é constituída pelos óxidos de ferro, óxidos de alumínio e óxidos de titânio, bem como pelos minerais silicatados de grade 1:1, como a caulinita, em menores proporções (CAMPOS, 2007; CAMARGO, 2010; GHIDIN, 2006), justificando as maiores intensidades dos picos atribuídos ao Fe e ao Ti, nas amostras classificadas como intermediariamente e pouco dissecadas nesta unidade geológica.

Nas amostras representativas dos solos desenvolvidos de arenitos, foram observados os picos dos elementos Si, Al e Fe em todos os graus de dissecção. Já o pico do Ti foi observado unicamente nos solos referentes às unidades intermediariamente dissecadas. Todavia, a presença de ferro ocorre independentemente do material de origem e do grau de dissecção da paisagem, sendo as maiores intensidades do pico de Fe nos solos desenvolvidos na unidade intermediariamente dissecada (Figura 5). Isto ocorre

devido: i) à mineralogia da fração argila de solos areníticos tender a possuir menores teores de óxidos de ferro e de titânio, justificados pelos menores teores de minerais primários contendo estes elementos na rocha de origem, e ii) à maior variabilidade da composição mineralógica das rochas areníticas presentes no POP (SILVA et al., 2010; FERNANDES; COIMBRA, 2000).

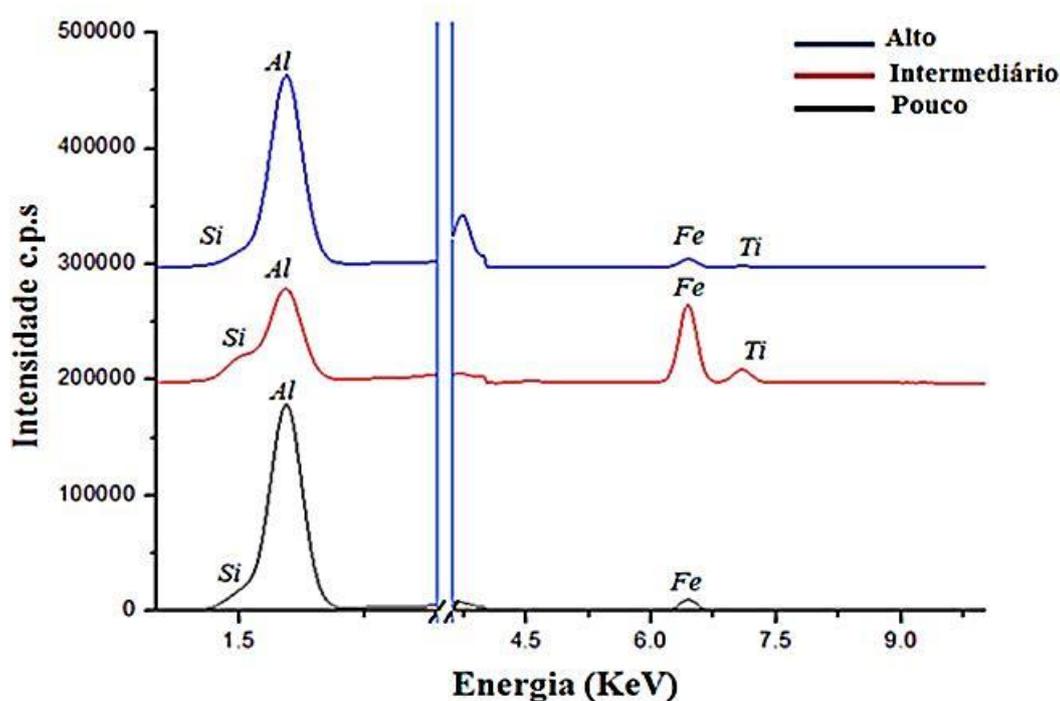


Figura 5. Espectros de EFRX dos solos desenvolvidos de arenito, em diferentes níveis de dissecação da paisagem.

Quanto às classes de solos, a amostra classificada como LVf apresentou a maior intensidade dos picos atribuídos ao Fe e ao Ti. Um aumento das intensidades dos picos, atribuído ao Si e ao Al, foi observado da amostra de solo classificada como LVf para a amostra classificada como PVA (Figura 6). No presente estudo, os LVfs apresentaram os maiores teores de óxidos de ferro (Tabela 1) que são justificados pela presença deste elemento nos minerais rocha de origem (basalto) e na fração argila do solo. O mesmo ocorre com o elemento Ti. Já os solos desenvolvidos de rochas areníticas apresentam maiores teores de Si e Al devido à mineralogia característica de solos originados de rochas ígneas, justificando as maiores intensidades de Si e Al nas amostras de solo classificadas como PVA, LVma e LVA.

