

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

Bioturbação e feições poligenéticas profundas em Latossolos da Depressão
Periférica Paulista Central – Piracicaba/SP

Taís Almeida Santos

Tese apresentada para obtenção do título de Doutora em
Ciências. Área de concentração: Solos e Nutrição de
Plantas

Piracicaba
2023

Taís Almeida Santos
Engenheira Agrônoma

**Bioturbação e feições poligenéticas profundas em Latossolos da Depressão Periférica
Paulista Central – Piracicaba/SP**

versão revisada de acordo com a Resolução CoPGr 6018 de 2011

Orientador:
Prof. Dr. **PABLO VIDAL TORRADO**

Tese apresentada para obtenção do título de Doutora
em Ciências. Área de concentração: Solos e Nutrição de
Plantas

**Piracicaba
2023**

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação
DIVISÃO DE BIBLIOTECA – DIBD/ESALQ/USP

Santos, Taís Almeida

Bioturbação e feições poligenéticas profundas em latossolos da Depressão Periférica Paulista Central – Piracicaba/SP / Taís Almeida Santos - - versão revisada de acordo com a Resolução CoPGr 6018 de 2011. - - Piracicaba, 2023.

74 p.

Tese (Doutorado) - - USP / Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”.

1. Biofeições 2. Biomanto 3. Fauna edáfica 4. Latossolização 5. Micromorfologia de solo 6. Carvão enterrado I. Título

Aos meus avós maternos, Orlando e Isabel (*in memoriam*);

Aos meus avós paternos, João (*in memoriam*) e Angelina;

Com todo amor, dedico.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente agradeço a Deus pelo fôlego da vida e por me sustentar e me manter forte para chegar até aqui.

Ao meu orientador Pablo Vidal pela oportunidade, pela confiança, por toda ajuda, por todo conhecimento compartilhado e todas as experiências vivenciadas.

Aos meus pais Oceano e Elisângela, minha irmã e toda família, por todo apoio, amor e estímulo de sempre.

Ao Programa de Pós-graduação em Solos e Nutrição de Plantas da Escola de Agricultura Luiz de Queiroz e a CAPES pela bolsa de estudo regular durante o doutorado.

Ao Departamento de Ciência do Solo por viabilizar a realização do trabalho, no uso das instalações laboratoriais e o auxílio dos técnicos, representados aqui por, Leandro, Sônia, “Chiquinho”, Nivanda, Rossi e Luiz Silva.

Aos amigos da salinha Daniela, Mariane, Beatriz, Karina, Júlio, André e Sara. Aos amigos que já passaram pela salinha Marina, Rodrigo, Lucas, Gabriel, Renata. Obrigada à todos por todos os momentos maravilhosos ao longo desses anos de Esalq.

Aos meus eternos pais acadêmicos Tâmara e João, por toda ajuda, incentivo e acolhimento em momentos tão difíceis durante essa jornada, muito obrigada.

Aos professores do programa de pós-graduação em Solos e Nutrição de Plantas por toda dedicação na transmissão de seus conhecimentos, aqui representados pelos professores Tiago Osório, Miguel Cooper e Antônio Azevedo, obrigada.

Aos meus Psicólogos, Thayane e Sérgio, por todas as horas de conversa e estímulo, em todos os momentos complicados dessa jornada, por terem acreditado em mim e nunca me deixado desistir.

À psiquiatra Dra Vivian Coelho do Departamento de Saúde da Esalq por toda ajuda em manter minha saúde mental.

À todos que de alguma maneira contribuíram para realização deste trabalho e para me ajudar psicologicamente a permanecer sã, muito, mas muito obrigada mesmo.

SUMÁRIO

RESUMO.....	6
ABSTRACT.....	7
1. INTRODUÇÃO.....	9
2. REFERENCIAL TEÓRICO.....	11
3. MATERIAL E MÉTODOS.....	15
3.1 Localização dos perfis.....	15
3.2 Abertura e descrição dos perfis de solo.....	17
3.3 Análises Laboratoriais.....	17
3.4 Análises micromorfológicas.....	19
3.5 Datação por carbono 14 (¹⁴ C).....	21
4. RESULTADOS.....	23
4.1 Caracterização morfológica dos solos.....	23
4.2 Mineralogia da fração areia.....	32
4.3 Mineralogia da fração argila.....	34
4.4 Geoquímica.....	36
4.5 Datação dos fragmentos de carvões.....	37
4.6 Bioturbação.....	39
4.7 Composição isotópica.....	40
4.8. Testes de uniformidade do perfil.....	41
4.9. Micromorfologia.....	43
5. DISCUSSÃO.....	53
6. CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	61
REFERÊNCIAS.....	63
ANEXO.....	71

RESUMO

Bioturbação e feições poligenéticas profundas em Latossolos da Depressão Periférica Paulista Central – Piracicaba/SP

A maior parte dos estudos sobre latossolos abordam, dentro da seção de controle, a mineralogia, química e físico-química e em particular sobre a morfologia e formação dos microagregados do horizonte B latossólico, muitas vezes apoiados com estudos micromorfológicos. Entretanto, como são solos muito mais espessos do que 200cm, se faz necessário descrever melhor feições e registros morfológicos existentes após esse limite. Este trabalho se desenvolveu em latossolos com diferentes texturas e desenvolvidos a partir de diferentes materiais geológicos dentro da Depressão Periférica Paulista, destacando-se os sedimentos paleozóicos dos grupos Tubarão e Passa Dois, com interrupções nesta litologia por intrusões de rochas básicas mesozoicas da Formação Serra Geral e sedimentos neoceno-zóicos. A hipótese principal é a de que, após a seção de controle, há nos latossolos, em especial no B latossólico e na zona de transição para o saprolito, registros morfológicos pouco descritos e eventualmente não compreendidos ainda da história evolutiva e da dinâmica pedogenética dos latossolos. As biofeições estão dentro das menos estudadas, o que é paradoxal, uma vez que a latossolização envolve não somente a ferralitização (parcial ou total) mas também a bioturbação. Como segunda hipótese é postulado que há zonas importantes de bioturbação, que ocorrem após os limites de profundidade descritos pelos ecólogos do solo, e que estas zonas estão associadas a mudanças paleoambientais. Os resultados sobre a uniformidade do material parental dos solos, deixou claro que nem todas as relações são assertivas para considerar esses solos como poligenéticos, resultante de diversos processos ao longo da sua formação. O biomanto dos Latossolos não é resumido aos horizontes superficiais A, AB, BA e mesmo Bw1, eles podem ser espessos e atingir profundidades muito além da seção de controle. Zonas de grande bioturbação profundas podem estar relacionadas a mudanças climáticas pretéritas onde períodos mais secos forçaram a fauna edáfica a buscar maior umidade em profundidade. Biofeições de minhocas, cupins e formigas cortadeiras aparecem de forma comum em profundidades superiores àquelas descritas na literatura, fato também encontrado para organismos menores como os enquitreídeos que são normalmente associados aos primeiros centímetros do perfil de solo. A identificação de biofeições em solos arenosos e de textura média é mais difícil devido à menor estabilidade dos constructos que são destruídos com maior facilidade. Subhorizontes adensados e com estrutura em blocos devem ser remanescentes de volumes mais densos formados na zona de alteração e que permaneceram. As faixas de abundantes fragmentos de carvão enterrados nos 3 perfis em estudo são coincidentes em profundidade e idades, marcando claramente períodos de incêndios recorrentes durante o Holoceno, indicando momentos de clima mais seco, o que pôde ser confirmado no estudo isotópico.

Palavras-chave: Biofeições, Biomanto, Fauna edáfica, Latossolização, Micromorfologia de solos, Carvão enterrado

ABSTRACT

Bioturbation and deep polygenetic features in oxisols of Central Paulista Peripheral Depression – Piracicaba/SP

Most studies on ferralsols address, within the control section, mineralogy, chemistry and physico-chemistry and in particular the morphology and formation of microaggregates of the latosolic B horizon, often supported by micromorphological studies. However, as the soils are much thicker than 200cm, it is necessary to better describe existing features and morphological records beyond this limit. This work was carried out in ferralsols developed from different geological materials within the Paulista Peripheral Depression, with emphasis on the Paleozoic sediments of the Tubarão and Passa Dois groups, with interruptions in this lithology by intrusions of Mesozoic basic rocks of the Serra Geral Formation and Neocenoic sediments. The main hypothesis is that, after the control section, there are in the ferralsols, especially in the ferralic horizon and in the transition zone to the saprolite, little described morphological records and possibly not yet understood of the evolutionary history and pedogenetic dynamics of the ferralsols. Biofeatures are among the least studied, which is paradoxical, since the ferralsol formation involves not only ferralization (partial or total) but also bioturbation. As a second hypothesis, it is postulated that there are important zones of bioturbation, which occur beyond the depth limits described by soil ecologists, and that these zones are associated with paleoenvironmental changes. The results about the uniformity of the parent material of the soils made it clear that not all relations are assertive to consider these soils as polygenetic, resulting from different processes throughout their formation. The ferralsol's biomantle is not limited to surface horizons A, AB, BA and even Bf1, they can be thick and reach depths far beyond the control section. Deep bioturbation zones may be related to past climate changes where drier periods forced the edaphic fauna to seek greater moisture in depth. Biofeatures of earthworms, termites and leaf-cutting ants commonly appear at depths greater than those described in the literature, a fact also found for smaller organisms such as enchytreids, which are normally associated with the first few centimeters of the soil profile. The identification of biofeatures in sandy and medium-textured soils is more difficult due to the lower stability of constructs that are more easily destroyed. Dense and blocky subhorizons must be remnants of denser volumes formed in the alteration zone and which remained. The tracks of abundant coal fragments buried in the 3 profiles under study are coincident in depth and age, clearly marking periods of recurrent fires during the Holocene, indicating moments of drier climate, which could be confirmed in the isotopic study.

Keywords: Biofeatures, Biomantle, Edaphic fauna, Latossolization, Soil micromorphologym
Buried coal

1. INTRODUÇÃO

A classe dos Latossolos é a de principal ocorrência no Brasil e representa cerca de 50% do território. Estão distribuídos sobre amplas e antigas superfícies de erosão: tabuleiros, chapadas, planaltos, terraços fluviais, estando associado normalmente a relevos plano e suave ondulado, e mais raramente a áreas mais acidentadas (Ker, 1997). Esses solos são relacionados a um intenso processo de intemperismo e bioturbação, resultando assim em solos profundos com coloração homogênea, com agregados estáveis, com uma predominância de caulinita e óxidos de ferro e alumínio (Buol et al., 2011). Estes solos ocorrem predominantemente em regiões tropicais e subtropicais (van Wambeke et al., 1983; Schaefer, 2001) e se formam sob intenso grau de dessilicização ou ferralitização parcial com acúmulo residual de óxidos de alumínio e ferro e presença variável de argilas cauliniticas. Os Latossolos apresentam horizonte diagnóstico B latossólico (Bw), que normalmente possui agregados granulares muito pequenos, também denominados microagregados, porém, há também um grupo de Latossolos que podem ocorrer com estruturas em blocos, muito comum em Latossolos amarelo (Stoops, 1983; Neto et al., 2009; Pragana et al., 2016; Costa, 2017). São intensamente influenciados por remontes verticais causados pela bioturbação que homogeneiza o perfil (Eschenbrenner, 1986) o que também contribui para a homogeneidade textural (Ker, 1997). Os Latossolos são ditos como solos poligenéticos e policíclicos por muitas variações climáticas, e pela passagem por muitos processos para sua formação evolutiva (Resende, 1976; Oliveira et al., 1992; Ker, 1995; Muggler et al., 2007)

À medida que os estudos pedológicos foram se dando principalmente na segunda metade do século XX, houve um avanço significativo na descrição e compreensão dos atributos e pedogênese em latossolos no mundo tropical (Moura Filho and Buol, 1972; Lepsch and Buol, 1974; 1986; Moniz and Buol, 1982; Muggler and Buurman, 2000). Destaque para os estudos sobre mineralogia, química e físico-química e em particular sobre a morfologia e formação dos microagregados do horizonte B latossólico, apoiados com estudos micromorfológicos e de microscopia eletrônica (Brewer e Sleeman, 1988; Stoops, 1983; Buol & Eswaran, 1999; Vidal-Torrado & Lepsch, 1999; Cooper, 1996; Schaefer, 2001; entre outros). Entretanto, a maioria das pesquisas se concentraram dentro da parte que se denomina “Seção de Controle” e que corresponde aos 200 cm a partir do contato com a superfície. Mas são solos normalmente muito mais espessos do que isso e resta descrever

melhor feições e registros morfológicos existentes após esse limite. Este trabalho se baseia na hipótese de que, após a seção de controle, há nos Latossolos, em especial no B latossólico e na zona de transição para o saprolito, registros morfológicos pouco descritos e eventualmente não compreendidos ainda da história evolutiva e da dinâmica pedogenética dos latossolos. Como segunda hipótese é postulado que há zonas importantes de bioturbação após os limites de profundidade descritos pelos zoólogos e que estas zonas estão associadas a mudanças paleoambientais.

A Depressão Periférica Paulista é um compartimento geomórfico escavado entre os planaltos ocidentais e atlântico na borda da Bacia do Paraná e assim nomeada por Moraes Rego em 1932. Há uma diversidade litoestratigráfica muito grande dentro do setor central da Depressão Periférica, destacando-se os sedimentos paleozóicos dos grupos Tubarão e Passa Dois, com interrupções nesta litologia por intrusões de rochas básicas mesozoicas da Formação Serra Geral. Segundo alguns autores, os topos de colinas amplas que ocorrem nesse setor, estão sobre uma cobertura neoceno-zóica (Soares e Landim, 1975; Penteado, 1976) denominada de Formação Rio Claro com depósitos descontínuos, muitas vezes associados a barramentos por soleiras de diabásio (Melo, 1995; Cooper et al, 2005).

Nessas superfícies, encontram-se Latossolos de textura variando de muito argilosa, argilosa e média. Com essa diversidade de materiais de origem e tipos de Latossolos, para este estudo escolheu-se um vale, na porção central da Depressão Periférica Paulista, esculpido pelo rio Piracicaba e seus afluentes com destaque na área escolhida para o Ribeirão Piracicamirim e Tijuco Preto (Vidal-Torrado e Lepsch, 1999). Os perfis de solo escolhidos (P1, P2 e P3) são representativos das variações regionais e se encontram todos na mesma superfície geomorfológica e numa elevação média de 590 m acima do nível do mar (Figura 1).

2. REFERENCIAL TEÓRICO

O solo é um corpo tridimensional aberto (influenciado por adições, transformações, translocações e remoções), sendo resultado da influência dos cinco fatores de formação (material de origem, clima, relevo, organismos e tempo). A presença de organismos, de 'vida', é responsável pela formação do solo, em que sua atuação resulta em efeitos que definem a diferença entre o que é solo e o 'não solo' (Lavelle e Spain, 2003).

Por muito tempo, creditavam que os efeitos resultantes do fator de formação (Jenny, 1941) 'organismos', foi somente relacionado a plantas superiores (Simonson, 1995). Entretanto, outras partes do que engloba a biota do solo não devem ser minimizados (Bal, 1982) como fator imprescindível na formação do solo. A fauna do solo pode atuar de diversas maneiras nos processos de formação do solo (Lavelle, 1997), atuando na alteração na temperatura e aeração do solo (Wood, 1988), a estrutura (Lee e Foster, 1991) e muitos outros atributos do solo (Lavelle, 1997). Porém, muito ainda pode ser explorado sobre atuação da fauna do solo (Lavelle, 2003). A zona de alteração e movimentação intensa pela fauna e a flora dos solos, é chamada de biomanto (Johnson, 1990).

Pouco se tem explorado como é o desenvolver deste biomanto em Latossolos. Johnson (1990) definiu biomantos, como sendo zonas diferenciadas na parte superior do perfil do solo formadas pela bioturbação; faunalmentos como sendo um tipo de biomanto formado pela escavação de animais (faunalturbação) e; floralmentos como sendo um tipo de biomanto formado, principalmente, pelo desenraizamento de árvores. E é por meio de toda a bioturbação que enormes quantidades de solo podem ser movimentadas e transformadas (Gabet et al., 2003). A atuação de organismos chamados de engenheiros do solo (macrofauna) são ditos como responsáveis pela microagregação e por modificações em atributos químicos, físicos e mineralógicos do solo (Lavelle et al., 1997; Schaefer, 2001; Botinelli et al., 2015; Jouquet et al., 2015B; Jouquet et al., 2016). A estabilidade dos agregados, a mineralogia dependendo do material de origem e os padrões na micromorfologia dependendo do nível de atividade no perfil, também podem ser alterados pela ação da fauna (Mujinya et al., 2013; Mujinya et al., 2010; Jouquet et al., 2016B).

Em estudos com Latossolos desenvolvidos no Congo sob atividade dos térmitas, houve uma diminuição no pH e um aumento no teor de carbono orgânico e de cargas

permanentes, sugerindo uma contribuição de minerais 2:1, quando comparado com os Latossolos circundantes (Mujinya et al., 2010).

Esses solos são relacionados a um intenso processo de intemperismo e bioturbação, resultando assim em solos profundos com coloração homogênea, com agregados estáveis, com uma predominância de caulinita e óxidos de ferro e alumínio (Buol, 2011). Pela necessidade de ambiente específico para manter um intenso grau de dessilicatização e o acúmulo residual de óxidos de alumínio e ferro, bem como argilas cauliniticas, os Latossolos ocorrem predominantemente em regiões tropicais e subtropicais (Wambeke et al., 1983; Schaefer, 2001). Esses solos apresentam horizonte diagnóstico B latossólico (Bw), que normalmente possui agregados granulares muito pequenos, também denominados microagregados ou, podem ocorrer com estruturas em blocos, muito comum em Latossolos amarelo (Stoops, 1983; Neto et al., 2009; Pragana et al., 2016; Costa, 2017). São influenciados pelos remontes verticais causados pela bioturbação homogeneizando o perfil (Eschenbrenner, 1986) o que também contribui para o impedimento da formação de um gradiente textural significativo (Ker et al., 2012).

Esses remontes verticais podem movimentar diferentes materiais presentes no solo que podem dar um indicativo dessa atividade, a exemplo disso, os carvões, que por meio da inversão em suas idades, podemos inferir um movimento pela fauna do solo (Gouveia e Pessenda, 2000; Boulet et al., 1995). Esses carvões são comumente encontrados nos Latossolos e são resposta de paleoincêndios durante as oscilações climáticas do quaternário, bem como pela presença do homem (Silva e Vidal-Torrado, 1999; Gouveia e Pessenda, 2000; Gouveia et al., 1999).

Os Latossolos possuem uma correspondência com os Oxisols (horizonte óxico) e Ferralsols (horizonte B ferrálico) na classificação americana USDA Soil Taxonomy (Soil Survey Staff, 1999) e FAO (IUSS Working Group WRB 2022), respectivamente.

Sob o questionamento de até onde se dá o biomanto em condições tropicais este estudo foi desenvolvido, para observar como e, até onde a bioturbação atuou e atua em perfis de Latossolos, que apesar de serem ditos como solos profundos, a maioria dos estudos detalhados se dá dentro da seção de controle (até 200 cm). Diante disso ainda existe uma lacuna que necessita de investigação para melhor compreender os processos envolvidos na gênese desses solos, desde a superfície, até o saprolito. Assim o objetivo deste trabalho é avaliar e quantificar feições de bioturbação por meio de um estudo micromorfológico

(Rodrigues, 2015), em perfis de Latossolos texturalmente diferentes além da seção de controle, (abaixo dos 200 cm), desenvolvidos a partir diferentes materiais de origem e com evidente acumulação de fragmentos de carvão em subsuperfície, bem como usar idades obtidas através dos carvões como um indicativo desse movimento. O estudo foi conduzido em paralelo com os de Chiapini (2021) e Marques (2021) feitos Paraná e no Alto Paranaíba (MG), respectivamente. Estes três subprojetos fizeram parte do Projeto FAPESP 2019/20788-2.

3. MATERIAL E MÉTODOS

3.1 Localização dos perfis

Os solos estudados estão localizados no setor central da Depressão Periférica, no município de Piracicaba, estado de São Paulo (Figura 1). O clima regional é classificado segundo Koppen como mesotérmico subtropical úmido (Cwa) com chuvas no verão (novembro a janeiro) e clima seco durante o inverno (de junho e agosto).

A região é marcada por uma grande diversidade litoestratigráfica, destacando-se as Formações paleozoicas Itararé (carbonífero), Tatuí, Irati e Corumbataí (permiano), com interrupções por intrusões de rochas básicas (jurássico-cretáceo) da Formação Serra Geral (IPT, 1981). Os topos elevados e planos contam também com cobertura Neocenozóica (Soares e Landim, 1976; Penteado, 1976) denominada Formação Rio Claro e que apresenta depósitos descontínuos, muitas vezes associados a barramentos por soleiras de diabásio (Melo, 1995; Cooper, 1996). A área de estudo foi escolhida de modo a ser representativa das ocorrências de latossolos em amplas colinas de topos planos, que correspondem a remanescentes da última superfície de aplainamento ocorrida na Depressão Periférica Paulista (Penteado, 1976; Vidal-Torrado, P. 1994). A área tem essa grande diversidade geológica, com Latossolos variando de textura argilosa, muito argilosa a média. Trata-se de um vale esculpido pelo rio Piracicaba e seu afluente o Ribeirão Tijuco Preto (Vidal-Torrado, 1994). Nesta área há evidências de que os materiais de origem de alguns Latossolos podem ser materiais já previamente pedogeneizados, cabendo à hipótese de materiais policíclicos que foram submetidos à nova pedogênese (Vidal-Torrado & Lepsch, 1999; Marques, 2017).

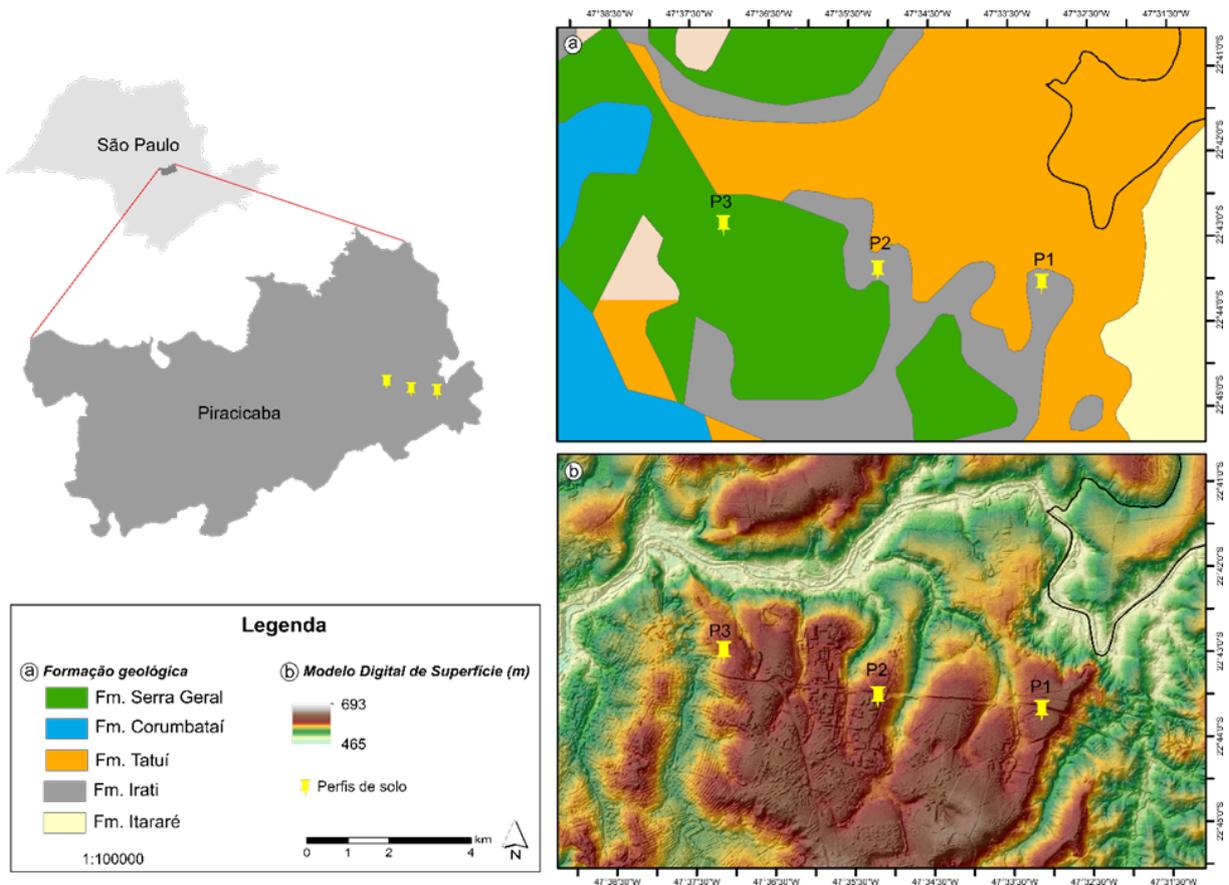


Figura 1. Localização, formação geológica e elevação dos perfis de solo. P3 encontra-se no mapa sobre a Formação Serra Geral, porém, ele está sob a Formação Rio Claro, que não aparece no mapa por um problema de escala. (Adaptado do Boletim IGG43, Descrição geológica e geográfica das folhas de Piracicaba e São Carlos, SP – 1965).

Foram selecionados três perfis em remanescentes de uma superfície de aplainamento dissecada e assentada sobre materiais de origem diferentes. O perfil 1 (P1) está localizado ($22^{\circ}43'40.54''S$ $47^{\circ}33'7.10''O$) sob argilitos retrabalhados da Formação Irati (Membro Taquaral), pertencente ao Grupo Passa Dois da Bacia do Paraná com contribuições de diques de Diabásio (Vidal-Torrado, 1994). O perfil 2 (P2) ($22^{\circ}43'30.87''S$ $47^{\circ}35'10.83''O$) está sob rochas básica, o diabásio da Formação Serra Geral, resultante do encaixe sobre os argilitos da Formação Irati. O perfil 3 (P3) ($22^{\circ}43'6.03''S$ $47^{\circ}36'56.55''O$) está sob um material retrabalhado de arenitos da Formação Rio Claro provavelmente assentado sob sedimentos argilosos da Formação Irati (Cooper et al., 2002). Os perfis estão localizados sob relevo suave ondulado à 600 m. P1 e P3 encontram-se sob cultivo de cana-de-açúcar e o P3 sob pastagem.

3.2 Abertura e descrição dos perfis de solo

Os perfis foram descritos e os horizontes separados e amostrados segundo Santos et., al. (2015). P1 670+ cm; P2 830+ cm, enquanto o perfil 3 (P3) foi avaliado até cerca de 1000 cm. Em P3 também foi realizada, uma sondagem até 1600 cm. Amostras deformadas para análises físicas, químicas, mineralógicas e geoquímicas foram coletadas por horizonte, enquanto amostras indeformadas em anéis volumétricos para densidade do solo foram coletadas por horizonte e na forma de monólitos para exames micromorfológicos foram retiradas nos horizontes e transições.

3.3 Análises laboratoriais

3.3.1 Análise física

O solo foi preparado por meio de peneiramento malha de 2 mm (Terra Fina Seca ao Ar). Para dispersão das argilas foi adicionada às amostras uma solução com hexametáfosfato de sódio (NaPO_3)₆ 0,015 mol L⁻¹. Em seguida, as amostras foram agitadas por 16 horas e a fração areia foi separada do silte e da argila por fracionamento físico, em peneira com malha de abertura de 0,05 mm e posteriormente seca e pesada. O silte e argila em suspensão foram colocados em proveta de 1L, onde a argila foi determinada pelo método do densímetro (Embrapa, 2017). O teor de silte foi obtido por diferença.

3.3.2 Análise química

As análises químicas e os procedimentos analíticos realizados foram os seguintes (Embrapa, 2017): pH (H₂O) e KCl 1 mol L⁻¹ utilizando relação solo:solução 1:2,5 após agitação e repouso por 30 minutos. Ca²⁺, Mg²⁺ e Al³⁺ foram extraídos com KCl 1 mol L⁻¹, enquanto a extração de H + Al foi realizada com acetato de cálcio 0,5 mol L⁻¹ a pH 7,0. Os elementos P, K⁺ e Na⁺ foram extraídos com solução de H₂SO₄ 0,0125 mol L⁻¹ + HCl 0,05 mol L⁻¹. Os teores de Ca²⁺ e Mg²⁺ foram determinados por espectrometria de absorção atômica; K⁺ e Na⁺ por fotometria de chama e Al³⁺ e H + Al por titulometria. Carbono orgânico foi realizado por oxidação por via úmida com dicromato de potássio (K₂Cr₂O₇) 0,4 mol L⁻¹.

3.3.3 Análise mineralógica

A matéria orgânica foi removida com peróxido de hidrogênio (H_2O_2), enquanto a remoção dos óxidos de ferro foi realizada com ditonito de sódio com $0,3 \text{ mol L}^{-1}$ de citrato de sódio + bicarbonato de sódio (DCB) (Mehra & Jackson, 1960). A fração areia foi separada em peneira de 0,05 mm de abertura, enquanto o silte e argila foram separados por centrifugação à 1.600 rpm por 3 minutos.

A identificação dos filossilicatos foi realizada após a realização dos seguintes tratamentos: i) Mg^{2+} na temperatura ambiente ($25^\circ C$), e; ii) Mg^{2+} com aquecimento à $550^\circ C$. Devido a não identificação de minerais expansíveis, os tratamentos com etileno glicol não foram necessários. A identificação dos minerais da fração areia e silte foi realizada em lâminas em pó e os minerais de argila em lâminas orientadas. Foi utilizado um DRX Rigaku Miniflex II controlado por computador com monocromador de grafite, radiação CuK α ($\lambda = 0,154 \text{ nm}$) e operado a 10 mA e 15 kV. Os difratogramas das frações granulométricas foram obtidos numa escala de 4 a $65^\circ 2\theta$ e velocidade angular do goniômetro de $1^\circ 2\theta \text{ min}^{-1}$.

3.3.4 Geoquímica

Os teores elementares de elementos maiores e traços dos horizontes foram obtidos por meio de espectrometria de fluorescência de raios X por dispersão de energia (EDXRF). As amostras foram passadas em peneiras de 0,053 mm e posteriormente prensadas com ácido bórico em uma prensa Vaneox Pressing Technology. Em seguida, os elementos foram determinados no equipamento S2 Ranger com detector de silício X-Flash com refrigeração.

3.3.5 Amostragem e preparação das amostras indeformados

Amostras indeformadas de solo foram coletadas ao longo dos perfis e contemplaram os horizontes e suas transições conforme o esquema apresentado na Figura 2.

As amostras foram levadas ao Laboratório de Micromorfologia da Esalq/USP. Os monólitos foram secos ao ar e em estufa à $40^\circ C$ com ventilação forçada. A impregnação foi realizada com resina de poliéster (Murphy, 1986), sendo a sua viscosidade reduzida por monômero de estireno na proporção 1:1. Em seguida, as amostras foram acondicionadas em dessecadores ligados a uma bomba de vácuo. Após o umedecimento das amostras com a

resina final, as mesmas foram totalmente cobertas com a mistura e mantidas sob vácuo por no mínimo 12 h, até o completo endurecimento das amostras (blocos). Os blocos foram cortados, colados à quente em lâmina de vidro polida e desbastados até a espessura aproximada de 30 μm . As lâminas delgadas foram descritas principalmente em lupa (fotoestereoscópio Zeiss) e detalhes foram observados e fotografados em microscópio petrográfico Zeiss (Bullock et al., 1985). Detalhes metodológicos constantes em Castro e Cooper (2019) e Stoops (2021).

Para determinação da densidade do solo, amostras indeformadas foram coletadas e levadas ao laboratório pra determinação da densidade pelo método do anel volumétrico (Teixeira et al., 2017).



Figura 2. Esquema de amostragem das amostras para análises micromorfológicas.

3.4 Análises micromorfológicas

Para a descrição das feições biológicas e quantificação da bioturbação foi adotado protocolo similar ao descrito por Rodrigues (2019) e Chiapini (2021). As feições descritas

como preenchimentos, ou alinhamento de grãos, excrementos, poros com paredes picotadas ou com qualquer feição que possa indicar atividade de origem biológica, foram utilizados para quantificação (Chiapini, 2021). Nos blocos polidos uma área representativa (5 x 7,6 cm) foi selecionada e fotografada sob iluminação UV e, em seguida, nas imagens, as feições pedológicas que indicassem atividade biológica (bioturbação) foram delineadas e quantificadas utilizando o programa Image J (Figura 3). A porcentagem de bioturbação foi calculada para cada bloco polido de acordo com a seguinte equação:

$$\text{Bioturbação (\%)} = (ATCBBP/ATBP)*100;$$

ATCBBP - Área total de características biológicas no bloco polido,

ATBP - Área total representativa do bloco polido

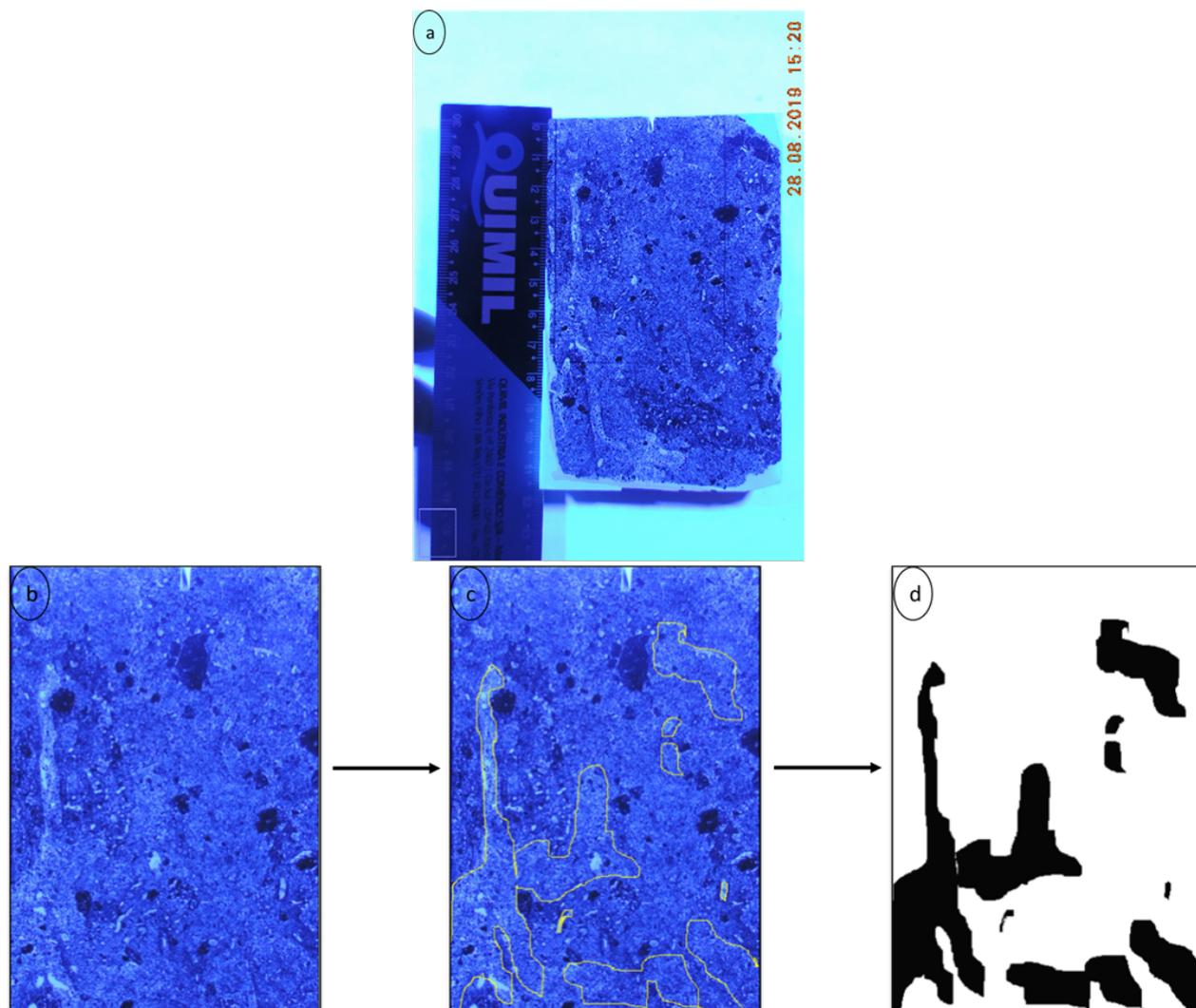


Figura 3 – Esquema representativo da delimitação das áreas com características biológicas. a) imagem bruta em luz UV; b) recorte utilizado como ATRBP (área total representativa do bloco polido) e para delimitação das características biológicas; c) delimitação de algumas áreas com características de atividade biológica; d) formas em preto das áreas com características de atividade biológica usada em ATCBBP (área total de características biológicas no bloco polido).

3.5 Datação por carbono 14 (^{14}C)

A ocorrência sistemática de carvões nos latossolos da Depressão Periférica Paulista (Vidal-Torrado, 1994; Cooper et.al, 2002; Gouveia e Pessenda, 2000) foi motivo de sua descrição e amostragem nos 3 perfis. Carvões foram coletados com auxílio de pinça em profundidades específicas para evitar qualquer tipo de contaminação. Aproximadamente 5 Kg de solo foram coletados por horizonte e, após submetidos à flotação, foram secos ao ar e pesados conforme Gouveia e Pessenda (2000).

As amostras foram enviadas ao Laboratório de Datação de Carbono 14 do CENA/USP. A datação foi realizada pelo método de grafitação (Pessenda et al., 1996). A idade ^{14}C é expressa em anos antes do presente (anos AP), normalizada a -25‰ (PDB), sendo considerado o presente o ano de 1950. As idades foram calibradas no software Calib Radiocarbon Calibration 8.2 e são apresentadas anos calibrados (AC).

3.6 Uniformidade do perfil

O estudo de uniformidade do perfil foi feito através da interpretação de relações já estabelecidas em estudo de solos e sedimentos. Tais relações são: Relação Ti/Zr; índice UV I que utiliza dados da fração areia fina, silte e areia total; índice UV II que consiste na relação de silte/areia (Chittleborough et al., 1984; Tsai and Chen, 2000; Schaetzl, 1998; Asady and Whiteside, 1982). Para relação Ti/Zr a descontinuidade litológica é apontada para um conjunto de dados que possua um coeficiente de variação (CV) maior que 25% (Chittleborough et al., 1984). Para o índice UV I, aponta a presença de descontinuidade no material para valores maiores que 0,6 (Tsai and Chen, 2000). No índice UV II a descontinuidade é identificada quando apresenta valores maiores que 0,37 (Asady and Whiteside, 1982).

4. RESULTADOS

4.1 Caracterização morfológica dos solos

Os atributos morfológicos dos três perfis estudados encontram-se na Tabela 1. Os atributos químicos e físicos encontram-se nas Tabelas 2 e 3, respectivamente. Os perfis em estudo estão apresentados na Figura 3.



Figura 3. Fotos dos perfis estudados em Piracicaba. a) Perfil 1, Área de Empréstimo; b) Perfil 2, Delphi; e c) Perfil 3, Aeroporto.

Todos os horizontes do P1 apresentam cor bruno-avermelhado-escuro (2,5YR 2,5/4, 2,5YR 3/4, úmida). Estrutura do tipo blocos subangulares com grau moderado de tamanho de médio a grande foi encontrada nos horizontes transicionais BA e BC e nos horizontes descritos como Bw3 e Bw5 e no horizonte C. Por outro lado, o horizonte superficial e os

horizontes latossólicos apresentam estrutura granular, muito pequena de grau forte. A consistência variou de muito friável a friável, plástica e pegajosa até o horizonte Bw2 (166 cm), onde passou a firme, muito plástica e muito pegajosa. Nesse perfil foi identificada a ocorrência de uma faixa de carvão que inicia em 85 cm e se estende até 200 cm. Abaixo dos 200 cm (seção de controle) encontra-se o argilito semibrando e sílex alterado à 670 cm da formação Iratí, Membro Taquaral. Raízes estão presentes ao longo de todo o perfil se tornando ausente a partir de 258 cm de profundidade.

O P2 apresenta cores variando entre (2,5YR 3/4) bruno-avermelhado-escuro na parte superficial do perfil e (2,5YR 4/6) vermelho em profundidade. A semelhança do P1, a estrutura nos horizontes A, AB é uma mescla de blocos subangulares pequenos de grau moderada, com uma predominância de uma estrutura, granular pequena moderada e nos horizontes Bw é forte, pequena granular, enquanto os horizontes BA, BC e C são constituídos por blocos subangulares médios ou grandes de grau moderado. A consistência variou de muito friável a friável, plástica e pegajosa até o horizonte Bw2 (255 cm), onde passou a firme, muito plástica e muito pegajosa. Essa consistência se manteve até o nível de ocorrência de blocos de sílex alterado (560 cm), onde passou friável, ligeiramente plástica e plástica e ligeiramente pegajosa e pegajosa. Duas faixas de carvão foram encontradas entre 75-120 cm e entre 150-200 cm. Em 505 cm inicia um horizonte concrecionário (EMBRAPA, 2018) constituído por 80% de material nodular com predomínio de nódulos típicos de ferro. Entre 560-610 cm foi encontrado sílex, com uma estrutura em blocos subangulares de tamanho médio e grau moderado, a consistência é friável, ligeiramente plástico e ligeiramente pegajoso. A partir de 800 cm ocorre a alteração da rocha, o diabásio, da formação Serra Geral em evidente processo de alteração química. Raízes estão presentes ao longo de todo o perfil se tornando ausente a partir de 295 cm de profundidade.

No P3 a cor é vermelho amarelada (5YR 4/4; úmida) no horizonte superficial, transicional (AB) e nos horizontes latossólicos Bw1 até Bw5. Por outro lado os horizontes Bw6 e Bw7 são bruno-avermelhado (2,5YR 4/5; úmida) e os horizontes Bw8, Bw9 e Bw10 são vermelho escuro (2,5YR 3/5; úmida) Essas colorações mais bruno escuras diferentemente das cores mais avermelhadas dos outros perfis reflete os menores teores do óxido de ferro (hematita) nos arenitos retrabalhados da Formação Rio Claro. A estrutura do horizonte superficial e do AB é forte pequena granular, enquanto os horizontes latossólicos são constituídos por blocos subangulares de grau moderado e tamanho médio que se desfazem

em granular muito pequena e grãos simples quando o solo está mais úmido. O menor conteúdo de argila (textura franco argilo arenosa) não possibilita um maior desenvolvimento de agregados assim como determina a consistência variando de não plástica e não pegajosa a ligeiramente plástica e ligeiramente pegajosa em todo o perfil. A semelhança de P1 e P2, foi identificada faixas de carvão entre 40-60 cm e entre 100-180. Não foi possível alcançar o material de origem neste perfil mesmo após escavação até 9 m e tradagens até 16 m.

Os resultados das análises químicas (Tabela 2) mostram que os três perfis são distróficos, ou seja, saturação por bases inferior a 50%. A saturação por bases (V%), CTC (T), e carbono orgânico diminuem com o aumento da profundidade do perfil, isso ocorre nos perfis 1 e 3. A CTC dos três perfis deu abaixo de $4,1 \text{ cmol}_c \text{ kg}^{-1}$, e uma saturação por base inferior a 40%, com pH em KCl inferior a 5 e com ΔpH negativo, destacando assim, que os perfis não são ácidos.