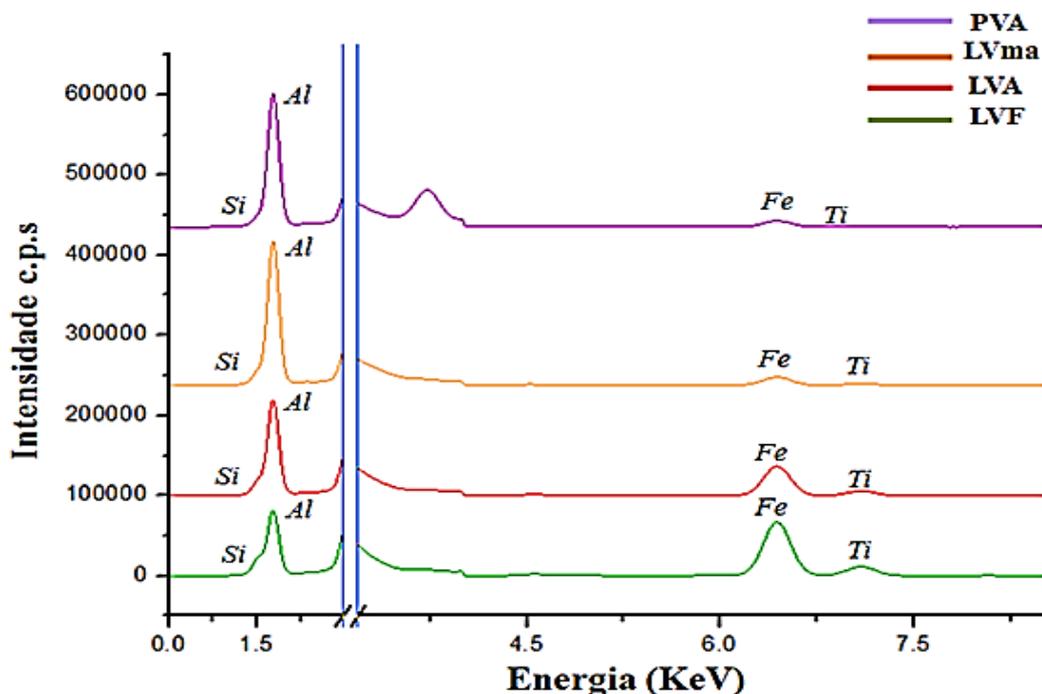


Figura 6. Espectros de EFRX referentes às classes de solo do Planalto Ocidental Paulista.

2.3.3 Análises de componentes principais (ACP)

Os resultados da ACP mostram que o componente principal (CP1) explica 73,47 % da variância total dos atributos dos solos estudados, enquanto o CP2 explicou apenas 8,01%. A ACP busca encontrar aquelas variáveis correlacionadas a cada autovetor (componentes principais), o que explica as correlações entre elas. Os autovalores são ordenados em ordem decrescente de valor; sendo assim, a maior parte da variância dos atributos considerados é explicada pelo CP1 que retém a maior quantidade da variância original (maior autovalor). O segundo maior autovalor explica a segunda maior quantidade de variância (após excluir a já considerada em CP1) e, assim, sucessivamente (HAIR et al., 2005). A ACP foi processada com os atributos espectroscópicos da EFRX, intensidades dos elementos Al, Fe, Ti, Si, e os atributos argila, Feo, Fed e areia. Na Tabela 4, encontram-se as correlações dos atributos com os CPs 1 e 2. Atributos com correlações de mesmo sinal agem de forma direta, e sinais contrários, de forma inversa. Em CP1, têm-se: Intensidade Alumínio, Intensidade Ferro, Intensidade Ti, Argila, Fed e Feo com sinais negativos, e Intensidade Silício e Areia, com sinais positivos. Em CP2, apenas a Intensidade Alumínio apresenta carga relevante.

Tabela 4: Correlação dos componentes principais (CP).

Atributos	CP1	CP2
Intensidade Al	-0,68	0,71
Intensidade Si	0,86	0,18
Intensidade Fe	-0,96	-0,05
Intensidade Ti	-0,89	-0,20
Areia	0,92	-0,02
Argila	-0,97	0,10
Fed	-0,71	-0,21
Feo	-0,83	-0,08

Observa-se que o componente CP1, que explica a maior porcentagem da variação total dos solos estudados, é caracterizado pela composição elementar, atribuída à mineralogia, e pela granulometria do solo. A intensidade do Al (Int_Al) contribuiu nos dois componentes, pois apresentou autovetor negativo no CP1, e positivo no CP2, com valores aproximados; porém, ressalta-se que o CP2 explicou apenas 8% da variação dos solos estudados.

A representação gráfica biplot (CP1xCP2) apresenta a distribuição das amostras de solo. Neste biplot, é possível visualizar as variáveis que mais discriminaram as classes de solo, classificadas até o segundo nível categórico, associado à classificação da textura e dos teores de óxidos de ferro, segundo o Sistema Brasileiro de Classificação do Solo (EMBRAPA, 2013).

A intensidade do silício (0,86) e da areia (0,92) foram as variáveis que melhor discriminaram as classes de solo PVA e Lvma (figura 7), localizados do lado direito do CP1 (correlações positivas), o que é justificado pela textura média a arenosa e pela mineralogia da fração areia destas classes de solo, compostas por altos teores de quartzo e, conseqüentemente, por altos teores de Si. Enquanto do lado esquerdo do CP1, os atributos responsáveis pela discriminação das amostras de solo, classificadas como LVf e LVA, foram Int_Al (-0,68), Int_Fe (-0,96), Int_Ti (-0,89), Fed (-0,71), Feo (-0,83) e argila (-0,97). Estes resultados estão de acordo com a textura argilosa e a mineralogia mais oxidico destes solos. Porém, observam-se algumas amostras de solo classificadas como PVA e LVma do lado esquerdo do eixo do CP1, e duas amostras classificadas como LVf do lado direito do eixo do CP1. Isto pode ser explicado devido à variação mineralógica do material de origem, principalmente das rochas areníticas.

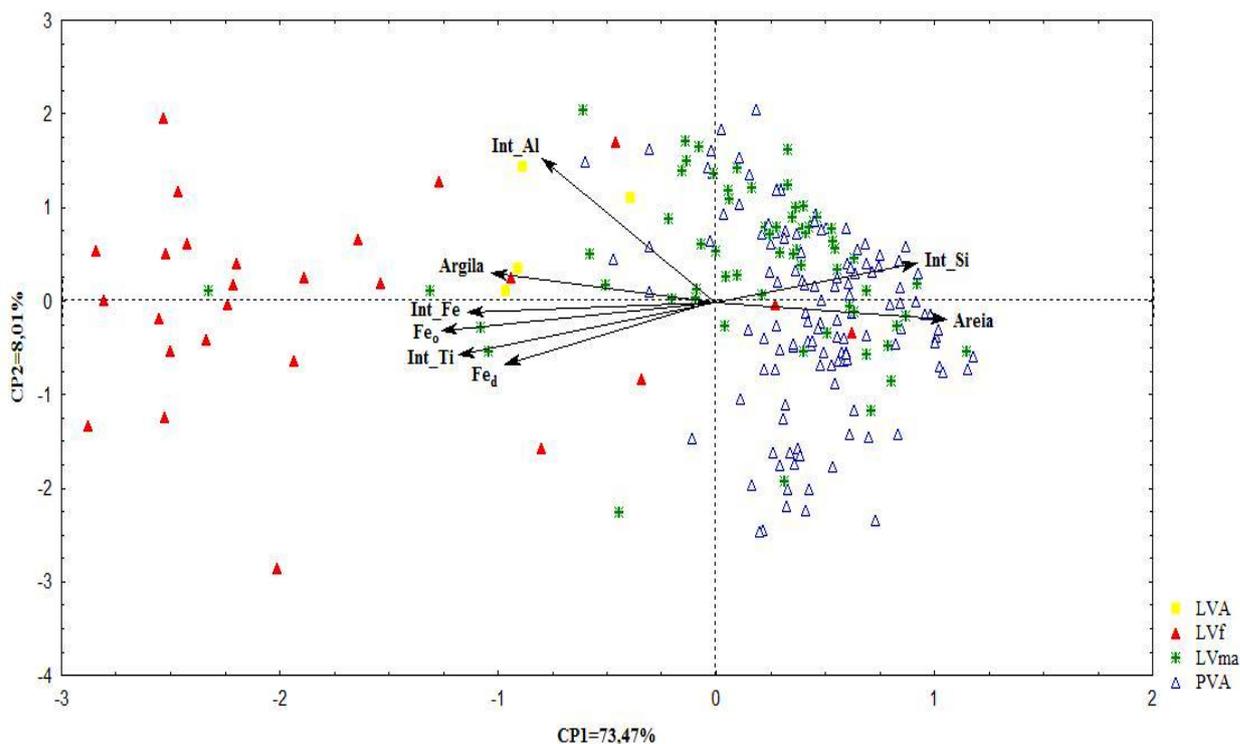


Figura 7. O Gráfico biplot mostra a distribuição das classes de solo e das variáveis argila, areia, Fed, Feo, Int_Ti, Int_Fe, Int_Al, Int_Si, nos dois primeiros componentes principais. LVf= Latossolo Vermelho férrico, LVA= Latossolo Vermelho-Amarelo, LVma= Latossolo Vermelho textura média a arenosa, PVA= Argissolo Vermelho-Amarelo.

Observa-se que as amostras de solo posicionadas do lado esquerdo em CP1 apresentaram maior dispersão em relação às amostras presentes do lado direito deste mesmo eixo. Esta maior variação deve-se ao fato de estas amostras estarem situadas em uma transição arenito/basalto, e isto também pode explicar a ocorrência de amostras de solo classificadas como Lvma, com teores médios de argila e de óxidos de ferro, posicionadas do lado esquerdo do CP1. Observa-se que a ACP permitiu uma discriminação das classes de solos no nível categórico estudado.

Van Dam (2008) utilizou a espectroscopia de fluorescência de raios X para quantificar e analisar a composição química das amostras de solo com as características magnéticas e mineralógicas de solos ricos em Fe, desenvolvidos em substrato basáltico, no Havaí. Este autor concluiu que, a partir dos dados de FRX, o ferro teve uma variação de 13% nas amostras estudadas, mostrando que o grau de desenvolvimento do solo é acompanhado por um aumento gradual no teor de Fe dos solos.

Na Figura 8, observa-se a distribuição das amostras de solo, no plano bidimensional formado pelas CPs 1 e 2, classificadas segundo as formações geológicas de origem dos solos estudados. Observa-se que houve separação pela ACP entre a maioria das amostras de solo de origem arenítica das Formações VRP, Araçatuba, Marília, Presidente Prudente, Rio Paraná, São José do Rio Preto, das amostras de solo de origem basáltica (Formação Serra Geral) (Figura 8).