O Perfil 1 é muito argiloso. Os teores de argila variam entre 437 g Kg^{-1} e 677 g Kg^{-1} com decréscimo em profundidade devido à proximidade do material rochoso subjacente, que reflete no aumento da fração areia (Tabela 3). O perfil 2 é argiloso derivado da degradação do diabásio, com alguma influência da rocha encaixante mostrando teores de argila que variaram de 349 g Kg^{-1} a 634 g Kg^{-1} . O Perfil 3 é derivado de material retrabalhado de arenitos mesozóicos e tem textura franco argilo arenosa (ou textura média), com proporções de argila que oscilaram de 126 g Kg^{-1} em superfície e 227 g Kg^{-1} em subsuperfície, aumentando após os 350cm chegando a 290 g Kg^{-1} em 800cm.

Os perfis assim foram classificados:

P1 - LATOSSOLO VERMELHO DISTRÓFICO típico textura muito argilosa (SIBCS); Rhodic Ferralsol (WRB).

P2 - LATOSSOLO VERMELHO DISTROFÉRICO típico textura argilosa (SIBCS); Rhodic Ferralsol (WRB).

P3 - LATOSSOLO VERMELHO AMARELO DISTRÓFICO típico textura média (SIBCS); Haplic Ferralsol (WRB).

Tabela 1. Atributos Macromorfológicos

Hz	Profundidade (cm)	Cor			Estrutura ^a	Consistência	
		Matiz	Valor	Croma		Úmida ^b	Molhada ^c
P1 - LATOSSOLO VERMELHO Distrófico típico							
Ap	0-30	2,5 YR	3	4	Gr/Pq/F	MF	Pg/Pl
AB	30 - 57	2,5 YR	3	4	Gr/Pq/F	MF	Pg/Pl
BA	57 - 83	2,5 YR	2,5	4	BS/M/Mo	F	Pg/Pl
Bw1	83 - 134	2,5 YR	2,5	4	Gr/Pq/F	F	Pg/Pl
Bw2	134 - 166	2,5 YR	2,5	4	Gr/Pq/F	F	Pg/Pl
Bw3	166 - 260	2,5 YR	2,5	4	BS/M/Mo	Fi	MPg/MPl
Bw4	260 - 325	2,5 YR	2,5	4	Gr/Pq/F	Fi	MPg/MPl
Bw5	325 - 380	2,5 YR	2,5	4	BS/M/Mo	Fi	MPg/MPl
Bw6	380 - 438	2,5 YR	2,5	4	Gr/Pq/F	Fi	MPg/MPl
Bw7	438 - 530	2,5 YR	2,5	4	Gr/Pq/F	Fi	MPg/MPl
Bw8	530 - 570	2,5 YR	2,5	4	Gr/Pq/F	Fi	MPg/MPl
Bw9	570 - 620	2,5 YR	2,5	4	Gr/Pq/F	Fi	MPg/MPl
BC	620 - 635	2,5 YR	2,5	4	BS/G/Mo	Fi	Pg/Pl
CR	635 - 665	2,5 YR	4	6	BS/G/Mo	Fi	Pg/Pl
Rocha alt.	670+	Coloração variegada			-	-	-
P2 - LATOSSOLO VERMELHO Distrófico típico							
A	0 - 30	2,5 YR	4	4	Gr/Pq/F	MF	Pg/Pl
AB	30 - 75	2,5 YR	4	6	Gr/Pq/F	MF	Pg/Pl
BA	75 - 100	2,5 YR	4	6	BS/M/Mo	F	Pg/Pl
Bw1	100 - 175	2,5 YR	4	6	Gr/Pq/F	F	Pg/Pl
Bw2	175 - 255	2,5 YR	4	6	Gr/Pq/F	F	Pg/Pl
Bw3	255 - 295	2,5 YR	4	6	BS/M/Mo	Fi	MPg/MPl
Bw4	295 - 340	2,5 YR	4	6	Gr/Pq/F	Fi	MPg/MPl
Bw5	340 - 385	2,5 YR	4	6	Gr/Pq/F	Fi	MPg/MPl
Bw6	385 - 460	2,5 YR	4	6	Gr/Pq/F	Fi	MPg/MPl
Bw7	460 - 505	2,5 YR	4	6	Gr/Pq/F	Fi	MPg/MPl
Hz. Conc.	505 - 560	2,5 YR	4	6	BS/M/Mo	Fi	MPg/MPl
Silex	560 - 610	2,5 YR	4	6	BS/M/Mo	F	LPg/LPl
BC	650 - 730	2,5 YR	4	6	BS/G/Mo	F	Pg/Pl
C	730 - 830	2,5 YR	4	6	BS/G/Mo	F	Pg/Pl
Rocha alt.	830+	Coloração variegada			-	-	-
P3 - LATOSSOLO VERMELHO-AMARELO Distrófico típico							
A	0 - 10	5 YR	4	4	Gr/Pq/F	MF	NPg/NPl
AB	10 - 40	5 YR	4	6	Gr/Pq/F	F	NPg/NPl
BA	40 - 75	5 YR	4	6	BS/M/Fr	F	NPg/NPl
Bw1	75 - 120	5 YR	4	6	BS/M/Fr	F	NPg/NPl
Bw2	120 - 175	5 YR	4	6	BS/M/Fr	F	NPg/NPl
Bw3	175 - 258	5 YR	4	6	BS/M/Fr	F	NPg/NPl
Bw4	258 - 345	5 YR	4	5	BS/M/Mo	F	NPg/NPl
Bw5	345 - 425	5 YR	4	5	BS/M/Mo	F	NPg/NPl
Bw6	425 - 500	2,5 YR	4	5	BS/M/Mo	F	NPg/NPl

Bw7	500 - 560	2,5 YR	4	5	BS/M/Mo	F	NPg/NPl
Bw8	560 - 650	2,5 YR	3	5	BS/M/Mo	F	LPg/LPl
Bw9	650 - 780	2,5 YR	3	5	BS/M/Mo	F	LPg/LPl
Bw10	780 - 900	2,5 YR	3	5	BS/M/Mo	F	LPg/LPl

^a Estrutura predominante nos horizontes; Gr:granular, BS:blocos subangulares, Pq:pequena, M:médio, G:grande, F:forte, Mo:moderada; ^bMF:muito friável, F:friável, Fi:firme; ^cNPg:não pegajosa, LPg:ligeiramente pegajosa, Pg:pegajosa, MPg:muito pegajosa, NPl:não plástica, LPl:ligeiramente plástica, Pl:plástica, MPl: muito plástica.

Tabela 2. Atributos Químicos.

Horizonte	Prof. (cm)	pH	pH	Δ pH	K ⁺	Na ⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Al ³⁺	H + Al	SB ^f	t ^a	T ^b	V ^c	m ^d	C ^e
		H ₂ O	KCl													
P1 - LATOSSOLO VERMELHO Distrófico típico																
Ap	0-30	5,6	4,1	-1,5	0,100	0,400	0,000	0,000	0,200	3,500	0,500	0,700	4,000	12,5	28,6	13,2
AB	30 - 57	6,3	4,2	-2,1	0,100	0,400	0,000	0,000	0,500	3,700	0,500	1,000	4,200	11,9	50,0	9,5
BA	57 - 83	4,7	4,1	-0,6	0,004	0,002	0,003	0,001	0,131	0,305	0,009	0,140	0,314	2,8	93,7	6,0
Bw1	83 - 134	5,1	4,2	-0,9	0,002	0,001	0,005	0,001	0,075	0,244	0,009	0,084	0,253	3,6	89,2	5,1
Bw2	134 - 166	5,2	4,2	-1,0	0,001	0,002	0,002	0,000	0,073	0,251	0,006	0,079	0,257	2,2	92,7	3,2
Bw3	166 - 260	5,1	4,2	-0,9	0,002	0,001	0,002	0,000	0,065	0,236	0,004	0,069	0,240	1,8	93,8	4,1
Bw4	260 - 325	5,1	4,4	-0,7	0,001	0,002	0,002	0,001	0,005	0,168	0,006	0,011	0,174	3,5	45,3	1,9
Bw5	325 - 380	5,5	4,4	-1,1	0,002	0,002	0,001	0,001	0,035	0,158	0,006	0,041	0,164	3,5	86,0	1,9
Bw6	380 - 438	5,5	4,4	-1,1	0,002	0,002	0,000	0,001	0,038	0,153	0,005	0,043	0,158	3,2	88,4	1,3
Bw7	438 - 530	5,4	4,4	-1,0	0,002	0,003	0,000	0,002	0,034	0,132	0,006	0,040	0,138	4,5	84,6	0,0
Bw8	530 - 570	5,4	4,2	-1,2	0,003	0,001	0,000	0,000	0,070	0,215	0,005	0,075	0,219	2,1	93,9	1,3
Bw9	570 - 620	5,1	4,3	-0,8	0,003	0,002	0,000	0,000	0,069	0,183	0,005	0,074	0,188	2,5	93,7	0,6
BC	620 - 635	5,2	4,1	-1,1	0,002	0,003	0,000	0,000	0,171	0,223	0,005	0,176	0,227	2,1	97,3	15,3
CR	635 - 665	5,1	4,1	-1,0	0,001	0,001	0,000	0,000	0,150	0,178	0,003	0,153	0,181	1,6	98,1	0,6
Rocha alt.	670+	5,1	4,2	-0,9	0,002	0,003	0,000	0,000	0,098	0,119	0,005	0,103	0,124	4,0	95,2	1,9
P2 - LATOSSOLO VERMELHO Distroférico típico																
A	0 - 30	5,3	4,4	-0,9	0,019	0,002	0,021	0,006	0,019	0,378	0,048	0,067	0,426	11,2	28,4	19,1
AB	30 - 75	5,1	4,2	-0,9	0,005	0,002	0,014	0,002	0,060	0,444	0,023	0,083	0,467	5,0	72,1	18,5
BA	75 - 100	4,8	4,1	-0,7	0,002	0,002	0,009	0,001	0,135	0,558	0,014	0,149	0,572	2,5	90,4	19,1
Bw1	100 - 175	5,0	4,1	-0,9	0,005	0,008	0,007	0,001	0,095	0,559	0,022	0,117	0,581	3,7	81,5	18,5
Bw2	175 - 255	5,1	4,3	-0,8	0,002	0,003	0,002	0,001	0,038	0,241	0,007	0,045	0,248	2,8	84,4	6,4
Bw3	255 - 295	5,4	5,3	-0,1	0,002	0,002	0,000	0,000	0,040	0,084	0,004	0,044	0,088	4,8	90,5	2,5
Bw4	295 - 340	5,4	5,2	-0,2	0,002	0,002	0,000	0,001	0,001	0,084	0,005	0,006	0,090	6,1	15,5	0,3
Bw5	340 - 385	5,2	5,3	0,1	0,001	0,002	0,000	0,002	0,007	0,091	0,005	0,012	0,095	5,0	59,6	0,3
Bw6	385 - 460	5,1	5,2	0,1	0,001	0,002	0,000	0,002	0,001	0,074	0,005	0,006	0,079	5,8	17,9	2,5
Bw7	460 - 505	5,6	5,2	-0,4	0,006	0,013	0,000	0,001	0,000	0,081	0,021	0,021	0,102	20,7	0,0	1,0

Hs. Conc.	505 - 560	5,1	5,2	0,1	0,048	0,002	0,000	0,001	0,001	0,081	0,050	0,051	0,131	38,4	1,9	1,6
Silex	560 - 610	5,0	4,5	-0,5	0,033	0,002	0,000	0,001	0,029	0,144	0,036	0,065	0,179	19,9	44,9	1,3
BC	650 - 730	4,2	4,3	0,1	0,007	0,001	0,000	0,001	0,105	0,229	0,009	0,114	0,239	3,9	91,8	0,0
C	730 - 830	4,6	4,3	-0,3	0,009	0,002	0,000	0,001	0,089	0,231	0,012	0,101	0,243	4,7	88,5	0,0
Rocha alt.	830+	4,5	4,4	-0,1	0,008	0,001	0,000	0,001	0,065	0,215	0,011	0,076	0,225	4,7	86,0	0,6

P3 - LATOSSOLO VERMELHO-AMARELO Distrófico típico

A	0 - 10	5,2	4,3	-0,9	0,005	0,001	0,003	0,003	0,023	0,155	0,012	0,035	0,168	7,4	64,9	6,0
AB	10 - 40	5,4	4,4	-1,0	0,003	0,001	0,005	0,003	0,015	0,137	0,012	0,027	0,149	8,2	55,2	6,0
BA	40 - 75	4,8	4,2	-0,6	0,001	0,001	0,000	0,001	0,083	0,201	0,003	0,086	0,204	1,5	96,4	3,2
Bw1	75 - 120	4,9	3,9	-1,0	0,001	0,000	0,001	0,002	0,058	0,153	0,004	0,062	0,157	2,5	93,6	3,8
Bw2	120 - 175	4,8	3,9	-0,9	0,001	0,001	0,001	0,001	0,060	0,160	0,004	0,064	0,164	2,7	93,2	3,5
Bw3	175 - 258	4,8	4,0	-0,8	0,001	0,001	0,001	0,001	0,051	0,114	0,004	0,055	0,118	3,4	92,6	1,6
Bw4	258 - 345	4,7	4,1	-0,6	0,001	0,001	0,001	0,001	0,047	0,107	0,004	0,051	0,111	3,6	92,2	2,5
Bw5	345 - 425	4,7	4,1	-0,6	0,001	0,001	0,002	0,001	0,047	0,097	0,005	0,052	0,102	4,5	91,1	1,0
Bw6	425 - 500	4,9	4,1	-0,8	0,001	0,001	0,001	0,001	0,038	0,073	0,004	0,042	0,077	5,7	89,6	0,3
Bw7	500 - 560	4,7	4,2	-0,5	0,002	0,001	0,000	0,001	0,040	0,096	0,003	0,043	0,099	3,3	92,4	1,0
Bw8	560 - 650	4,7	4,2	-0,5	0,001	0,001	0,003	0,001	0,036	0,048	0,006	0,042	0,054	11,1	85,8	1,0
Bw9	650 - 780	4,7	4,1	-0,6	0,001	0,001	0,001	0,001	0,035	0,064	0,003	0,038	0,067	4,2	92,5	2,2
Bw10	780 - 900	4,6	4,2	-0,4	0,001	0,001	0,002	0,001	0,049	0,069	0,004	0,053	0,074	6,1	91,6	0,3
Tradagem	900 - 950	4,6	4,1	-0,5	0,001	0,002	0,000	0,001	0,048	0,073	0,004	0,052	0,077	5,7	91,6	0,0
Tradagem	950 - 1000	4,8	4,2	-0,6	0,002	0,002	0,000	0,001	0,052	0,076	0,005	0,057	0,081	6,5	90,8	1,6
Tradagem	1000 - 1050	4,7	4,1	-0,6	0,001	0,001	0,000	0,001	0,060	0,096	0,003	0,063	0,099	3,3	94,8	0,0
Tradagem	1050 - 1080	4,7	4,1	-0,6	0,001	0,001	0,000	0,001	0,068	0,076	0,003	0,071	0,079	3,6	96,0	2,2
Tradagem	1080 - 1100	4,7	4,1	-0,6	0,001	0,001	0,000	0,001	0,072	0,089	0,003	0,075	0,092	3,0	96,3	0,3
Tradagem	1100 - 1150	4,6	4,0	-0,6	0,001	0,001	0,000	0,001	0,079	0,092	0,003	0,082	0,095	3,1	96,4	1,0
Tradagem	1150 - 1200	4,6	4,0	-0,6	0,002	0,001	0,000	0,001	0,092	0,091	0,004	0,096	0,095	4,0	96,0	1,0
Tradagem	1200 - 1250	4,6	4,0	-0,6	0,001	0,001	0,000	0,001	0,106	0,091	0,003	0,109	0,094	3,2	97,3	0,3
Tradagem	1250 - 1300	4,6	3,9	-0,7	0,002	0,001	0,000	0,001	0,115	0,129	0,003	0,118	0,132	2,6	97,1	0,0
Tradagem	1300 - 1350	4,5	3,9	-0,6	0,002	0,001	0,000	0,001	0,126	0,117	0,004	0,130	0,121	3,2	97,1	2,5
Tradagem	1350 - 1400	4,6	3,9	-0,7	0,002	0,000	0,000	0,001	0,112	0,111	0,003	0,115	0,114	2,6	97,4	1,0

Tradagem	1400 - 1450	4,5	3,9	-0,6	0,003	0,001	0,000	0,001	0,110	0,117	0,004	0,114	0,121	3,3	96,5	1,0
Tradagem	1450 - 1500	4,5	3,9	-0,6	0,003	0,001	0,000	0,000	0,111	0,135	0,004	0,115	0,140	3,2	96,2	1,3
Tradagem	1500 - 1550	4,5	3,9	-0,6	0,003	0,001	0,000	0,000	0,126	0,119	0,005	0,131	0,123	3,8	96,4	1,6
Tradagem	1550 - 1600	4,5	3,9	-0,6	0,004	0,001	0,000	0,001	0,131	0,134	0,006	0,137	0,139	4,0	95,9	0,0

^aCTC efetiva; ^bCTC a pH 7,0; ^csaturação por bases; ^dsaturação por alumínio; ^ecarbono orgânico (g kg⁻¹); ^fsoma de base.

Tabela 3. Atributos Físicos.

Horizonte	Prof. ¹	Ds ^a	Areia Total	Silte	Argila	Relação Silte/Argila
	(cm)					
P1 - LATOSSOLO VERMELHO Distrófico típico						
Ap	0-30	0,8	244	168	588	0,3
AB	30 - 57	0,8	263	156	581	0,3
BA	57 - 83	1,1	264	149	587	0,3
Bw1	83 - 134	1,1	270	118	612	0,2
Bw2	134 - 166	1,1	267	138	595	0,2
Bw3	166 - 260	1,4	239	196	565	0,3
Bw4	260 - 325	1,1	245	150	605	0,2
Bw5	325 - 380	1,4	264	215	521	0,4
Bw6	380 - 438	1,1	298	253	449	0,6
Bw7	438 - 530	1,1	288	298	414	0,7
Bw8	530 - 570	1,1	282	313	405	0,8
Bw9	570 - 620	1,1	274	317	409	0,8
BC	620 - 635	1,2	198	377	425	0,9
CR	635 - 665	-	136	513	351	1,5
Rocha alt.	670+	-	142	460	398	1,2
P2 - LATOSSOLO VERMELHO Distroférico típico						
A	0 - 30	0,7	225	255	520	0,5
AB	30 - 75	0,8	212	243	544	0,4
BA	75 - 100	0,8	222	229	549	0,4
Bw1	100 - 175	1	228	199	574	0,3
Bw2	175 - 255	1	220	189	591	0,3
Bw3	255 - 295	1,5	191	197	613	0,3
Bw4	295 - 340	1,1	200	166	634	0,3
Bw5	340 - 385	1,1	210	184	606	0,3
Bw6	385 - 460	1,1	229	150	620	0,2
Bw7	460 - 505	1,1	249	141	610	0,2
Hz. Conc.	505 - 560	-	373	207	420	0,5
Silex	560 - 610	-	163	383	454	0,8
BC1	610 - 650	-	193	383	424	0,9
BC2	650 - 730	-	157	465	378	1,2
C	730 - 830	-	176	448	376	1,2
Rocha alt.	830+	-	202	450	349	1,3
P3 - LATOSSOLO VERMELHO-AMARELO Distrófico típico						
A	0 - 10	1,6	808	67	125	0,5
AB	10 - 40	1,8	748	78	175	0,4
BA	40 - 75	1,6	752	39	209	0,2
Bw1	75 - 120	1,6	765	25	210	0,1
Bw2	120 - 175	1,6	763	22	216	0,1
Bw3	175 - 258	1,6	777	26	197	0,1

Bw4	258 - 345	1,7	753	31	216	0,1
Bw5	345 - 425	1,7	710	30	260	0,1
Bw6	425 - 500	1,7	716	18	267	0,1
Bw7	500 - 560	1,7	698	44	258	0,2
Bw8	560 - 650	1,7	533	206	261	0,8
Bw9	650 - 780	1,8	547	183	270	0,7
Bw10	780 - 900	1,7	538	169	292	0,6

^adensidade

4.2 Mineralogia da fração areia

A fração areia (Figura 3a e 3b) dos perfis 1 e 3 apresentaram dominância absoluta de quartzo com alguma ocorrência de rutilo. Outros minerais opacos foram identificados no campo (exame com lupa e bolso) mas a difração de raios X não permitiu a identificação desses minerais talvez em função da dominância do quartzo e a cristalinidade desse mineral. O exame das areias no campo com apoio de lupa e magneto mostrou que as areias de P2 são constituídas principalmente por quartzo e magnetita, com provável ocorrência de ilmenita também. A mistura dessas areias em quantidades equivalentes (análise qualitativa), apoiam a tese de material de origem misto incluindo o diabásio e uma rocha sedimentar paleozoica encaixante, o que foi também evidenciado no campo em uma exposição de sílex e diabásio alterado.