As amostras de solo de origem basáltica foram posicionadas do lado esquerdo de CP1, onde são direcionados os vetores da Int_Al, Int_Fe, Int_Ti, Fed, Feo e da argila.

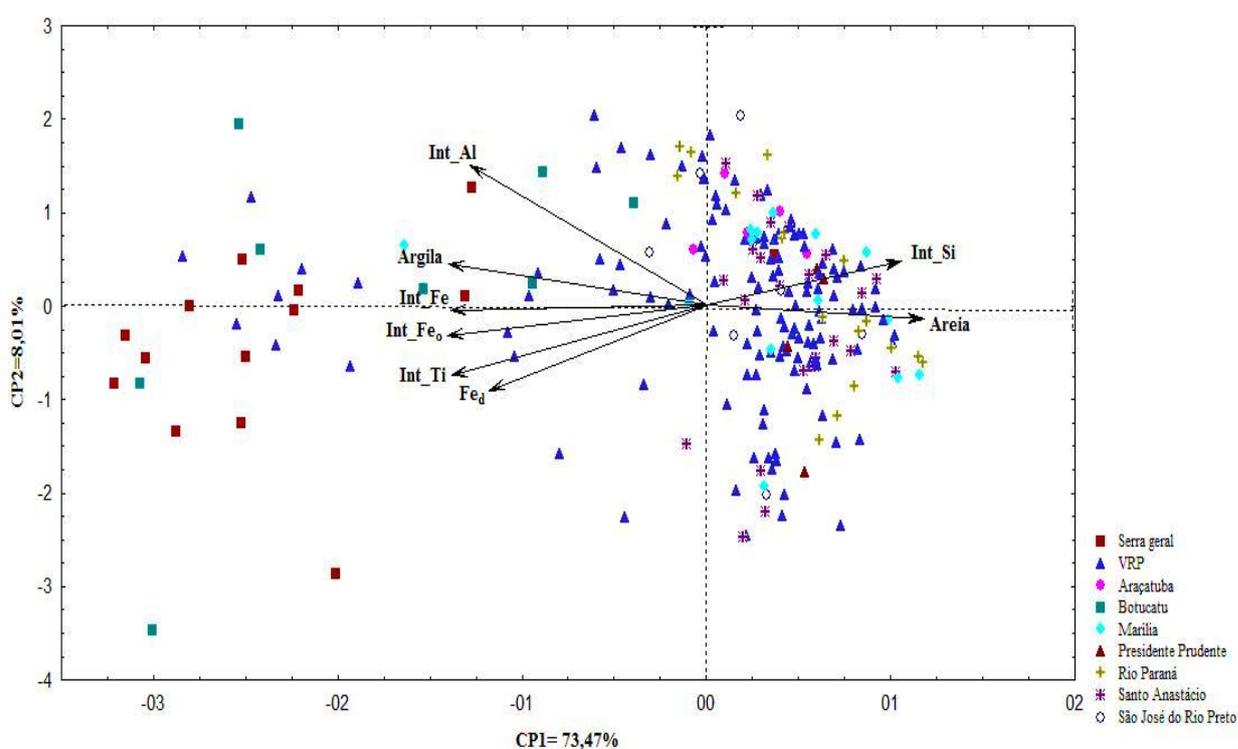


Figura 8. O Gráfico biplot mostra a distribuição da geologia e das variáveis argila, areia, Fed, Feo, Int_Ti, Int_Fe, Int_Al, Int_Si, nos dois primeiros componentes principais.

Estes resultados são explicados por estes solos serem originados de rochas vulcânicas, ricos em minerais ferromagnesianos com predominância de minerais opacos, como ilmenita e magnetita litogênicas, maghemita, goethita e hematita pedogênicas, ou seja, formadas em condições de solo, com menor ocorrência de minerais silicatados (KER, 1997). É comum na composição de rochas basálticas a presença de titânio (TiO_2), associado a minerais de ferro, uma vez que ambos apresentam formação geoquímica semelhante (BELLIENI,

1984; SOUBRAND-COLIN et al., 2009). Resultados semelhantes foram encontrados por Machado (2005) em solos originados de rochas da Formação Serra Geral.

Os solos originados de rochas areníticas apresentam maiores teores de sílica e areia, como pode ser confirmado pelo posicionamento da maioria das amostras de solo de origem arenítica, do lado direito do CP1, e próximas aos autovetores da Int_Si e da areia. Porém, verificou-se que algumas amostras de solo das Formações VRP, Marília, Botucatu e Rio Paraná, posicionadas do lado esquerdo do CP1.

A Formação VRP apresenta porções de arenitos entrelaçados que repousam sobre o basalto da Formação Serra Geral e apresentam estratificação cruzada, intercalada por camadas de lamitos argilosos (SOARES et al., 1980). Assim, alguns arenitos desta formação apresentam influência de sedimentos basálticos, originando solos mais argilosos e com maiores teores de óxidos de ferro, justificando a presença desta formação do lado esquerdo do CP1.

Assim como na Formação VRP, a Formação Marília pode apresentar composição mineralógica influenciada pelos basaltos da Formação Serra Geral, sendo comuns fragmentos do basalto nos arenitos desta formação. Isso se deve ao fato de o Grupo Bauru ter passagem transicional com o Basalto, devido à influência da bacia sedimentar do Paraná e dos arenitos do grupo Caiuá, que abrigam rochas argilo arenosas, na base próxima à região de Marília (FENANDES; COIMBRA, 2000; BATEZELLI et al., 2005).

A Formação Botucatu é constituída por arenitos com textura média a fina e matriz silte argilosa, coloração vermelha ou amarelo-claro, com presença de feldspato cimentado por sílica ou por óxidos de ferro, apresentando também estratificação cruzada (SOARES, 1980) e minerais ferromagnesianos em pequenas quantidades (AZEVEDO et al., 1981). Essa formação é precedida por sedimentação eólica, derivada de rochas cristalinas e rochas sedimentares pertencentes aos depósitos continentais da Bacia do Paraná, em sobreposição às rochas ígneas da Formação Serra Geral, que compreendem um conjunto de rochas basálticas originárias de derrames vulcânicos, que se encontram intercalados diretamente nos arenitos da Formação Botucatu.

A presença dessa formação do lado esquerdo do CP1 ocorreu pelas características mineralógicas semelhantes ao basalto, por exemplo, a presença de minerais que contêm ferro e titânio (FeTiO_2) em sua estrutura, resistente intemperismo associado normalmente com a magnetita em rochas basálticas e ácidas (HUNT et al., 1970; MENESES; MADEIRA NETTO, 2001; CORNELL; SCHWERTMANN, 1978).

A configuração da paisagem, isto é, a geomorfologia, também foi determinante na formação dos solos, sendo desta forma possível separar os solos presentes em diferentes graus de dissecação da paisagem (Figura 7). A maioria das amostras de solo, classificadas como altamente dissecada, intermediariamente e pouco dissecada, posicionou-se do lado direito do CP1. Já do lado esquerdo, estão amostras classificadas como pouco e intermediariamente dissecadas, e apenas uma amostra de solo classificada como altamente dissecada. Isto ocorre devido a solos presentes em paisagem classificada como pouco dissecada apresentarem maior taxa de pedogênese e fração argila mais oxidada. No POP, estes solos são encontrados nas regiões com predomínio de rochas basálticas da Formação Serra Geral (FERNANDES, 2004; FERNANDES et al., 2007).

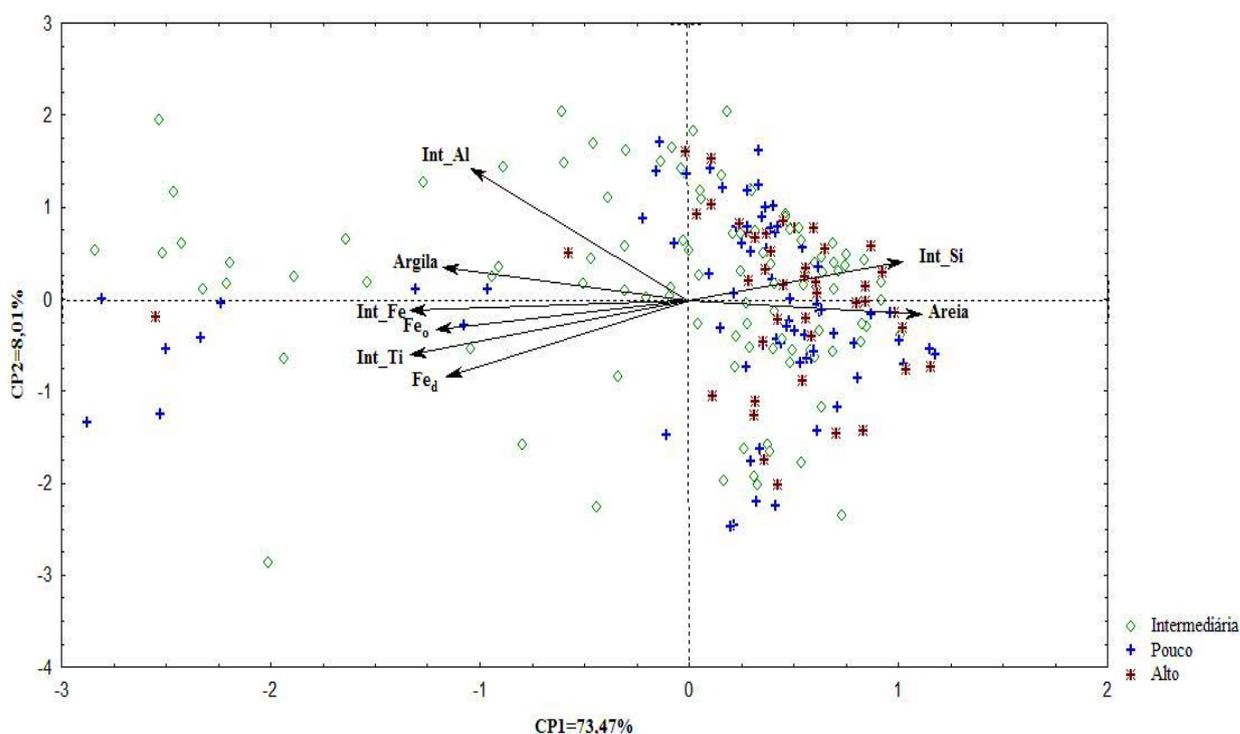


Figura 9. O Gráfico biplot mostra a distribuição dos graus de dissecação e das variáveis argila, areia, Fed, Feo, Int_Ti, Int_Fe, Int_Al, Int_Si, nos dois primeiros componentes principais.