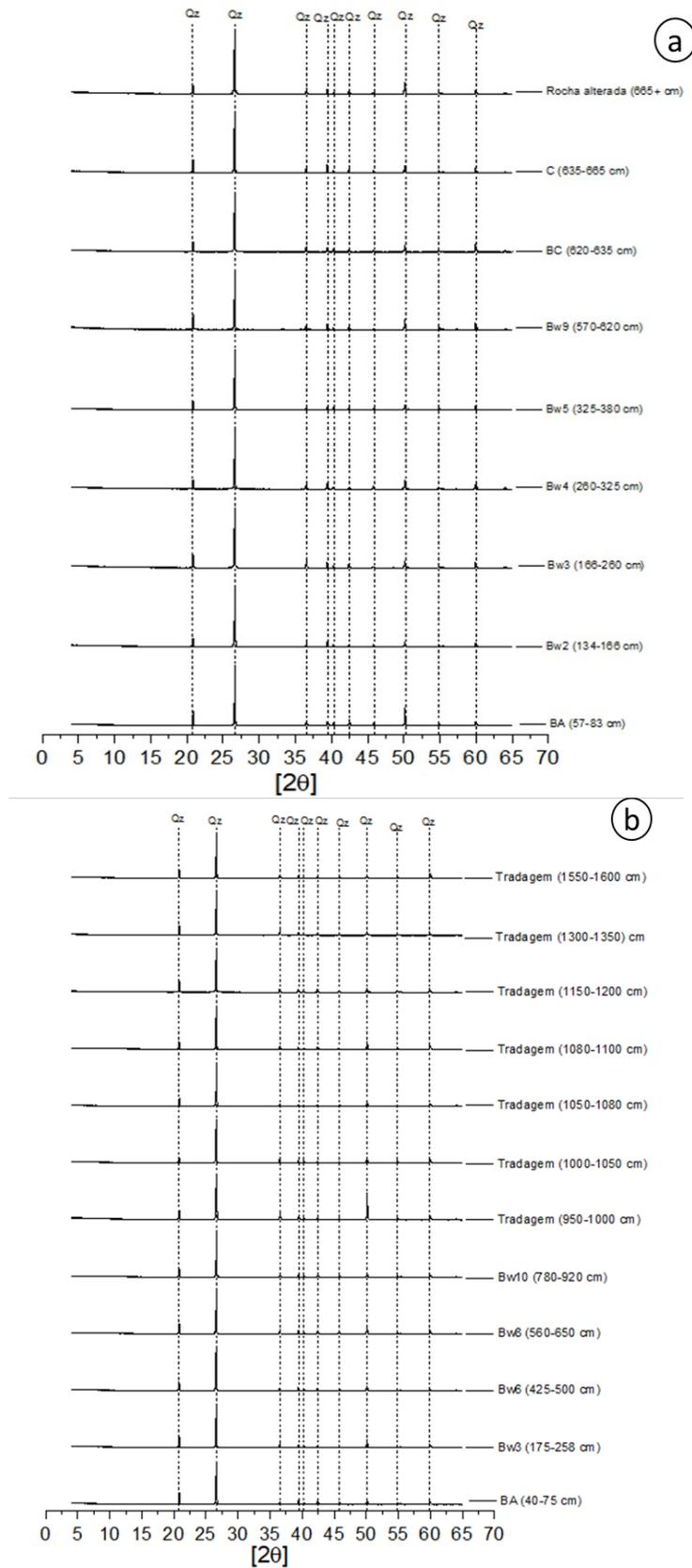


Figura 3 - Difratoograma de Raios-X dos perfis da sequência de Piracicaba (a: fração areia P1, b: fração areia P3). (Qz: quartzo).

4.3 Mineralogia da fração argila

Os resultados mineralógicos da fração argila dos perfis 1 e 3 (Figura 4a e 4b), que apresentaram um forte domínio da caulinita com menor ocorrência de gibsita. Estes resultados corroboram com os obtidos nas análises termogravimétricas (ATG) apresentados nas Figuras 5a e 5b, respectivamente, para P1 e P3. Em P1 a distribuição de caulinita e gibsita variaram pouco ao longo de todo o perfil de solo. A caulinita alcançou seu pico máximo em 150 cm de profundidade, no horizonte Bw3 com 98,7%, já a gibsita, teve sua maior contribuição aos 200 cm no horizonte B1 com 32,10%. De forma semelhante ao P1, no P3 tanto a caulinita com a gibsita tiveram uma distribuição pouco variável dentro perfil. Destacando uma incoerência com valor máximo de 103% para caulinita e, 5,79% de gibsita, na profundidade de 800 cm, no horizonte Bw10.

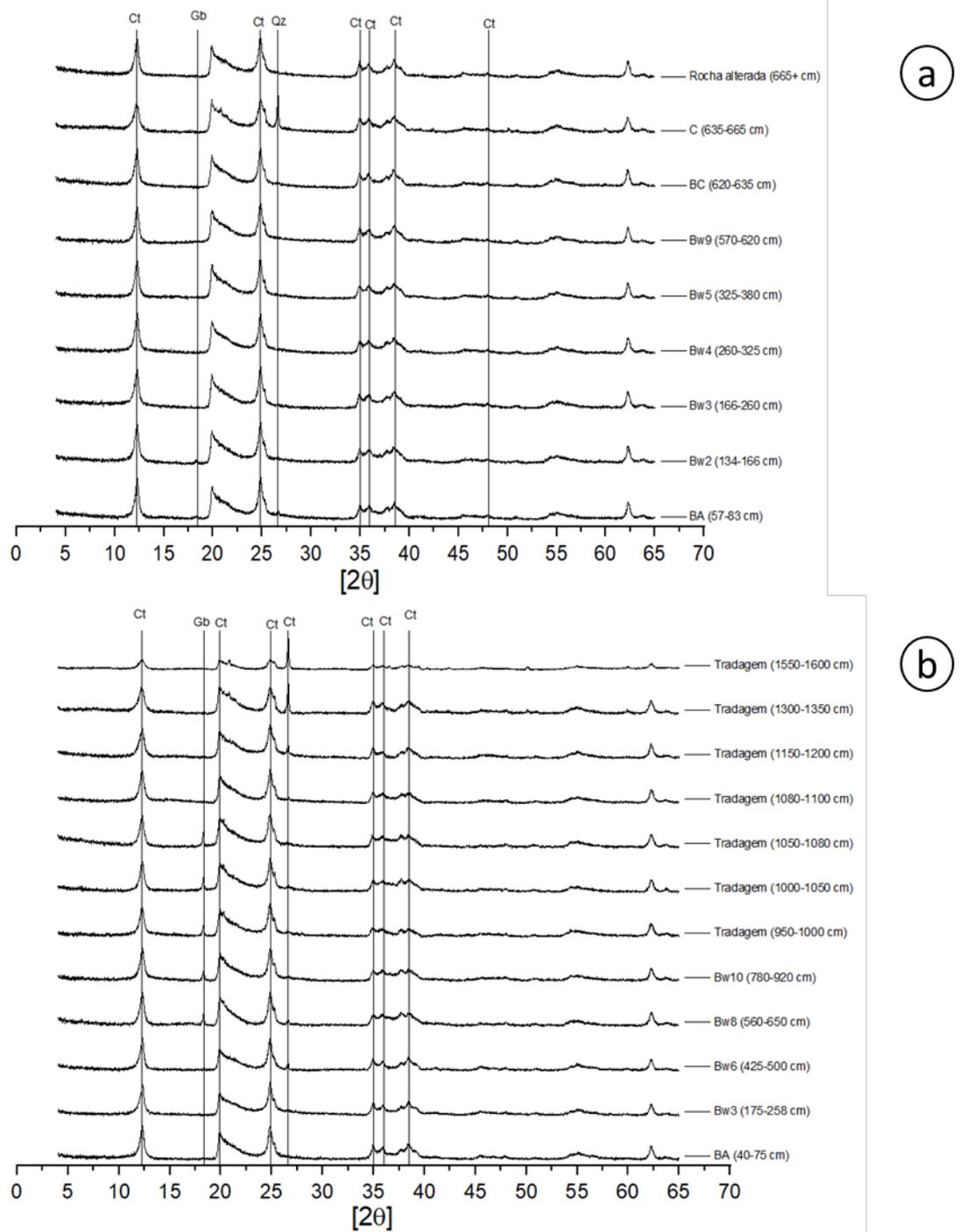


Figura 4 - Difratoograma de Raios-X dos perfis da seqüência de Piracicaba (a: fração argila P1, b: fração argila P3). (Ct: caulinita, Gb: gibbsite, Qz: quartzo).

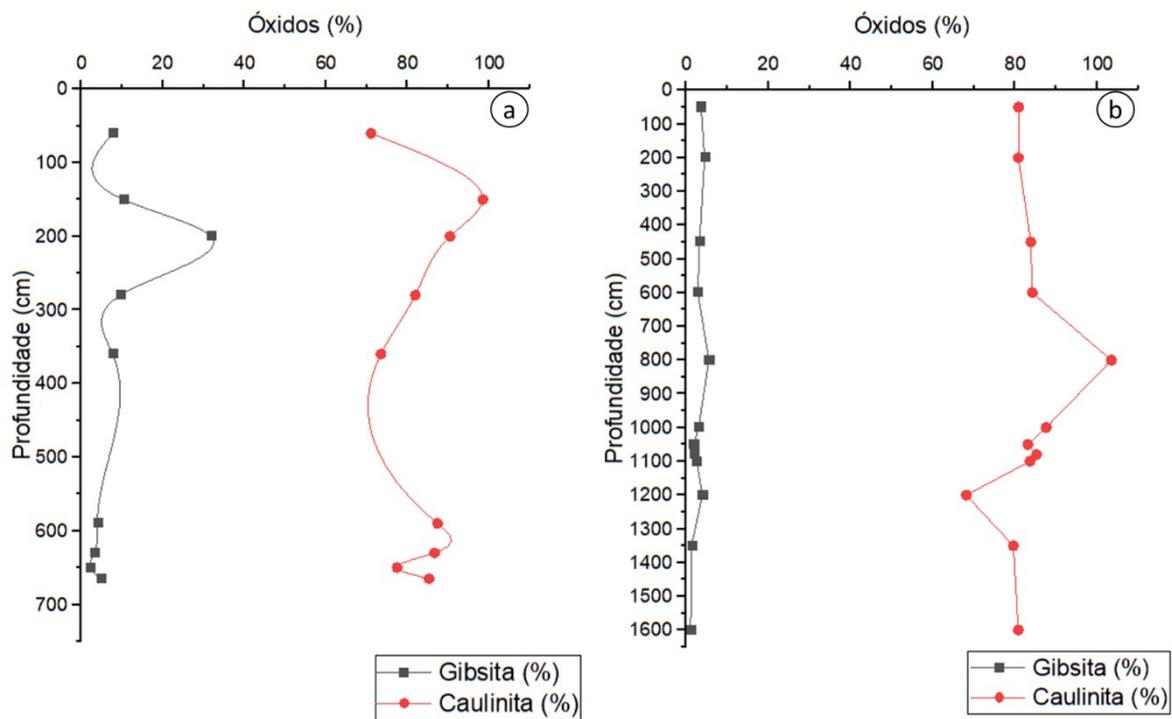


Figura 5 - Distribuição de caulinita e gibsita, por ATD e ATG, dos perfis da sequência de Piracicaba (a: P1, b: P3).

4.4 Geoquímica

Os dados obtidos por meio da análise de FRX (Figura 6a, 6b e 6c) obtivemos a distribuição dos óxidos predominantes nos perfis estudados. Tais dados mostram uma contribuição mais expressiva dos óxidos de Fe nos perfis 1 e 2 (Figura 6a e 6b, respectivamente). Por outro lado, observamos a pouca ocorrência destes mesmos óxidos no perfil 3 (Figura 6c).

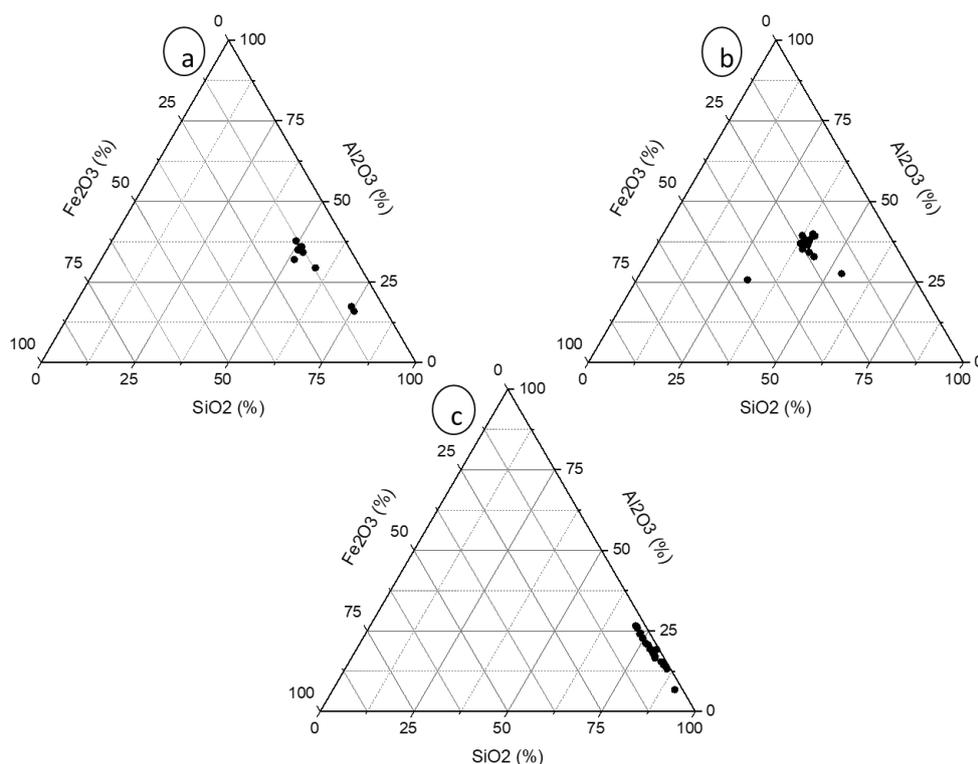


Figura 6. Distribuição dos teores de óxidos predominantes, por FRX, nos perfis da seqüência de Piracicaba (a: P1, b: P2, c: P3). Fe₂O₃: (oxi)hidróxidos de ferro, Al₂O₃: (oxi)hidróxido de alumínio, SiO₂: óxido de silício.

4.5 Datação dos fragmentos de carvões

A ocorrência de carvões enterrados em latossolos na Depressão Periférica Paulista é onipresente e há de representar eventos bem marcados de ocorrência de grandes incêndios devido a mudanças climáticas. A distribuição dos fragmentos de carvão ao longo do perfil está na Figura 7. As idades encontradas a partir das datações dos carvões estão na Tabela 4. Foi observado a presença de carvão na maior parte do perfil, abaixo dos 30cm de profundidade. Além disso a presença de faixas de carvões com variados tamanhos, também foram registradas, em macro e microescala (Figura 8). Tais faixas se estendem de em torno de 130 cm até 150 cm no P1, em cerca de 50 cm em P2 e, essas duas faixas foram encontradas simultaneamente no P3, estendendo-se de cerca de 50 cm até 90 cm e 130 cm até cerca de 200 cm. Muitos são os relatos de linhas ou faixas de carvões em profundidades similares às encontradas em P1, P2 e P3. (Miklós, 1992; Silva e Vidal-Torrado, 1999; Gouveia et al. 2002; Gouveia et al. 2003; Pessenda, 2004). Gouveia et al., 2003 encontrou idades e

tendências semelhantes aos resultados encontrados neste estudo, em Latossolos de Jaguariuna/SP e Botucatu/SP, inclusive com o comportamento de inversão de algumas idades.

Tabela 4. Idades dos carvões

Perfil	Profundidade (cm)	Idade ^{14}C (anos AP*)
P1	85-95	4520 \pm 28
P1	150-160	6867 \pm 36
P1	190-200	6593 \pm 33
P2	75-85	4190 \pm 32
P2	110-120	5789 \pm 36
P2	150-160	5709 \pm 32
P3	75-85	4270 \pm 34
P3	90-100	4931 \pm 40
P3	145-155	6461 \pm 40
P3	185-195	7350 \pm 39

*AP: antes do presente

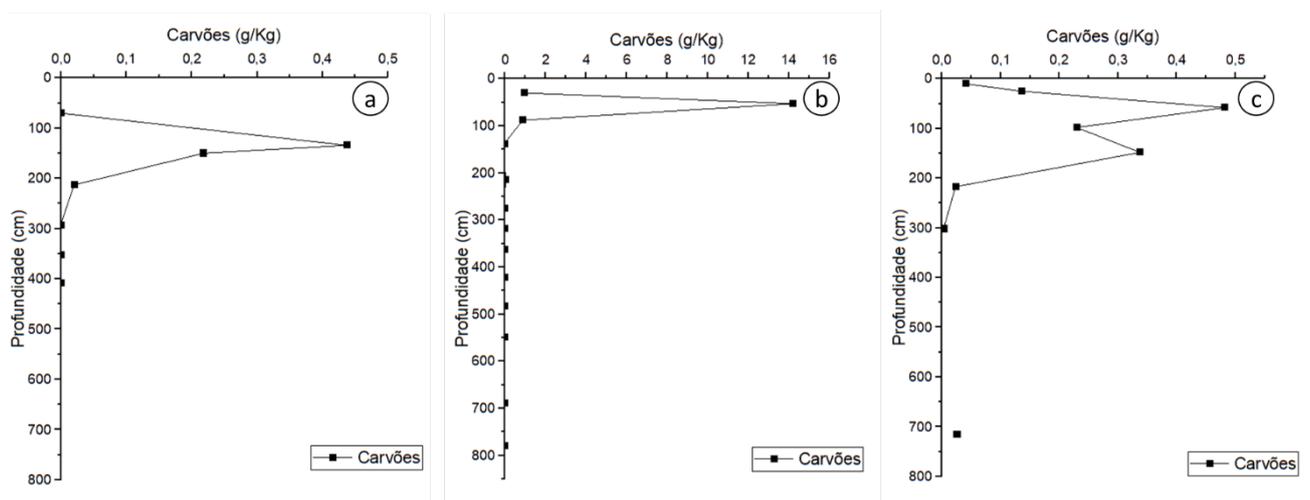


Figura 7 – Distribuição dos fragmentos de carvão em profundidade nos perfis trabalhados. a) P1; b) P2 e c) P3.

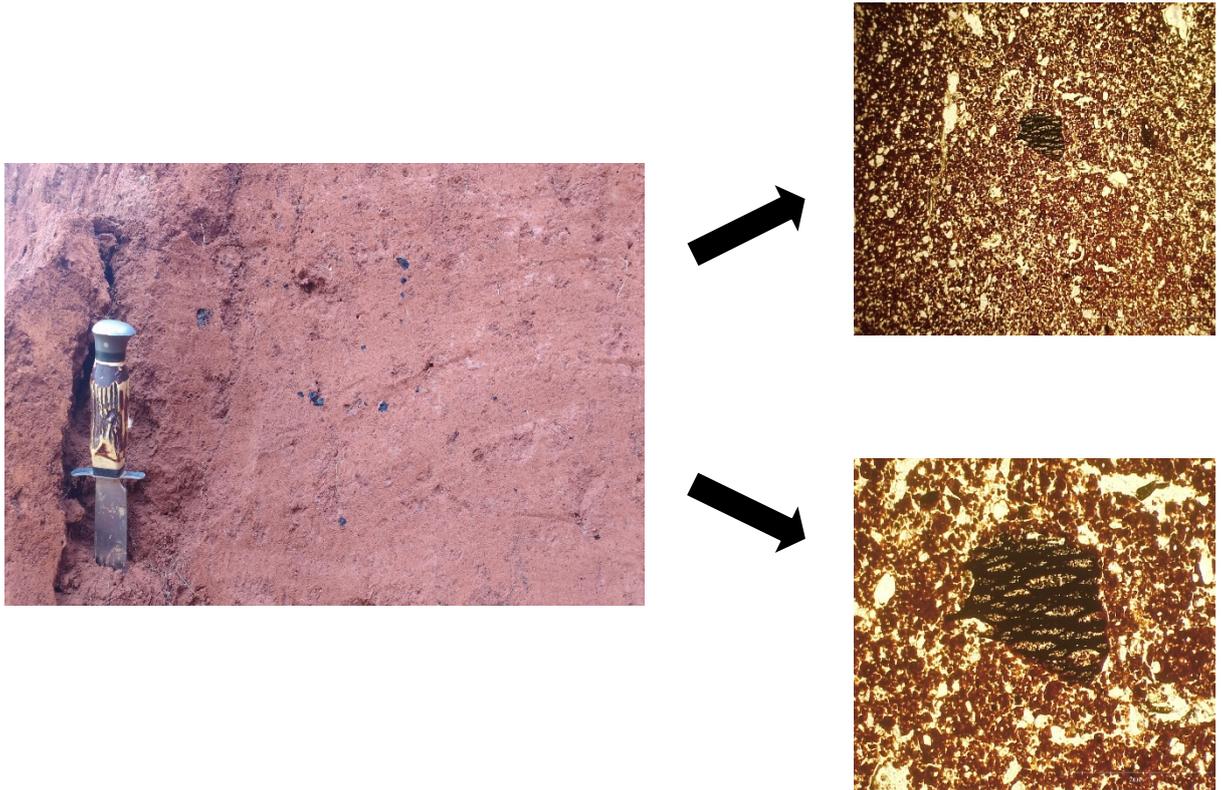


Figura 8 – Fragmentos de carvão em macro e microescala.

4.6 Bioturbação

Os dados de quantificação da bioturbação dos perfis estudados estão expostos na Figura 9. De modo geral todos os perfis estudados apresentaram bioturbação intensa em diferentes zonas (Figura 9a, 9b e 9c), algumas muito mais profundas do que a literatura cita para muitos animais como minhocas, enquitreídeos, ácaros principalmente, como será visto na seção de micromorfologia do solo. O P1 apresentou uma variação de 1,43 – 33,64 % na bioturbação sendo à uma profundidade de 630 cm e 100 cm respectivamente. No P2 essa variação foi ainda maior de 0 – 76,70 % de bioturbação estando à 960 cm e 20 cm, respectivamente com uma intensa variação numa faixa abaixo da seção de controle (200 – 600 cm). No P3 a bioturbação variou de 0,35 – 49,04 % ocorridas à 1040 cm e 900 cm. Neste caso, observou-se uma zona de maior intensidade da bioturbação a uma profundidade de 900 cm. Estes resultados e outros obtidos no mesmo projeto (FAPESP) em outras regiões do sudeste e sul do Brasil, são pouco conhecidos da literatura especializada em fauna edáfica (Lavelle & Spain, 2003) e escassas são as citações em trabalhos pedológicos.