A EFRX mostra-se uma técnica rápida e não destrutiva para caracterização de classes de solo, geologia e geomorfologia. Aliada à análise multivariada, facilita a caracterização dos solos do POP. Isto vem corroborar os resultados de Kaniu et al. (2015), que sugerem a importância da combinação dos resultados obtidos por EFRX e análises multivariadas na caracterização direta e rápida de um grande número de amostras para fins de classificação de solos.

2.4 CONCLUSÕES

1. As intensidades dos picos dos elementos Si, Al, Fe e Ti dos espectros obtidos pela espectroscopia de fluorescência de raios X (EFRX) tem relação com as classes de solo, formações geológicas e graus de dissecação da paisagem presentes no Planalto Ocidental Paulista.

2. A análise de componentes principais, utilizando os dados obtidos pela EFRX, aliados aos atributos argila, areia, teores de Fe extraídos por ditionito-citrato-bicarbonato de sódio e por oxalato ácido de amônio, permitiu uma discriminação das classes de solos, formações geológicas e graus de dissecação da paisagem presentes na região de estudo.

2.5 REFERÊNCIAS

AZEVEDO, A. A. B.; PRESSINOTTI, M. M. N.; MASSOLI, M. Estudos sedimentológicos das formações Botucatu e Pirambóia na região de Santa Rita do Passa Quatro, SP. **Revista do Instituto Geológico**, São Paulo, v. 2, n. 1, p. 31-38, 1981. Disponível em: < <http://dx.doi.org/10.5935/0100-929X.19810003>. >

BATEZELLI, A.; GOMES, N. S.; PERINOTTO, J. A. J. Petrografia e evolução diagenética dos arenitos da porção norte e nordeste da Bacia Bauru (Cretáceo Superior). **Revista Brasileira de Geociências**, São Paulo, v. 35, n. 3, p. 311-322, 2016.

BELLIENI, C.; MARQUES, L. S.; MELFI, A. J.; PICCIRILLO, E. M.; NARDY, A. J. R.; ROISENBERG, A. High-and low-TiO₂ flood basalts from the Paraná plateau (Brazil): petrology and geochemical aspects bearing on their mantle origin. **Neues Jahrbuch für Mineralogie**, Abhandlungen, v. 150, p. 273-306, 1984.

CAMARGO, L. A.; MARQUES JR, J.; PEREIRA, G. T.; HORVAT, R. A. Variabilidade espacial de atributos mineralógicos de um Latossolo sob diferentes formas de relevo I - Mineralogia da fração argila. **Revista Brasileira de Ciências do Solo**, Viçosa, v. 32, p. 2269-2277, 2008. Disponível em: < <http://dx.doi.org/10.1590/S0100-06832008000600006>.

CAMARGO, L. A.; MONTANARI, R.; MARQUES JR, J.; CAMPOS, M. C. C.; SOUZA, Z. M. Caracterização mineralógica de Latossolos em diferentes feições do relevo na região de Jaboticabal, SP. **Revista Ciência Agronômica**, Fortaleza, v. 41, n. 2, p. 191 –199, 2010a.

CAMPOS, M. C. C.; MARQUES JR, J.; PEREIRA, G. T.; MONTANARI, R.; CAMARGO, L. A. Relações solo-paisagem em uma litossequência arenito-basalto na região de Pereira Barreto, SP. **Revista Brasileira de Ciências do Solo**, Viçosa, v. 31, n. 3, p. 519–529, 2007.

COELHO, M. R.; VIDAL-TORRADO, P. Caracterização e gênese de perfis plínticos desenvolvidos de arenito do grupo Bauru II – Mineralogia. **Revista Brasileira de Ciências do Solo**, Viçosa, v. 27, p. 495-507, 2003. Disponível em: < <http://dx.doi.org/10.1590/S0100-06832003000300011>.

CUNHA, P.; MARQUES Jr, J.; CURI, N.; PEREIRA, G. T.; LEPSCH, I. F. Superfícies geomórficas e atributos de Latossolos em uma topossequência arenítico-basáltica da região de Jaboticabal (SP). **Revista Brasileira de Ciências do Solo**, Viçosa, v. 29, p. 81-90, 2005. Disponível em: < <http://dx.doi.org/10.1590/S0100-06832005000100009>.

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

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA – EMBRAPA. Centro Nacional de Pesquisa de Solos. **Sistema brasileiro de classificação de solos**. 3. Ed. Rio de Janeiro: EMBRAPA Solos, 2013. 353 p.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA – EMBRAPA. **Manual de métodos de análise de solo**. 2. ed. Rio de Janeiro, Ministério da Agricultura, 1997. 212 p.

ESPINDOLA, C. R. **Retrospectiva crítica sobre a pedologia**. Campinas: Editora UNICAMP; 2008.

FERNANDES, L. A.; CASTRO, A. B.; BASILICI, G. Seismites in continental sand sea deposits of the Late Cretaceous Caiuá Desert, Bauru Basin, Brasil. **Sedimentary Geology**, v. 199, p. 61 –64, 2007. Disponível em: < <https://doi.org/10.1016/j.sedgeo.2005.12.030>.

FERNANDES, L. A.; COIMBRA, A. M. O Grupo Caiuá (Ks): revisão estratigráfica e contexto deposicional. **Revista Brasileira de Geociências**, São Paulo, v. 24, n. 3, p. 164-176, 1994.

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 Ciências do Solo**, Viçosa, v. 28, p. 245-257, 2004.

FROGBROOK, Z. L.; OLIVER, M. A. Identifying management zones in agricultural fields using spatially constrained classification of soil and ancillary data. **Soil Use and Management**, v. 23, p. 40-51, 2007.

HAIR, J. F.; ANDERSON, R. E.; TATHAM, L.; BLACK, W. C. **Multivariate Data Analysis**. 5 ed. New Jersey: Prentice Hall, 1998. 730p.

HAIR, J. F.; BLACK, W. C.; BABIN, B. J.; ANDERSON, R. E.; TATHAM, R. L. **Análise multivariada de dados**. 6. ed. Porto Alegre: Bookman, 2009. p. 688.

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

HÜRKAMP, K.; RAAB, T.; VÖLKE, J. Two and three-dimensional quantification of lead contamination in alluvial soils of a historic mining area using field portable X-ray fluorescence (FPXRF) analysis. **Geomorphology**, v. 110, n. 1, p. 28-36, 2009.

KANIU, M. I.; ANGEYO, K. H. Challenges in rapid soil quality assessment and opportunities presented by multivariate chemometric energy dispersive X-ray fluorescence and scattering spectroscopy. **Geoderma**, Amsterdam, v. 241, p. 32-40, 2015. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2014.10.014>.

KANIU, M. I.; ANGEYO, K. H.; MWALA, A. K.; MANGALA, M. J. Direct rapid analysis of trace bioavailable soil macronutrients by chemometrics-assisted energy dispersive X-ray fluorescence and scattering spectrometry. **Anal Chimica Acta**, n. 729, p. 21-25, 2012.

MALHOTRA, N. K. **Pesquisa de marketing: uma orientação aplicada**. 3 ed. Porto Alegre: Bookman, 2001. 720p.

MARQUES JR, J. **Caracterização de áreas de manejo específico no contexto das relações solo-relevo**. 2009. 113f. Tese (Livre-Docência) – Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias, Universidade Estadual Paulista, Jaboticabal, 2009.

MARQUES Jr, J. **Distribuição e atributos dos solos em relação à forma e evolução de uma vertente em Monte Alto, SP**. 1995. 226p. Tese (Doutorado em Agronomia). Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Piracicaba.

MEHRA, O. P.; JACKSON, M. L. **Iron oxide removal from soils and clays by a dithionitecitrate system buffered with sodium bicarbonate**. In: Swineford A. (Ed.). National conference on clays and clay mineral. Washington: Pergamon Press, 1960. p. 317– 342.

MINITAB, R. **Making Data analysis Easier**: version 13.1, 2000.

MONTANARI, R.; MARQUES JR, J. CAMPOS, M. C. C. SOUZA, Z. M.; CAMARGO, L. A. Caracterização mineralógica de Latossolos em diferentes feições do relevo na região de Jaboticabal, SP. **Revista Ciência Agrônômica**, Fortaleza, v. 41, n. 2, p. 191 –199, 2010.

MORI, P. E.; REEVES, S.; CORREIA, C. T.; HAUKKA, M. Development of a fused glass disc XRF facility and comparison with the pressed powder pellet technique at Instituto de Geociências, São Paulo University. **Revista Brasileira de Geociências**, v. 29, p. 441 -446, 1999.

O'ROURKE, S. M.; MINASNY, B.; HOLDEN, N. M.; MCBRATNEY, A. B. Synergistic Use of Vis-NIR, MIR, and XRF Spectroscopy for the Determination of Soil Geochemistry. **Soil Science Society of America Journal**, v. 80, n. 4, p. 888-899, 2016. Disponível em: < doi:10.2136/sssaj2015.10.0361.

OLIVEIRA, J. B.; CAMARGO, M. N.; ROSSI, M.; CALDERANO FILHO, B. 1999. **Mapa pedológico do Estado de São Paulo**: legenda expandida. Campinas: Instituto Agrônômico/EMBRAPA Solos, 1999. v.1. 64p.

OLIVEIRA, J. B.; CAMARGO, M. N.; ROSSI, M.; CALDERANO FILHO, B. **Mapa pedológico do Estado de São Paulo**: legenda expandida. Campinas: Instituto Agrônômico/EMBRAPA Solos, 1999. v.1. 64p.

OLIVEIRA, P. C. A.; RODRIGUES, S. C. Cartografia do relevo: um estudo aplicado na região oeste de Minas Gerais. **Revista Brasileira de Geomorfologia**, v. 8, p. 37-44, 2007. Disponível em: < <http://dx.doi.org/10.20502/rbg.v8i2.91>.