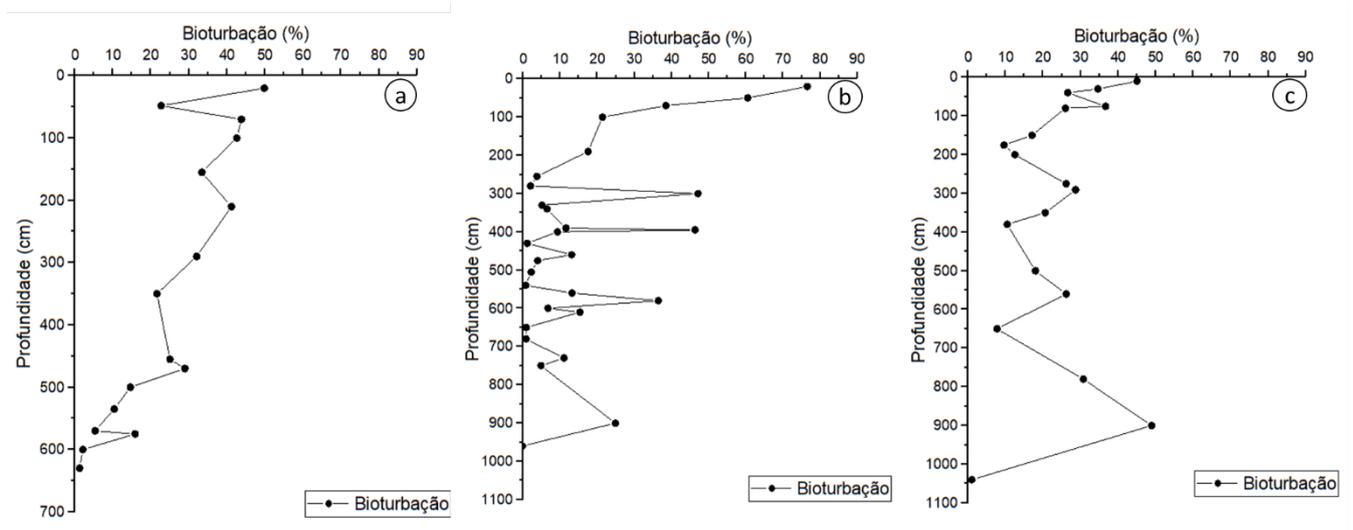


Figura 9 - Quantificação da bioturbação em (%). (a: P1, b: P2 e c: P3.)

4.7 Composição isotópica

Ao identificar os carvões no campo e no intuito de melhorar e apoiar a discussão sobre a origem deles com um indicador para reconstituição paleoambiental, foram feitas análises da composição dos isótopos de C, buscando entender se houve realmente mudanças de clima com base no delta ^{13}C . A composição isotópica dos solos é apresentado na Figura 10a, 10b e 10c, para os três perfis estudados, P1, P2 e P3 respectivamente. Os resultados obtidos complementam o trabalho de Rodrigues (2019), desenvolvido na mesma área de estudo, ao atingir maiores profundidades, bem como corroboram com os dados de reconstituição paleoambiental apresentados de maneira mais completa pela autora, com o estudo fitolítico. Em P1, os isótopos de ^{13}C atingiu os maiores valores em 650 cm (-27‰). Entre 230-520 cm esses valores tornaram-se constantes, variando entre -22‰ e 18‰. Em 200 cm foi observado um emporecimento isotópico, com valores da ordem de -24‰, de onde passou a um novo enriquecimento da ordem de -18‰. Esses valores indicam uma fitofisionomia constituída por uma mistura de plantas C3 com contribuição de plantas C4, indicando uma cobertura florística mais aberta. No P2 os isótopos de ^{13}C atingiu os maiores valores em 1070 cm (-25‰). Em 240 cm houve um enriquecimento isotópico, com valores da ordem de -15‰. Em 880 e 900 cm ocorreu um comportamento semelhante, um enriquecimento da ordem de -17‰. A partir de 830 cm essa oscilação de em valores isotópico é recorrente. Esses valores também indicam uma fitofisionomia de mistura, com

predomínio de plantas C3 e com uma contribuição de plantas C4, comportamento semelhante ao P1. Em P3, os valores isotópicos variaram entre -25‰ a 840 cm de profundidade e -15‰ em superfície. Em 40 cm houve um empobrecimento isotópico considerável da ordem de 23‰, pouco variável até o maior pico de empobrecimento à 840 cm de profundidade.

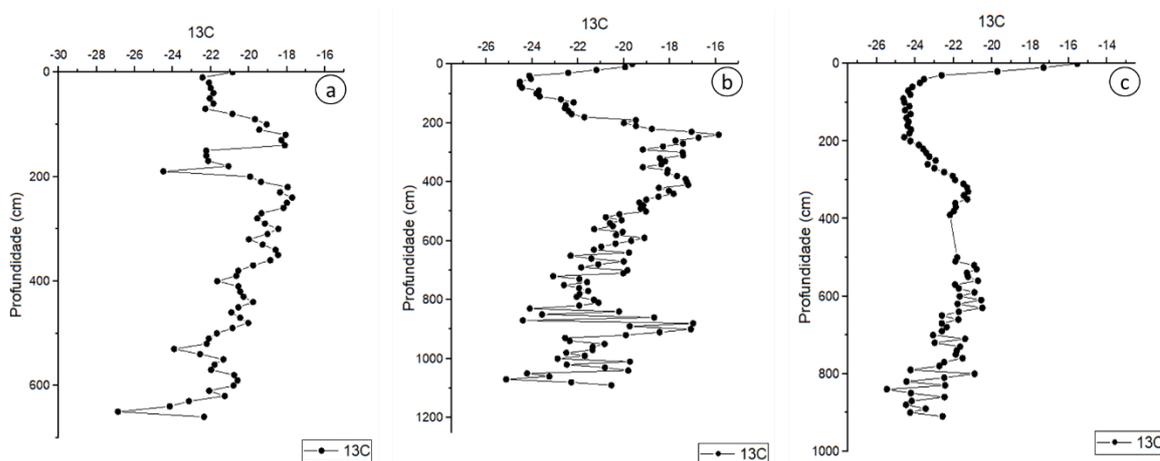


Figura 10 – Distribuição isotópica dos perfis de Piracicaba, SP a) P1, b) P2 e c) P3

4.8. Testes de uniformidade do perfil

A homogeneidade dos perfis, para fins de entendimento do continuum que foi bioturbado, foi testada utilizando índices de uniformidade de matérias do solo propostos por diferentes autores. Estes são: Relação Ti/Zr; índice UV I que utiliza dados da fração areia fina, silte e areia total; índice UV II que consiste na relação de silte/areia (Chittleborough et al., 1984; Tsai and Chen, 2000; Schaetzl, 1998). A relação Ti/Zr (Figura 11) indica a ocorrência de descontinuidade a partir dos resultados do coeficiente de variação (CV) dos dados. De acordo Chittleborough et al. (1984) considera-se material desuniforme aquele conjunto de dados com CV maior que 25%. Frente a isso, somente o perfil 3 apresentou desuniformidade no seu material (CV P1 = 15,9%; CV P2 = 12,5%; CV P3 = 30,2%). Diferente disso, o índice UV I (Figura 12) considera a presença de desuniformidade quando os seus valores são maiores que 0,6. Somente os perfis 2 e 3 mostraram isso. Para o índice UV II (Figura 13) considera-se o valor maior que 0,37 para considerar descontinuidade. Assim é possível observar muita que os dados apresentaram uma elevada variação, com a presença de vários picos como indicativo de pontos de descontinuidade.

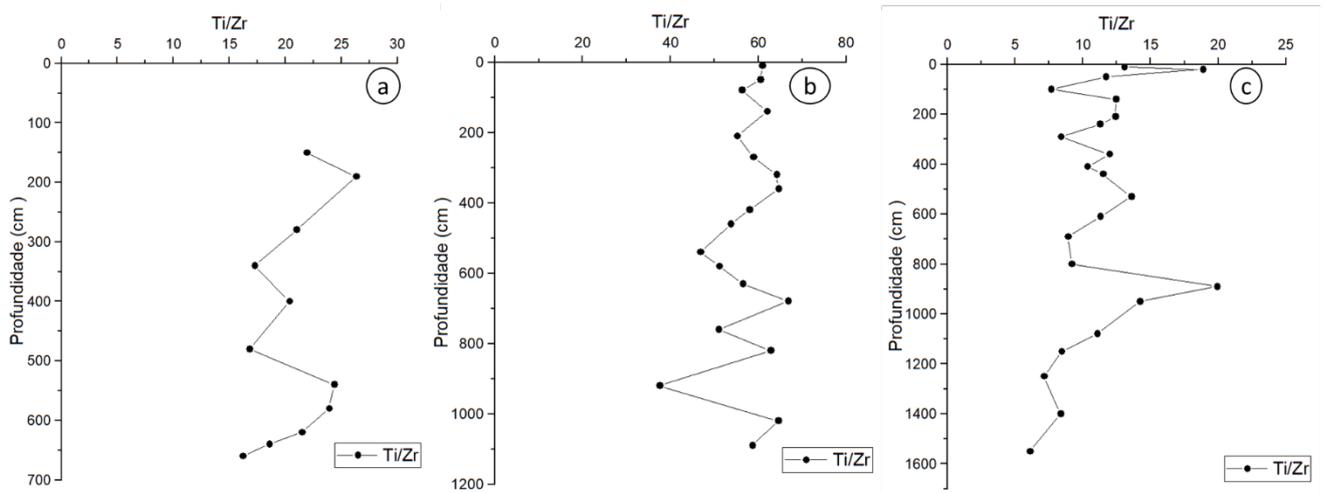


Figura 11 – Distribuição da relação Ti/Zr nos perfis da sequência de Piracicaba (a: P1, b: P2, c: P3). Coeficiente de Variação a: 15,9%; b: 12,5% e c: 30,2 %. Ti: Titânio, Zr: Zircônio.

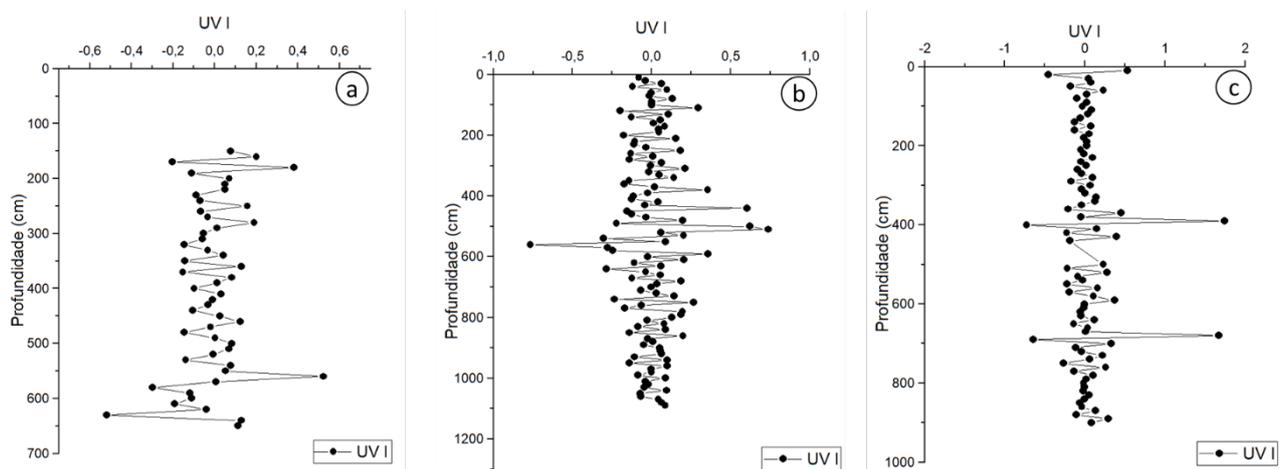


Figura 12 – Índice proposto por Tsai and Chen (2000) (por Cremens and Mokma, 1986) UV I. Dados dos perfis da sequência de Piracicaba (a: P1, b: P2, c: P3).

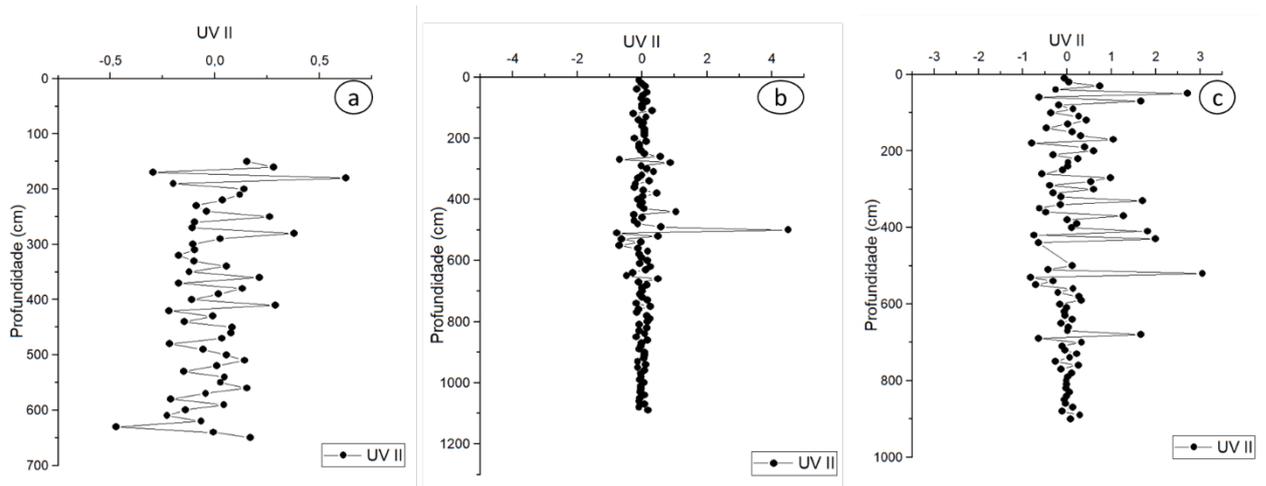


Figura 13 – Índice proposto por Asady and Whiteside (1982) UV II. Dados dos perfis da sequência de Piracicaba (a: P1, b: P2, c: P3).

4.9. Micromorfologia.

Os resultados micromorfológicos apresentam feições características de latossolos como a morfologia mostrou no campo. A figura 14 mostra a predominância de uma estrutura microgranular (enáulica) nos perfis 1 e 2. No P1 os horizontes Bw com predomínio de microagregados são mais frequentes, porém ocorrem horizontes Bw com estrutura em blocos subangulares. Em P2 observa-se uma microestrutura, de modo geral, semelhante ao P1. Porém, há a ocorrência de um horizonte concrecionário (nodular) com 55 cm de espessura (505 cm – 560 cm), bem como fragmentos de sílex (Figura 15). O P3 apresenta uma distribuição gáfica com alguns domínios enáulicos que são mais evidentes a partir de um aumento de argila em profundidade (Figura 16). Esse incremento de argila ajuda a preservar feições de bioturbação.

Diversas feições foram identificadas e descritas durante o estudo micromorfológico, porém, para fins de quantificação da ação da biológico no solo (bioturbação), feições descritas como preenchimentos, excrementos, poros com paredes picotadas, fragmentos de raízes ou com qualquer feição que possa indicar atividade de origem biológica de forma clara e, com possibilidade de ter sua área delimitada, foram somadas para o cálculo de quantificação da bioturbação. Para um maior detalhamento das descrições micromorfológica, vide ANEXO A.

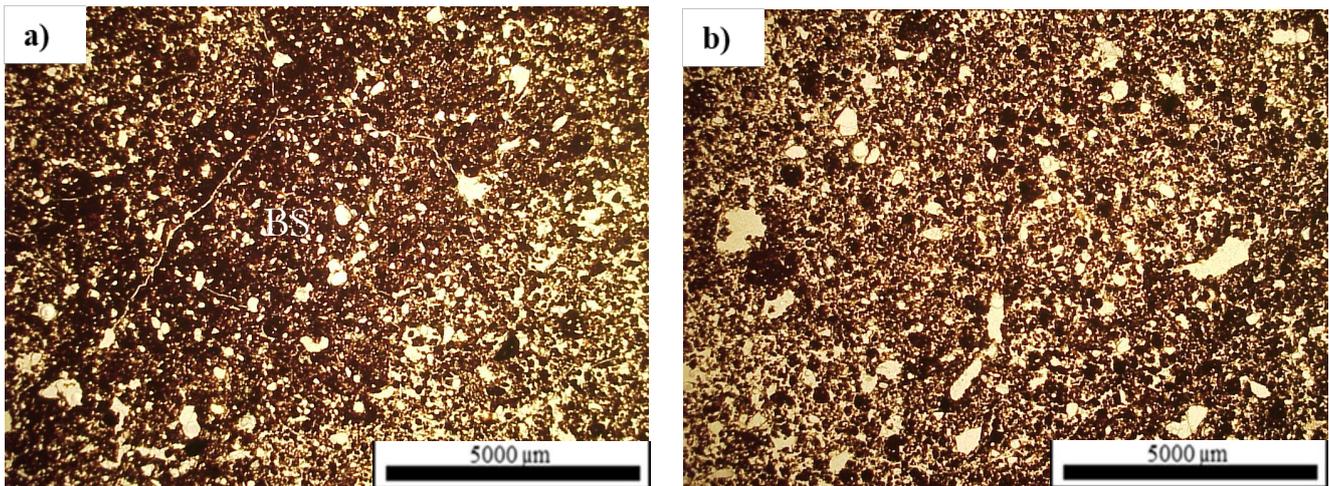


Figura 14 – Fotomicrografias do perfil 1 a) Bw3 com distribuição relativa porfírica com domínios enaulicos e uma estrutura em blocos; b) Bw7 com o predomínio da estrutura de microagregados em distribuição enaúlica. BS: blocos subangulares

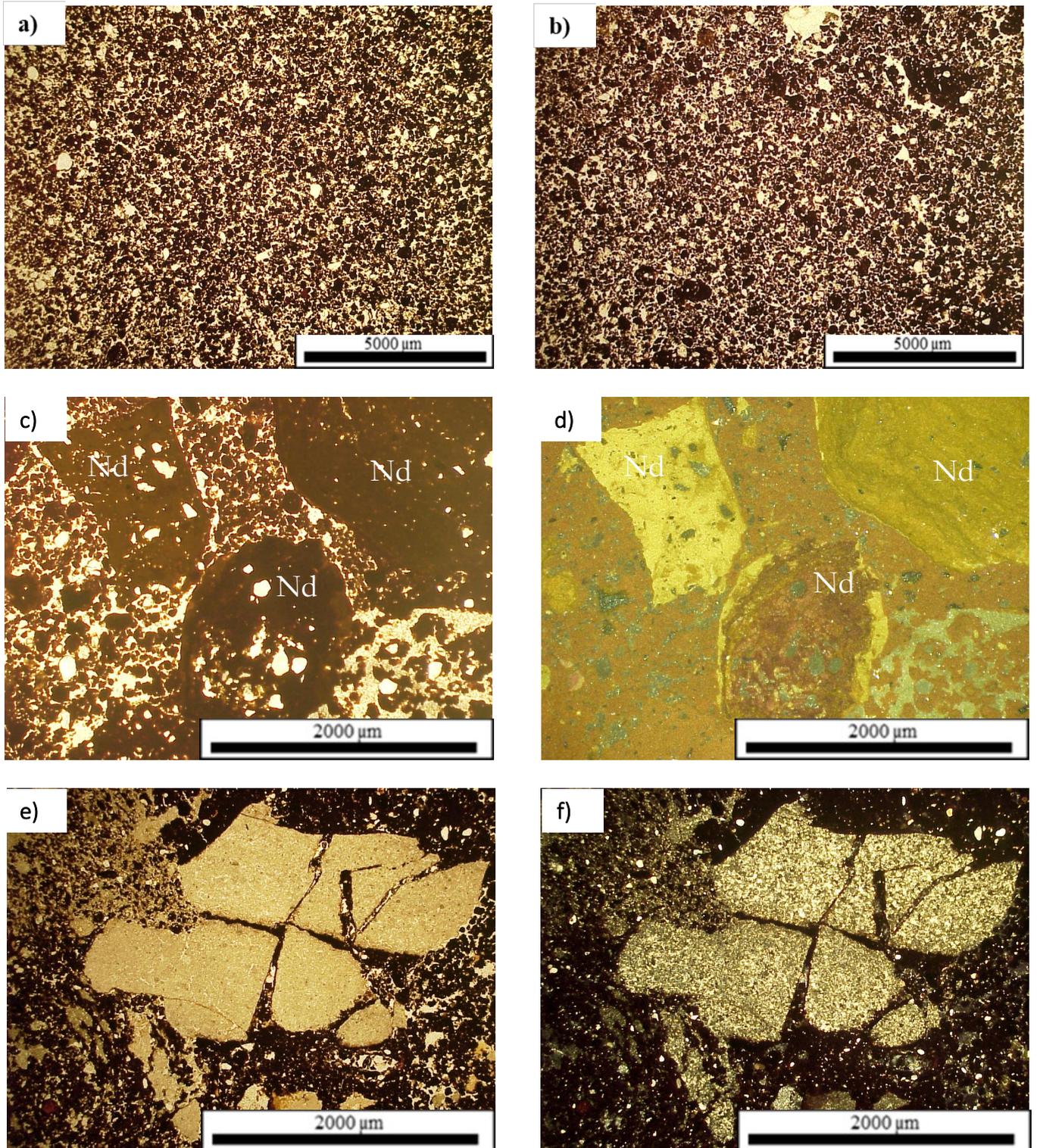


Figura 15 – Fotomicrografias do perfil 2 a) e b) Bw2 e Bw6 com distribuição relativa enaúlica e com o predomínio da estrutura de microagregados. c) e d) horizonte concrecionário com cerca de 75% da lâmina ocupada por nódulos típicos de Fe, luz normal e luz incidente, respectivamente. e) e f) fragmentos de sílex presentes abaixo do horizonte concrecionário (nodular), luz normal e PPL respectivamente. Nd: nódulos