QUEIROZ NETO, J. P. O. Estudo de formações superficiais no Brasil. **Revista Instituto Geológico**. 2001, vol.22, n.1-2, p. 65-78. Disponível em:< <http://dx.doi.org/10.5935/0100-929X.20010003>.

RAYMENT, G. E.; LYONS, D. J. **Phosphorus soil chemical methods Australasia**. CSIRO Publ., Collingwood, VIC. 2011.

SCHAEFER, C. E. G. R.; FABRIS, J. D.; KER, J.C. Minerals in the clay fraction of Brazilian Latosols (Oxisols): a review. **Clay Minerals**, v. 43, n. 1, p. 137-154, 2008. Disponível em: <10.1180/claymin.2008.043.1.11.

SCHWERTMANN, U.; FITZPATRICK, R. W.; TAYLOR, R. M.; LEWIS, D. G. The influence of aluminium on iron oxides. Preparation and properties of Al-

substituted hematites. **Clays and Clay Minerals**, Aurora, v. 27, n. 2, p. 269-276, 1979.

SILVA, A. R.; SOUZA JR, I. G. S.; COSTA, A. C. S. Suscetibilidade Magnética do horizonte B de solos do estado do Paraná. **Revista Brasileira de Ciências do Solo**, Viçosa, v. 34, n. 2, p. 329-337, 2010.

SILVA, L. S. **Mineralogia Da Fração Argila Dos Solos Do Planalto Ocidental Paulista**. 2016. 83 f. Dissertação (Mestrado em Agronomia Ciência do Solo). Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinária, Universidade Estadual Paulista (UNESP), Jaboticabal, 2016.

SOARES Jr, A. A. **Argilominerais de um Argissolo Vermelho Distrófico arênico, na região de Marília-SP**. In: Simpósio Internaional de Iniciação Científica da Universidade de São Paulo, 13, 2005, Piracicaba. Anais... Piracicaba: ESALQ, 2005. 1 CD ROM

SOARES, P. C.; LANDIM, P. M. B.; FÚLFARO, V. J.; SOBREIRO NETO, A. F. Ensaio de caracterização estratigráfica do Cretáceo no Estado de São Paulo: Grupo Bauru. **Revista Brasileira de Geociências**, São Paulo, v. 10, n. 3, p. 177-185, 1980.

SOUBRAND-COLIN, M.; HOREN, H.; COURTIN-NOMADE, A. Mineralogical and magnetic characterisation of iron titanium oxides in soils developed on two various basaltic rocks under temperate climate. **Geoderma**, Amsterdam, v. 149, n. 1, p. 27-32, 2009.

SOUZA, Z. M.; MARQUES JR, J.; PEREIRA, G. T. Variabilidade espacial de atributos físicos do solo em diferentes formas do relevo sob cultivo de cana-de-açúcar. **Revista Brasileira de Ciências do Solo**, Viçosa, v. 28, p. 937-944, 2004. Disponível em: < <http://dx.doi.org/10.1590/S0100-06832004000600001>

SURFER 7.0. **Contouring and 3D surface mapping for scientist's engineers**. User's Guide. New York: Golden software, Inc, 1999. 619p.

VAN DAM, R.; HARRISON, J. B. J.; HIRSCHFELD, D. A., MEGLICH, T. M.; LI, Y.; NORTH, R. E. Mineralogy and magnetic properties of basaltic substrate soils: Kaho'olawe and Big Island, Hawaii. **Soil Science Society of America Journal**, v. 72, n. 1, p. 244-257, 2008.

VASCONCELOS, V.; MARTINS, E. S.; CARVALHO JR, A. O.; MARQUES JR, J.; SIQUEIRA, D. S.; COUTO JR, A. F.; GUIMARÃES, R. F.; GOMES, R. A. T.; REATTO, A. Sistema de classificação geomorfométrica baseado em uma arquitetura sequencial em duas etapas: árvore de decisão e classificador espectral, no parque nacional Serra Da Canastra. **Revista Brasileira de Geomorfologia**, v. 13, n. 2, p. 171 –186, 2012.

VIEIRA, S. R.; MILLETE, J.; TOPP, G. C.; REYNOLDS, W. D. **Handbook for geostatistical analysis of variability in soil and climate data**. Tópicos Ciência do Solo, v. 2, p. 145, 2002.

WARRICK, A. W.; NIELSEN, D. R. Spatial variability of soil physical properties in the field. In: Hillel D, ed. **Applications of soil physics**. New York, Academic Press, 1980. 350p.

WEINDORF, D. C.; ZHU, Y.; HAGGARD, B.; LOFTON, J. Enhanced pedon horizonation using portable x-ray fluorescence spectrometry. **Soil Science Society American Journal**, v. 76, n. 2, p.522-531, 2012. Disponível em: < 10.2136/sssaj2011.0174.

ZHU, Y.; WEINDORF, D. C.; ZHANG, W. Characterizing soils using a portable X-ray fluorescence spectrometer: 1. Soil texture. **Geoderma**, Amsterdam, v. 167, p. 167-177, 2011.