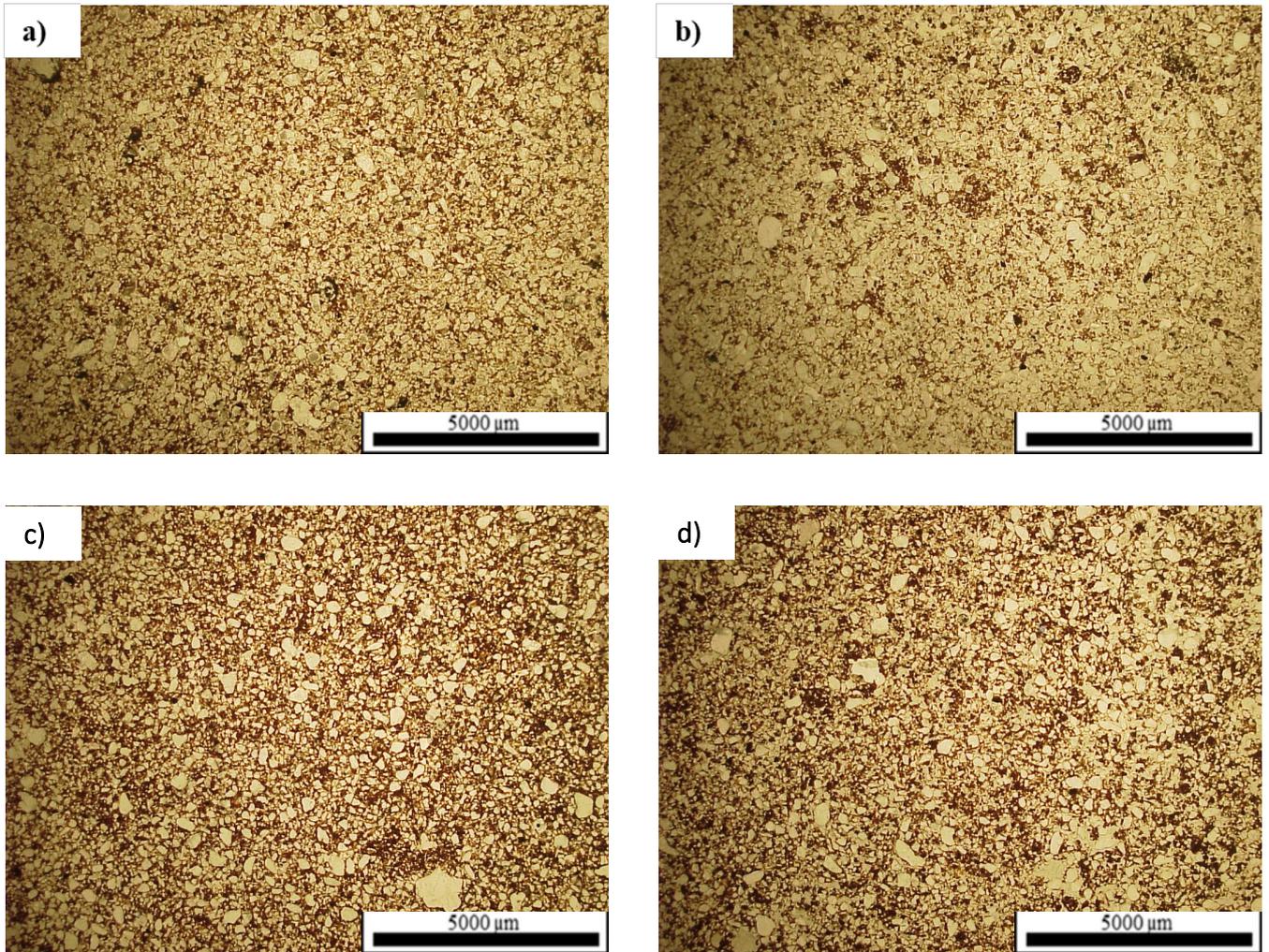


Figura 16 - Fotomicrografia do perfil 3 com uma distribuição relativa gerfúrica com domínios enaúlicos a) BA presença de pequenos microagregados zoogenéticos na matriz arenosa; b) Bw4, c) Bw9 e d) Bw10 com um pequeno aumento no teor de argila, suficiente para aumentar a ocorrência e preservação dos microagregados zoogenéticos.

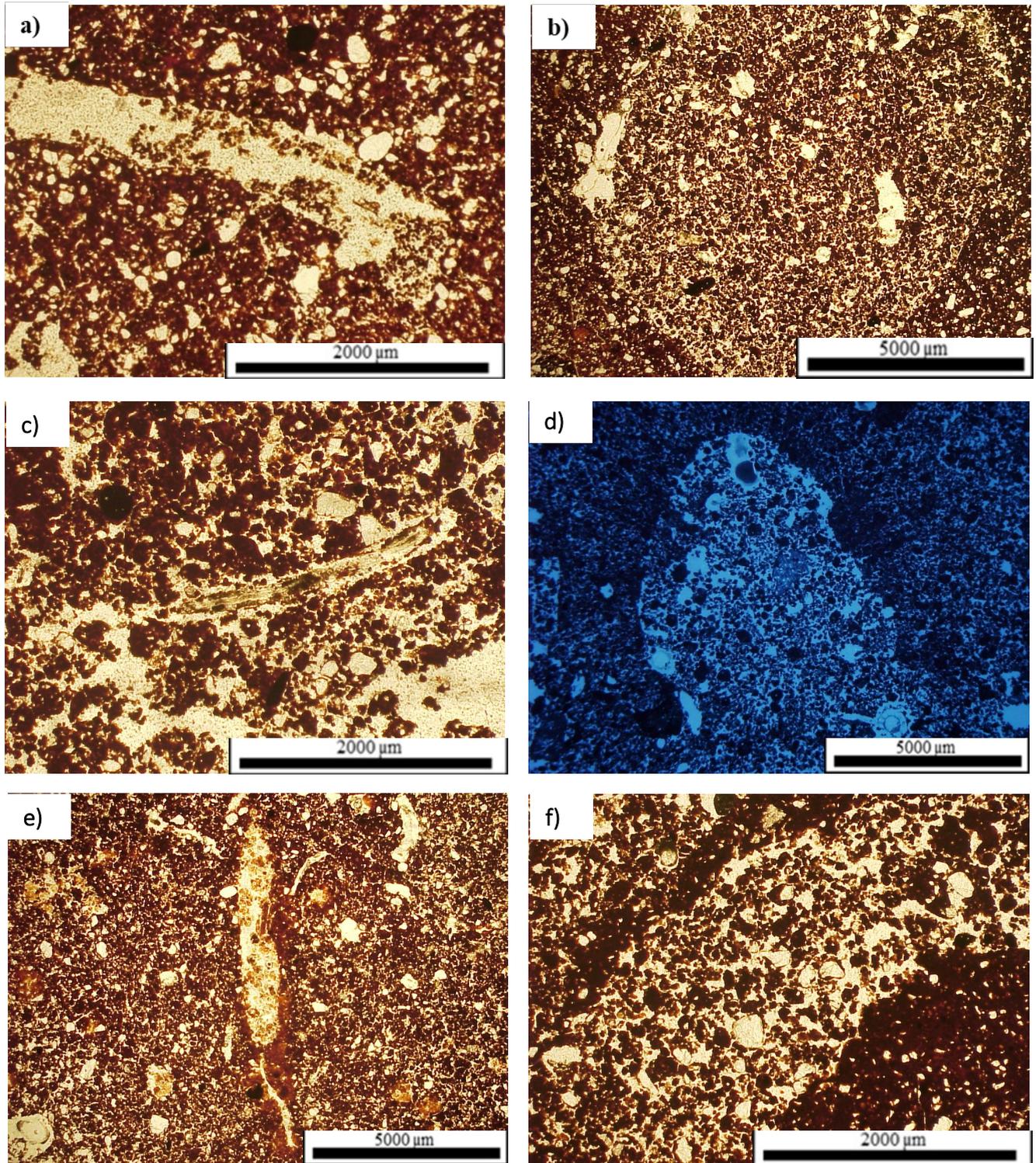


Figura 17 - Biofeições ao longo da seção de controle em P1. a) Bioporo preenchido por excrementos de enchytraédeos em matriz porfirica a 20cm. b) Preenchimento solto completo em canal biológico (raiz) a 40cm. c) Distribuição enaulica-porfirica e restos de raiz (corte transversal) a 80cm. d) Bioporo de seção irregular com preenchimento solto contínuo. e) Bioporo de seção elipsoidal e parede adensada (cupim) a 150cm. e) Preenchimento solto contínuo com excrementos recentes e paredes grossas do bioporo (cupim) a 150cm.

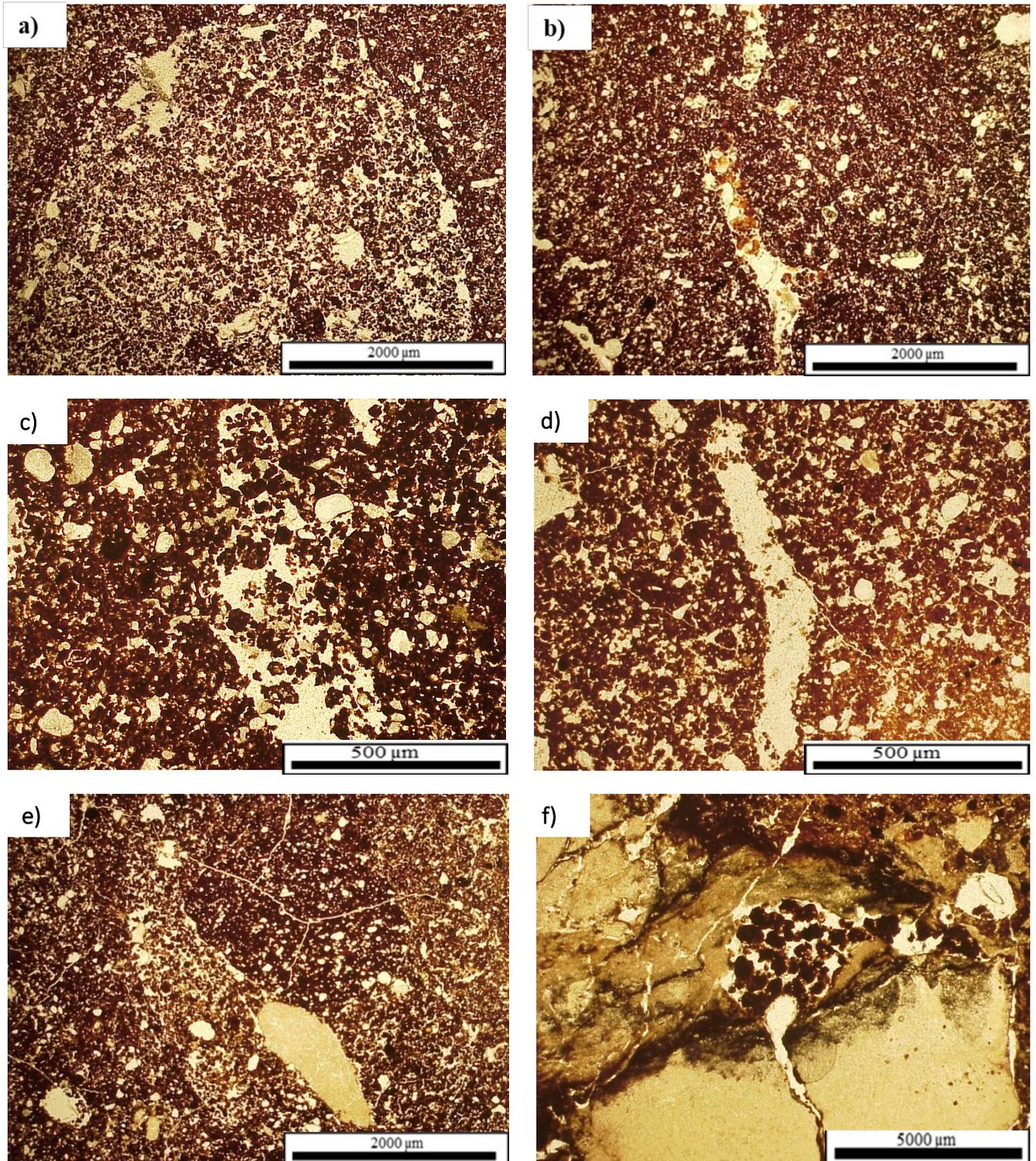


Figura 18 - Biofeições após a seção de controle em P1. a) Preenchimento solto em câmara com parede adensada (possivelmente cupim) à 300cm. b) Bioporo canal, com preenchimento denso parcial (minhocas) e excrementos recentes (cor mais clara) à 350cm. c) Preenchimento solto incompleto em canal biológico com paredes picotadas (formigas cortadeiras) à 470cm. d) Bioporo (galeria) de cupim ou formigas à procura de maior umidade 570cm. e) Bioporo preenchido por microgregados e excrementos de cupim a 600cm. f) excrementos de enchytraeídeos dentro de cavidade em rocha alterada a 650cm.

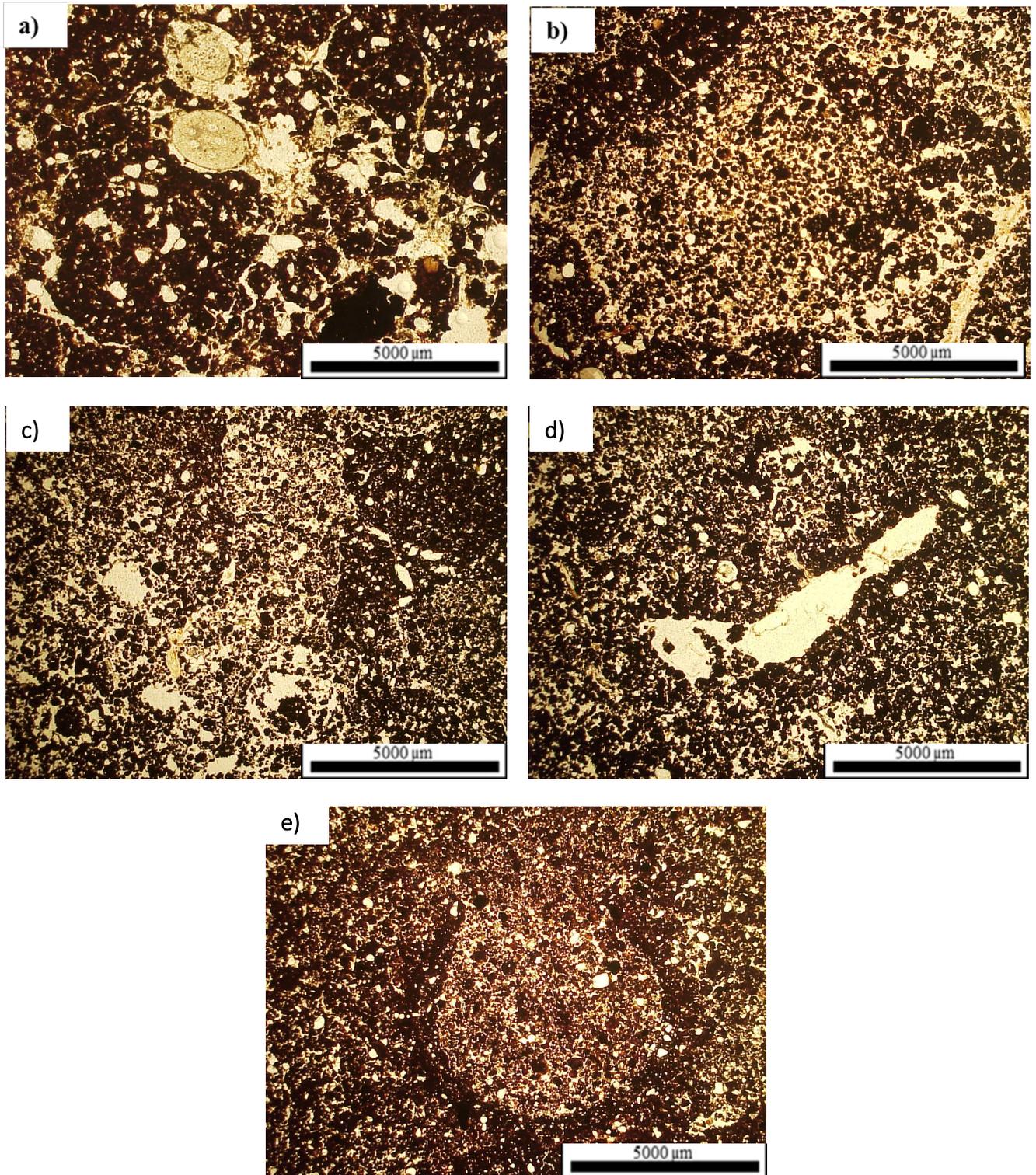


Figura 19 - Biofeições ao longo da seção de controle em P2. a) Corte transversal longitudinal de um fragmento de raiz com excrementos de ácaros (translúcidos) a 30cm b) Preenchimento solto contínuo irregular à 100cm. c) Preenchimento solto descontínuo à 100cm, provavelmente formigas. d) Preenchimento solto descontínuo irregular. e) Preenchimento contínuo a circular com maior parte das paredes adensadas, provavelmente uma galeria de cupim ou formiga.

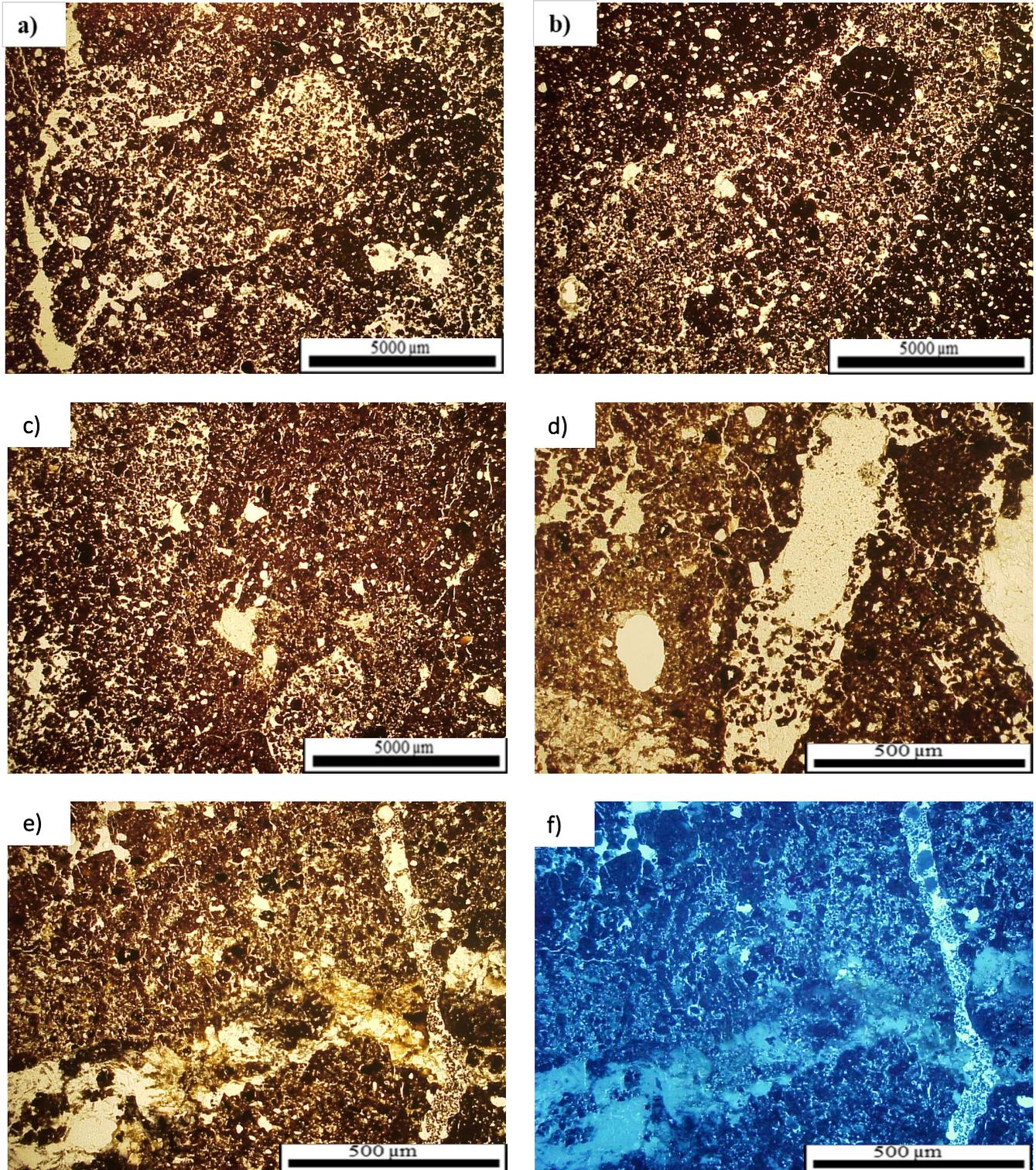


Figura 20 - Biofeições após a seção de controle em P2. a) Preenchimento irregular solto à 300cm. b) Preenchimento elipsoidal à 480cm. c) Preenchimento elipsoidal e circular à 610cm. d) Preenchimento solto descontínuo de canal biológico à 680cm por possivelmente por excrementos de enquitreídeos. e) Preenchimento solto descontínuo dentro da zona de alteração à 900cm. f) Idem e) em luz UV.

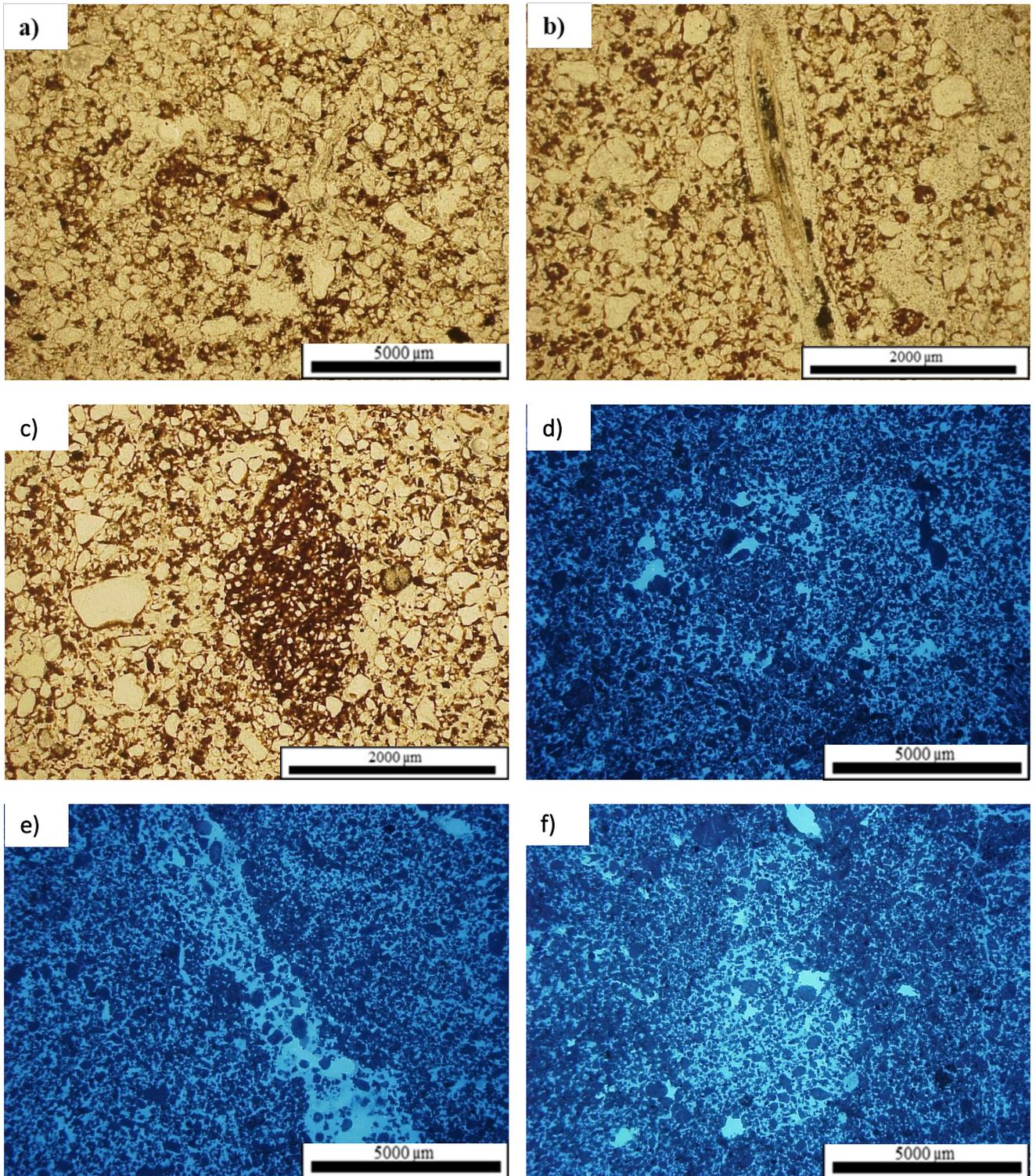


Figura 21 - Biofeições ao longo da seção de controle em P3. a) Matriz com uma distribuição gefúrica com a presença de microagregados com grãos de quartzo bem selecionados à 10cm, possivelmente (?) minhoca é capaz de fazer esse processo. b) Microagregados com grãos de quartzo pequenos e bem selecionados e um canal de raiz à 40cm. c) Microagregados (excrementos) com grãos de quartzo pequenos e bem selecionados e um canal de raiz à 75cm, processo executado por minhocas adultas. d) Preenchimento solto contínuo de minhoca à 100cm (UV). e) preenchimento elipsoidal solto descontinuo à 150cm (UV). f) Preenchimento arredondado solto contínuo à 200cm (UV).

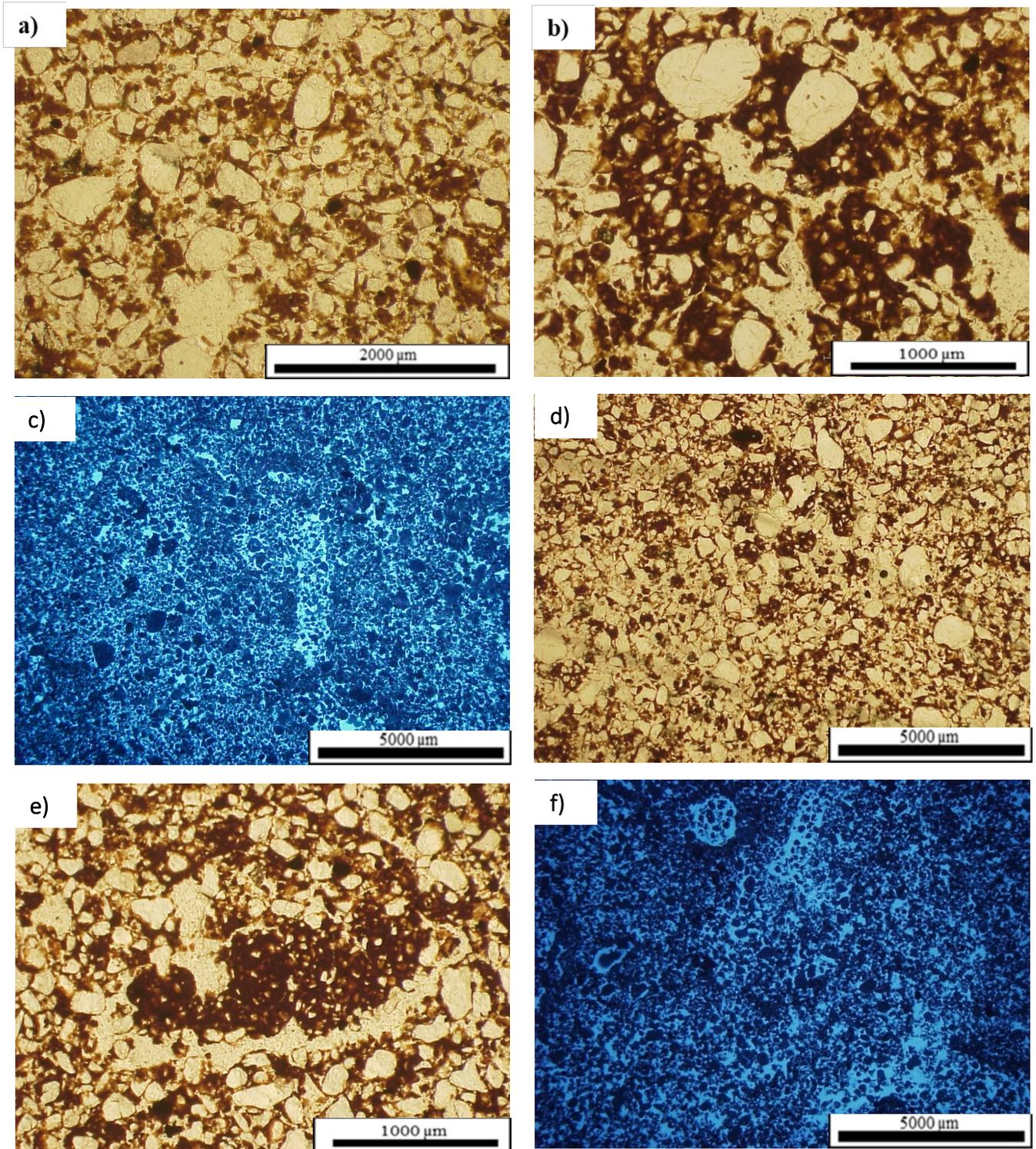


Figura 22 - Biofeições após a seção de controle em P3. a) Alinhamento concêntrico indicando a movimentação de minhocas à 300cm. b) Microagregados (excrementos) com grãos selecionados, cuja origem não foi identificada em comparação à literatura (anelídeos? térmitas?) a 350cm. c) Preenchimento elíptico irregular solto contínuo à 500cm (UV). d) Microagregados (excrementos) com grãos selecionados e devido a profundidade é um indicativo da atividade de cupins à 530cm. e) Microagregados (excrementos) com grãos selecionados à 900cm. f) Preenchimento solto descontínuo à 900cm (UV).

5. DISCUSSÃO

Os dados de caracterização química e física, mostraram que os perfis estudados apresentam comportamentos semelhantes para os perfis mais argilosos (P1 e P2), diferindo do perfil mais arenoso (P3). Nenhum dos perfis trabalhados possuem caráter ácrico. Os três perfis são distróficos.

De acordo com a morfologia, os perfis P1 e P2 apresentaram uma mudança estrutural significativa abaixo da seção de controle. No P1 a uma profundidade 166-260 cm e 325-380 cm. No P2 à uma profundidade de 255-295 cm. Em ambos os perfis, esses horizontes com agregados em blocos foram denominados Bw também, e não Bt, por não apresentarem revestimentos de argila nem no campo e nem nas seções delgadas. Nos dois perfis, há uma mudança estrutural e incremento do teor de argila do horizonte Bw com estrutura em blocos e mais adensados em comparação com o Bw microagregado imediatamente inferior. Os horizontes B mais adensados tem estrutura em blocos subangulares de tamanho médio e grau moderado em macroescala, já em microescala esses blocos possuem estrutura microgranular coalescida internamente. Esses blocos podem ser pedorelíquias, ou seja, resquícios de uma antiga paisagem. Enquanto os horizontes Bw acima e abaixo destes, apresentam estrutura granular de tamanho muito pequeno e grau forte. Esses horizontes com estrutura em blocos no P1 estão relacionados com o aumento no teor de caulinita de acordo com os dados termogravimétricos (Figura 5). Isso pode estar relacionado à maior ocorrência de contatos face a face das caulinitas, facilitando assim a formação de um arranjo de maior tamanho, quando comparada às camadas com maior conteúdo de óxidos de Fe e Al; os óxidos desorganizam a estrutura e favorecem a formação e estabilidade dos microagregados (Oates e Waters, 1991; Vrolijk e Sposito, 2002) Chiapini (2021) encontrou a ocorrência de horizontes mais adensados ou mesmo de volumes mais adensados em horizontes Bt (nítico) abaixo da seção de controle em latossolos derivados de basalto. A autora encontrou relação desses horizontes Bt e de grandes nódulos argilosos adensados, com a preservação de volumes de pedoplasmação na zona saprolítica. A ação da bioturbação seria responsável pela degradação desses antigos horizontes B níticos em B latossólicos.

Os horizontes de P1 são argilosos ou muito argilosos até 380 cm. A partir dessa profundidade há um decréscimo gradual nos teores de argila, alcançando a textura franco-argilossiltosa no horizonte CR. Esse fato é devido à proximidade aos siltitos e argilitos da

Formação Irati. Esses resultados também são encontrados em Latossolos de variadas regiões climáticas no Brasil (Barros et al., 2001; Queiroz-Neto e Castro, 1974; Schaefer, 2001; Vidal-Torrado e Lepsch, 1999; Penteado, 1976). O P2 é argiloso até o Bw2 e muito argiloso entre o horizonte o Bw em blocos e o Bw6. A partir de 460 cm os teores de argila diminuem gradualmente até o horizonte C, que apresenta textura franco-argilo-siltosa. Os teores de argila mais elevados nesse perfil são creditados ao material de origem básico (encaixado em rocha sedimentar) com grande quantidade de minerais primários formadores de argila. Esses resultados corroboram estudos realizados em Latossolos derivados de rochas básicas na região Sul e Sudeste (Vidal-Torrado e Lepsch, 1999; Vidal-Torrado, 1994; Vidal-Torrado et al., 2006; Vidal-Torrado e Cooper, 2008; Schaefer, 2001). O P3, derivado de material retrabalhado de arenitos apresenta textura franco arenosa nos horizontes A e AB. Nos demais horizontes os teores de argila incrementa em profundidade, com máximos valores encontrados no Bw10 (292 g kg^{-1} ; franco argilo arenoso). Os maiores valores de densidade do solo foram obtidos no P3, reflexo dos maiores teores de areia ao longo desse perfil. Contudo, a Ds incrementa gradualmente em profundidade em todos os perfis com o aumento da profundidade, refletindo uma maior contribuição das frações orgânicas nos horizontes superficiais e possivelmente à bioturbação gradualmente mais intensa à medida que se aproxima da superfície. À semelhança, a relação silte/argila apresentou tendência de incremento gradual em profundidade em todos os perfis. Os menores valores foram encontrados nos horizontes latossólicos, notadamente nos Bw do P3. Por outro lado, a maior relação silte/argila encontrada nos horizontes Cr (P1) e BC2 e C (P2) indica maior participação de minerais primários em maiores profundidades nesses perfis. Porém, relação silte/argila, atendeu os requisitos para os latossolos, com valores abaixo de 0,6 para solos com textura mais fina (P1 e P2) e, menor que 0,7 para solos com textura arenosa (P3) (SIBCS, 2018). Esse comportamento é coerente com os dados encontrados em toda a seção de controle (200 cm). Porém esse comportamento muda a partir dos 438 cm no P1, 560 cm no P2 e, 560 cm no P3. Isso se dá a proximidade da zona de alteração que ocorre no saprolito, onde há mais transformações químicas (Delvigne, 1965).

A mineralogia da fração areia do P1 e P3 (Figura 3a e 3b) mostram a predominância do mineral quartzo nas frações areia e silte (Tabela 8). Também foi encontrado óxidos de titânio (rutilo), nessas frações e o exame de campo permitiu identificar algum mineral com atração magnética (por exemplo, magnetita ou maghemita) e quartzo em P2. Não há

evidências de minerais primários facilmente intemperizáveis na mineralogia dos solos estudados. Os resultados mineralógicos da fração argila dos perfis 1 e 3 são apresentados nas Figuras 4a e 4b. Nestas, indicando as reflexões (001), (002) e (003) que se refere à sequência de reflexões basais de caulinita, com valores de espaçamento interplanares iguais a 0,716; 0,358 e 0,239, respectivamente. Em ambas as áreas, a caulinita apresentou alta cristalinidade, o que pode ser observado pelos padrões de DRX com muitas reflexões bem definidas. Esse padrão é reflexo do processo de ferromossilização, caracterizado pela contínua perda de bases ao longo do processo evolutivo desses solos acompanhado do processo de dessilicização ou ferralitização parciais.

De acordo com os dados termogravimétricos há uma diminuição da intensidade do pico da caulinita e um aumento do pico da gibsitita, o que é esperado pela ocorrência de diferentes zonas de atuação do intemperismo, visto que em profundidade o processo de ferralitização ainda não está em sua fase final (formação de óxidos de Fe e ou/ Al), diferente do que acontece em uma zona específica dentro da seção de controle de um dos perfis, que apresenta um pico mais intenso de gibsitita (Ishida et al., 2018).

A influência do material de origem no P1 resultou em um solo argiloso, derivado do retrabalhamento de argilitos do membro taquaral da Formação Irati com eventual contribuição de diques de rochas básicas o que explicaria a presença de magnetita neste perfil com atração magnética moderada e bonecas de sílex, no campo. No P2, a influência do diabásio e eventualmente em algumas partes do perfil da antiga rocha encaixante, um siltito ou argilito provavelmente do permiano (saprolito evidenciou sílex e diabásio alterado), resultou num perfil argiloso com uma maior quantidade de ferro e uma atração magnética de moderada a forte, dada a herança de magnetita presente no diabásio. A presença de um horizonte nodular neste perfil seguido de uma camada de sílex, são resquícios de uma paisagem pretérita, com uma inversão do relevo que resultou na formação da paisagem atual (Vidal-Torrado, 1994; Marques, 2017). O horizonte nodular ocorre na transição da alteração do diabásio para um resquício da rocha encaixante, sedimentar e pelítica, que provavelmente controlou o lençol freático na zona de alteração do diabásio e ali se deram as condições redoximórficas ideais para a formação dos nódulos de petroplintita, em uma paisagem menos dissecada do que a atual.

A presença de um horizonte nodular (linha de pedras) também pode ser um indicativo de descontinuidade litológica (Riquier, 1969). De fato, ferramentas como a relação dos

elementos titânio e zircônio (Relação Ti/Zr), podem indicar possíveis zonas de descontinuidade litológica. Esses elementos são utilizados, pois são considerados elementos pouco móveis no solo (Chittleborough et al., 1984; Chapman and Horn, 1968). De acordo com Chapman and Horn (1968), quando o coeficiente de variação (CV) da distribuição dos elementos Ti e Zr apresentam valores maiores que 25%, há descontinuidade litológica; valores de CV menores que 25%, não há descontinuidade litológica (Anda, et al., 2009). Logo de acordo com os dados obtidos somente o P3 apresentou CV maior que 25%. Já os perfis P1 e P2, não foi detectado pela relação Ti/Zr, nenhuma descontinuidade litológica. P3 foi considerado por Cooper et al. (2002) e Lobo (1984) material retrabalhado oriundo de arenitos mesozóicos mas esses autores não discutiram a descontinuidade aqui encontrada. O incremento em argila de P3, saindo de 120 gKg⁻¹ no horizonte A e que atinge quase 300 gKg⁻¹ a 900cm mostram que, além de possíveis processos de perda de argila superficial como a elutriação, houve uma variação na energia do ambiente de deposição na Formação Rio Claro ou ainda que há mesmo uma descontinuidade litológica que não foi possível identificar no campo.

A bioturbação é um grande agente modificador do solo (Jouquet et.al., 2015; Mujinya et al., 2010) e muito importante para a formação dos Latossolos. De fato a latossolização só é compreendida se ferralitização e bioturbação forem consideradas as duas vias desse processo, em igualdade de importância para compreender os atributos dos latossolos (Vidal Torrado, P. 2022 Comunicação pessoal). Nos solos em geral há uma zona onde a atividade biológica é muito intensa, é a área onde a bioturbação é um processo dominante, esta zona é chamada de biomanto (Johnson, 1990; Schaetzel & Anderson 2005). Muitos trabalhos evidenciam esse processo como de suma importância para a formação dos Latossolos (Miklós et al., 1992; Shaefer, 2001). De modo geral todos os perfis estudados apresentaram bioturbação que se inicia muito intensa no horizonte A e decresce em profundidade, mas, em zonas bem profundas, ocorrem zonas de bioturbação intensa também (Figura 9 a, b e c). O P1 apresentou uma variação de 1,43 – 33,64 % na bioturbação sendo à uma profundidade de 630 cm e 100 cm respectivamente. No P2 essa variação foi ainda maior de 0 – 76,70 % de bioturbação estando à 960 cm e 20 cm, respectivamente com uma intensa variação numa faixa abaixo da seção de controle (200 – 600 cm), que coincide com as mesmas zonas, observadas na morfologia de campo, de adensamento e denominada como Bw caracterizada por uma estrutura em blocos adensados entre estruturas granulares típicas

de um horizonte Bw e com nódulos de Fe dispersos. No P3 a bioturbação variou de 0,35 – 49,04 % ocorridas à 1040 cm e 900 cm. Neste caso, observou-se uma maior intensidade da bioturbação em 900 cm o que coincide com um pequeno aumento no teor de argila.

As biofeições em grande profundidade, nos três casos analisados, podem ser muito mais antigas do que as que se dão mais próximo à superfície, dificultando avaliar essa atividade no tempo e espaço. No P3, há ainda um fator que dificulta mais essa avaliação pois por ter mais argila em profundidade as biofeições se mantêm por mais tempo, são mais estáveis do que aquelas formadas em horizontes mais arenosos.

Feições pedológicas observadas em lâminas delgadas com formato arredondados, agregados com formatos arredondados, também são um indicativo da atividade biológica (Humphreys, 1994). Na Figura 22 pode ser observado, feições que podem indicar a movimentação de minhocas (Johnson and Schaetzl, 2015; Brown et al., 2004; Humphreys and Mitchell, 1988).

De forma geral a análise micromorfológica mostrou grau variável de complexidade das biofeições ao longo dos perfis. Os primeiros cm de solo mostram distribuição porfírica com uma quantidade muito grande de agregados biológicos derivados de excrementos, preenchendo galerias, partes adensadas de câmaras e ninhos retrabalhados etc. A distribuição enáulica começa a aparecer logo aos 30-40cm de profundidade nos horizontes AB e BA, passando a ser dominante por todo o perfil. Galerias biológicas elipsoidais (cupins, formigas) com paredes grossas e lisas (cupins) ou com paredes menos densas e com superfícies picotadas (formigas cortadeiras) preenchidas parcial ou totalmente, bioporos arredondados totalmente preenchidos por agregados biológicos de diferentes origens, são feições dominantes nos latossolos estudados. Em latossolos menos argilosos, com muita areia, é mais difícil, mas não impossível identificar biofeições da fauna edáfica e raízes, mas é muito difícil reconhecer os agentes. Algumas feições de anelídeos como preenchimentos incompletos arqueados e excrementos foram identificados no P3 que tem 80% de areia. Assim, observamos que em Latossolos a bioturbação é bem variável e surpreendente, visto que ocorrem em diferentes profundidades e por diferentes agentes. Que em sua maioria, seus agentes ainda não são possíveis de serem identificados, já que a literatura ainda é escassa no sentido a esse tipo de identificação visto a complexidade desse tipo de estudo, além da seção de controle, em solos.

O confronto da identificação das biofeições com a quantificação da bioturbação feita neste trabalho indicam caminhos interessantes para futuras pesquisas, em especial a que visa integrar os indicadores de mudanças ambientais.

Os dados isotópicos apresentados na Figura 10, mostram uma variação nos valores que indicam uma fitofisionomia de mistura de plantas C3 e C4, indicando uma cobertura florística mais aberta, nos três perfis. Esses dados também apontam certa homogeneidade da cobertura florística ao longo do desenvolvimento dos solos. Assinatura isotópica semelhante foi obtida para Oxisols da Austrália, no qual foi interpretado como resultado de uma pequena quantidade de gramíneas C4, mas a vegetação é caracteristicamente de espécies arbóreas,, ou seja, predomínio de plantas C3 (Krull and Skjemtd, 2003). No P1, dentro da seção de controle observamos um empobrecimento isotópico com valores da ordem de -24‰ o que caracteriza uma maior contribuição de plantas C3 nessa região (200 cm). Esse processo de empobrecimento isotópico dentro da seção de controle, conseqüentemente maior contribuição de plantas C3, indica um clima quente e úmido. Nessa mesma região os dados da distribuição de gibsita e caulinita (Figura 5a), indicam uma maior contribuição de gibsita nessa mesma região, o que pode ser um indicativo de ter havido um ambiente mais favorável para lixiviação das bases e conseqüentemente o processo de dessilicatização parcial e final, contribuindo para a formação de minerais do tipo 1:1 (caulinita) e óxidos (gibsita). O processo de enriquecimento isotópico em superfície, é um comportamento característico de áreas com atividade antrópica, resultado este observado nos três perfis estudados, visto que sobre todos os perfis há o cultivo de plantas C4, comportamento semelhante encontrado em outros estudos da região (Silva & Vidal-Torrado, 1999). Tal comportamento também foi observado em regiões de clima tropical úmido, com solos africanos, bem como também em outras regiões brasileiras (Bremond et al., 2008; Alexandre e Meunier., 1999; Pessenda et al., 1996; Gouveia et al., 1999).

Fragmentos de carvões também foram observados em campo (Figura 6). E a presença desses fragmentos indica que houve incêndios severos em algum período mais seco (Pessenda et. al., 2004). Em todos os perfis foram encontrados faixas de carvões centimétricos e microfragmentos abaixo da seção de controle. No P1 notou-se a presença de uma faixa de carvão que se expandia de 85 cm até 200 cm de profundidade; no P2 notou-se uma faixa de carvão que se expandia de 75 cm até 120 cm; já no P3 duas faixas que se expandia de 60 cm até 100 cm e outra de 120 cm até 200 cm de profundidade. Gouveia et. al.

(1999) e Pessenda et al. (2004) em estudos em solos no estado de São Paulo, também encontraram carvões em profundidade semelhantes aos encontrados neste estudo e constataram que se tratava de vestígios de incêndios em períodos mais secos ocorridos no Holoceno Médio onde podemos observar que os eventos foram coincidentes nos três perfis estudados. As idades mostram que esses eventos ocorreram no Holoceno devido as grandes oscilações do clima ocorridos nesse período, isso também foi observado em trabalhos na mesma região de estudo, bem como em diversas partes do país (Scheel-Ybert et al., 2003; Gouveia et al., 2003; Pessenda et al., 2004; Pessenda e al., 1996) Stevaux (2000) aponta como período seco todo o final do Pleistoceno Superior ao Holoceno Inferior, ou seja, entre 40.000 e 8.000 anos A.P. na região do Paraná. Outros estudos em áreas de cerrado, no Brasil, Mostraram a ocorrência de uma fase mais seca no início do Holoceno, entre 9.720 e 5.530 A.P. (Behling, 1998; 2002). O que corrobora com os dados encontrados neste estudo, bem como com a interpretação dos dados isotópicos. Acrescido a isso, foi observado uma inversão nas idades nos perfis 1 e 2, nas amostras mais profundas (P1 150-160 cm e 190-200 cm; P2 110-120 cm e 150-160 cm), isso é mais um indicativo da atividade da fauna no perfil, esse remonte vertical já havia sido observado por Gouveia e Pessenda (1999) em estudos também com Latossolos no estado de São Paulo.

6. CONSIDERAÇÕES FINAIS.

A complexidade dos latossolos fica mais evidente diante do trabalho exposto e há importantes registros pedológicos de sua história evolutiva além da seção de controle. Os estudos sobre a uniformidade do material parental dos solos, deixou claro que nem todas as relações são assertivas para considerar esses solos como poligenéticos, resultante de diversos processos ao longo da sua formação. Ficando claro somente a desuniformidade no P3 por ter como material de origem uma cobertura arenosa neocenozoica de vários eventos de deposição. Isso ficou evidenciado na relação Ti/Zr.

O biomanto dos latossolos não é resumido aos horizontes superficiais A, AB, BA e mesmo Bw1 eles podem ser espessos e atingem profundidades maiores do que a seção de controle. Zonas de grande bioturbação podem estar relacionadas a mudanças climáticas pretéritas onde períodos mais secos forçaram a fauna edáfica a buscar maior umidade em profundidade. As causas da irregularidade da distribuição e a natureza das biofeições em profundidade permanece assunto a ser investigado entre pedólogos e zoólogos de forma integrada.

Os dados mineralógicos indicam o processo de ferralitização parcial dos latossolos de Piracicaba, são solos cauliníticos, diferente de latossolos de outras regiões do Brasil que passam processo de ferralitização total, originando solos oxidicos podendo ser até ácidos. Os carvões enterrados a profundidades de 80 a 120cm, omnipresentes em todos os latossolos da Depressão Periférica Paulista, confirmam intensos incêndios relacionados a uma mudança climática brusca para período seco no Holoceno.

REFERÊNCIAS

- Alexandre, A.; Meunier, J. D., 1999. Late Holocene Phytolith and Carbon-Isotope Record from a Latosol at Salitre, South-Central Brazil. *Quaternary Research*, San Diego, v. 51, p. 187–194.
- Anda, M., Chittleborough, D.J. and Fitzpatrick, R.W., 2009. Assessing parent material uniformity of a red and black soil complex in the landscapes. *Catena*, 78(2), pp.142-153.
- Bal, L., 1982. Zoological ripening of soils. Centre for Agricultural Publishing and Documentation, Wageningen, The Netherlands.
- Barros, E., Curmi, P., Hallaire, V., Chauvel, A., Levelle, P. 2001. The role of macrofauna in the transformation and reversibility of soil structure of an oxisol in the process of forest to pasture conversion. *Geoderma*, 100,193-213.
- Behling, H., 1998. Late Quaternary vegetational and climatic changes in Brazil. *Review of Palaeob. Palynol.* 99, 143–156.
- Behling, H., 2002. South and southeast Brazilian grasslands during Late Quaternary times: a synthesis. *Palaeogeogr. Palaeoclimatol. Palaeoecol.* 177, 19–27
- Borrell, A.K., Hammer, G.L., Henzel, R.G., 2000. Does maintaining green leaf area in sorghum improve yield under drought? II. Dry matter production and yield. *Crop Sci* 40:1037–1048.
- Botinelli N., P. Jouquet, Y. Capowiez, P. Podwojewski, M. Grimaldi, and X. Peng. 2015. Why is the influence of soil macrofauna on soil structure only considered by soil ecologists? *Soil Till. Res.* 146A:118–124.
- Boulet, R.; Pessenda, L.C.R.; Telles, E.C.C.; Melfi, A.J., 1995. Une évaluation de la vitesse de l'accumulation superficielle de matière par la faune du sol à partir de la datation des charbons et de l'humine du sol. Exemple des latosols des versants du lac Campestre, Salitre, Minas Gerais, Brésil. *Compte Rendus de l'Academie des Sciences. Serie 2*, v.320, p.287-294.
- Bremond, L.; Alexandre, A.; Wooller, M.J.; Hély, C.; Williamson, D.; Schäfer, P.A.; Majule, A.; Guiot, J., 2008. Phytolith indices as proxies of grass subfamilies on East African tropical mountains. *Glob. Planet. Chang.*, 61, 209–224.
- Brewer, R. & Sleeman, J.R., 1988. Soil structure and fabric. Adelaide, CSIRO, Division of Soils. 173p

- Brown, G.G., Edwards, C.A. and Brussaard, L., 2004. How earthworms affect plant growth: burrowing into the mechanisms. *Earthworm ecology*, 2, pp.13-49.
- Bullock, P., Fedoroff, N., Jongerius, A., Stoops, G., Tursina, T., 1985. *Handbook for Soil Thin Section Description*. Waine Research, Albrington.
- Buol, S. W. et al., 2011. Soil-Forming Factors: Soil as a Component of Ecosystems, in: *Soil Genesis and Classification*. 6 ed. Oxford: Wiley-Blackwell, 89–140.
- Buol, S.W., Eswaran, H., 1999. Oxisols. *Advances in Agronomy*, 68, pp. 151–195.
- Castro, S. S. e Cooper, M., 2019. *Fundamentos de micromorfologia de solos*. Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, Viçosa, Minas Gerais.
- Chapman, S.L. and Horn, M.E., 1968. Parent material uniformity and origin of silty soils in Northwest Arkansas based on zirconium-titanium contents. *Soil Science Society of America Journal*, 32(2), pp.265-271.
- Chiapini, M., 2021 Long and short-term pedogenetic processes in ferralsols from magmatic province of Paraná, Brazil. Piracicaba, Tese de Doutorado/USP. 180 p.
- Chittleborough, D.J., Oades, J.M., 1980. The development of a red-brown earth. II. Uniformity of parent material. *Aust. J. Soil Res.* 18, 375–382.
- Chittleborough, D.J., Oades, J.M., Walker, P.H., 1984. Textural differentiation in chronosequences from eastern Australia. III. Evidence from elemental chemistry. *Geoderma* 32, 227–248
- Cooper M., 1996. Pedogênese de uma Catena sobre diabásio em Piracicaba, SP. Dissertação (Mestrado em Solos e Nutrição de Plantas) - Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz.
- Cooper, M., Vidal Torrado, P., & Lepsch, I.F., 1996. Stratigraphy and morphogenesis of an oxisol-alfisol toposequence in Piracicaba SP, Brazil . (Compact disc). In *Solo-Suelo 96: Trabalhos*. Piracicaba: Sbc/Slcs.
- Cooper, M., Vidal-Torrado, P., Chaplot, V., 2005. Origin of microaggregates in soils with ferrallic horizons. *Sci. Agric.* 62, 256–263.
- Cooper, M.; Vidal-Torrado, P.; Lepsch, I.F., 2002. Stratigraphical discontinuities, tropical landscape Evolution and soil distribution relationships in a case study in SE-Brazil. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, Viçosa, v. 26, n.3, p. 673-683.
- EMBRAPA - Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária, 2017. *Manual de métodos de análise de solo*. Brasília – DF 3. ed. rev. e ampl. 573 p.

- EMBRAPA - Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária, 2018. Sistema Brasileiro de Classificação de Solos. Embrapa Solos, Rio de Janeiro.
- Eschenbrenner, V., 1986. Contribution de térmites à la micro-agrégation des sol tropicaux. Cah. Orstom, sér. Pédol., v. XXII, nº 4: 397-408.
- G. Vrdoljak, G. & Sposito, G., 2002. Soil Aggregate hierarchy in a Brazilian Oxisol. Developments in Soil Science, Volume 28A Editors: A. Violante, P.M. Huang, J.-M. Bollag and L. Gianfreda, 197p.
- Gabet, E. J., Reichman, O. J., Seabloom, E. W., 2003. The effects of bioturbation on soil processes and sediment transport. Annual Review of Earth and Planetary Sciences 31, 249–273.
- Gouveia S.E.M., Pessenda L.C.R., Boulet R., Aravena R., Scheel-Ybert R., 1999. Isótopos do carbono dos carvões e da matéria orgânica do solo em estudos de mudança de vegetação e clima no Quaternário e da taxa de formação de solos do estado de São Paulo, An. Acad. Bras. Ci.
- Gouveia, S. E. M., Pessenda, L. C. R., Ribeiro, A. S., & Aravena, R., 2003. Paleoincêndios em distintas regiões do Brasil. In Anais do IX Congresso da ABEQUA. CNPQ, FINEP, PETROBRAS, Recife.
- Gouveia, S.E.M., Pessenda, L.C.R., 2000. Datation par le ^{14}C de charbons inclus dans le sol pour l'étude du rôle de la remontée biologique de matière et du colluvionnement dans la formation de latosols de l'état de São Paulo, Brésil. C. R. Acad. Sci. Paris, 330, 133 – 138.
- Gouveia, S.E.M.; Pessenda, L.C.R.; Aravena, R.; Boulet, R.; Cheel-Ybert, R.; Bendassoli, J.A.; Ribeiro, A.S.; Freitas, H.A., 2002. Carbon isotopes in charcoal and soils in studies of paleovegetation and climate changes during the late Pleistocene and the Holocene in the southeast and centerwest regions of Brazil. Global and Planetary Change, v.33, p.95-106.
- Humphreys, G. S., 1994. Bioturbation, biofabrics and the biomantle: An example from the Sydney Basin, in: A. J. Ringrose-Voase and G. S. Humphreys (Eds.), micromorphology: Studies in management and genesis. Amsterdam: Elsevier, pp. 421–436.
- Humphreys, G. S.; Mitchell, P. B., 1988. Bioturbation: An important pedological and geomorphological process. In: Abstracts. p. 265.

- Instituto de Pesquisas Tecnológicas – IPT, 1981. Mapa geológico do Estado de São Paulo. Escala 1:1.000.000. São Paulo, Divisão de Minas e Geologia Aplicada do Instituto de Pesquisas Tecnológicas do estado de São Paulo.
- Ishida, D.A., Vieira-Coelho, A.C., Melfi, A.J., Lucas, Y., Camargo, J.P.B. and Montes, C.R., 2018. Influence of pedogenetic processes on the validity of kaolinite crystallinity indices: a case study of an Amazonian Ferralsol-Podzol soil system with white kaolin. *Applied Clay Science*, 162, pp.435-442.
- IUSS Working Group WRB., 2015. World Reference Base for Soil Resources 2014, update 2015. International soil classification system for naming soils and creating legends for soil maps. World Soil Resources Reports No. 106. FAO, Rome.
- Jenny, H., 1941. *Factors of Soil Formation: A System of Quantitative Pedology*. Dover Publications, New York, 281 p.
- Johnson, D. L., 1990. Biomantle evolution and the redistribution of Earth materials and artifacts. *Soil Sci.* 149, 84–102.
- Johnson, D.L. and Schaetzl, R.J., 2015. Differing views of soil and pedogenesis by two masters: Darwin and Dokuchaev. *Geoderma*, 237, pp.176-189.
- Jouquet, P., Chintakunta, S., Bottinelli, N., Subramanian, S., Caner, L., 2016. The influence of fungus-growing termites on soil macro and micro-aggregates stability varies with soil type. *Applied Soil Ecology* 101, 117-123.
- Jouquet, P., Guilleux, N., Caner, L., Chintakunta, S., Ameline, M., Shanbhag, R.R., 2016B. Influence of the soil pedological properties on termite mound stability. *Geoderma*, 262, 45-61.
- Jouquet, P., Guilleux, N., Chintakunta, S., Mendez, M., Subramanian, S. and Shanbhag, R.R., 2015. The influence of termites on soil sheeting properties varies depending on the materials on which they feed. *European Journal of Soil Biology*, 69, pp.74-78.
- Jouquet, P., Guilleux, N., Shanbhag, R.R., Subramanian, 2015B. Influence of soil type on the properties of termite mound nests in Southern Indian. *Applied Soil Ecology* 96, 282-287.
- Ker, J. C., Curi, N., Schaefer, C. E. G. R., & Vidal-Torrado, P., 2012. *Pedologia: fundamentos* 1. ed. Viçosa: SBCS, 343p.
- Ker, J.C., 1995. *Mineralogia, sorção e desorção de fosfato, magnetização e elementos traços de Latossolos do Brasil*. Viçosa, MG, UFV. 181p. (Tese D.S.).
- Ker, J.C., 1997. Latossolos do Brasil: uma revisão. *Geonomos* 5, 17–40.

- Kosambi, D.D., 1944. The estimation of map distance from recombination values. *Ann Eugen* 12:172-175.
- Lavelle, P., 1997. Faunal activities and soil processes: adaptive strategies that determine ecosystem function. *Adv. in Ecol. Res.* 27, 93–132.
- Lavelle, P., Spain, A.V., 2003. *Soil Ecology*. Kluwer Academic Publishers.
- Lee, K.E., Foster, R.C., 1991. Soil Fauna and Soil Structure. *Aust. J. Soil Res.* 29, 745-775.
- Lepsch, I.F., Buol, S.W., 1986. Oxisol-landscape relationship in Brazil. In: *International Soil Classification Work Shop*, 13, Campinas. 1986. Part1: papers. Campinas: SNLCS/EMBRAPA. University of Puerto Rico, USA, pp. 174 e 189.
- Lepsch, I.F.; Buol, S.W., 1974. Investigations in na Oxisols toposequece in S.Paulo state, Brazil. *Soil Science Society of America Proceedings*, v. 38, p. 491-496.
- Lobo, A., 1984. *Relações solos-superfícies fisiográficas em uma transição de Piracicaba, SP. 1984. 164f (Doctoral dissertation, Tese (Doutorado em Agronomia) – Escola Superior de Agricultura" Luiz de Queiroz", Piracicaba).*
- Marques, K. P. P., 2017. *Segmentação geomorfométrica associada com tipos de solos via geotecnologias. (Dissertação de Mestrado). Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Universidade de São Paulo, Piracicaba. p. 132.*
- Marques, K. P., 2021. *Tropical landscape evolution and its relationship with paleosurfaces, Ferralsols and ferruginous duricrusts in the Alto Paranaíba region (Central Plateau, Minas Gerais State, Brazil). Piracicaba, Tese de doutorado/USP. 120 p.*
- Mehra, O. P., Jackson, K. L., 1960. Iron oxide removal from soils and clays by dithionite-citrate system buffered with sodium bicarbonate. In: *National Conference on Clay and Clay Minerals* 7, 1958. *Proceedings, Washington*, 317–327.
- Melo, M. S., 1995. *A Formação Rio Claro e depósitos associados: sedimentação Neocenoica na depressão periférica paulista. (Tese de Doutorado). Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo.*
- Miklós, A. A. DE W., 1992. *Biodynamique d'une couverture pédologique dans la région de Botucatu, Brésil. Tese de dooutorado. Paris: Université de Paris.*
- Moniz, A.C.; Buol, S.W., 1982 *Formation of na oxisol-ultisol transitions in São Paulo – Brazil. I. double-water flow modelo f soil development. Soil Sci. Soc. Am. J., v. 46, p. 1228-1233.*
- Moraes Rego, L., 1932. *Notas sobre a Geomorphologia de S. Paulo e sua Genesis. São Paulo. Inst. Astron. e Geographico de S. Paulo. p. 28.*

- Moura Filho, W.; Boul, S.W., 1972. Studies of a latosolo roxo (Eustrtox) in Brazil: description, setting and characterization. *Experientiae*, Viçosa, MG, v. 13, n. 7, p. 201-274.
- Muggler, C.C.; Buurman, P., 2000. Erosion, sedimentacion and pedogenesis in a polygenetic oxisol sequence in Minas Gerais, Brazil. *Catena* v. 41, p. 3-17.
- Muggler, C.C.; Buurman, P.; Doesburg, J.D.J., 2007. Weathering trends and parent material characteristics of polygenetic oxisol from Minas Gerais, Brasil: I Mineralogy. *Geoderma*, Amsterdam, v. 138, p. 39-47.
- Mujinya, B.B., Mees, F., Erens, H., Dumon, M., Baert, G., Boeckx, P., Ngongo, M., Van Ranst, E., 2013. Clay composition and properties in termites mounds of the Lubumbashi area, D.R. Congo. *Geoderma* 192, 304- 315.
- Mujinya, B.B., Van Ranst, E., Verdoodt, A., Baert, G., Ngongo, M., 2010. Termite bioturbation effects on electro-chemical properties of Ferralsols in the Upper Katanga (D.R. Congo). *Geoderma* 158, 233-241.
- Murphy, C.P., 1986. Thin section preparation of soils and sediments. Rothamsted, A.B. Academic Publishers. 149p.
- Oades, J.M., Waters, A.G., 1991. Aggregate hierarchy in soils. *Aust. J. Soil Res.* 29, 815- 828.
- Oliveira, J.B.; Jacomine, P.K.T.; Camargo, M.N., 1992 *Classes gerais de solos do Brasil - guia auxiliar para seu reconhecimento*. Jaboticabal, FUNEP. 201p
- Penteado, M.M., 1976. *Geomorfologia do setor centro ocidental da depressão periférica paulista*. Rio Claro, Universidade de São Paulo. (Tese de Doutorado). p. 86.
- Pessenda, L. C. R.; Gouveia, S.E.M.; Aravena, R., 2004. Holocene fire and vegetation changes in southeastern Brazil as deduced from fossil charcoal and soil carbon isotopes. *Quatern Int* 114: 35–43.
- Pessenda, L.C.R., Ramon Aravena, Melfi, A.J., Telles, E.C.C., Rene Boulet, Valencia, E.P.E., Mario Tomazellos, 1996. The use of carbon isotopes (^{13}C , ^{14}C) in soil to evaluate vegetation changes during the Holocene in Central Brazil. *Radiocarbon* 38, 191-201.
- Queiroz-Neto, J.P., Castro, S.S., 1974. Formações superficiais e latossolos Vermelho-Amarelo-Húmico na área de Bragança Paulista, Estado de São Paulo, Brasil. In: Congresso Brasileiro de Geologia, 18., 1974, Porto Alegre. *Anais Porto Alegre: SBG*, 1974, p.65–83.
- Resende, M., 1976 *Mineralogy, chemistry, morphology and geomorphology of some soils of the Central Plateau of Brazil*. West Lafayette, Purdue University. 237p. (Tese Ph.D.).

- Riquier, J., 1969. Contribution a l'étude des "stone-lines" en régions tropicale et équatoriale. Cahiers ORSTOM, Série Pédologie, 7(1), pp.72-111.
- Rodrigues, B. M. 2019. Bioturbação e distribuição de fitólitos em Latossolos da Depressão Periférica Paulista. Dissertação de mestrado. Universidade de São Paulo.
- Santos, R.D., Lemos, R.C., Santos, H.G., Ker, J.C., Anjos, L.H.C., 2015. Manual de descrição e coleta de solo no campo. Sociedade Brasileira de Ciência do Solo: Viçosa.
- Schaefer, C. E., 2001. Brazilian latosols and their B horizon microstructure as long-term biotic constructs. Soil Res. 39, 909–926.
- Schaetzl, R. J.; Anderson, S. Soils: Genesis and Geomorphology. Cambridge University Press, New York, 2005, 817p.
- Schaetzl, R. J., 1998. Lithologic discontinuities in some soils on drumlins. Theory, detection, and application. Soil Sci. 163, 570–590.
- Scheel-Ybert, R., Gouveia, S.E.M., Pessenda, L.C.R., Aravena, R., Coutinho, L.M. and Boulet, R., 2003. Holocene palaeoenvironmental evolution in the São Paulo State (Brazil), based on anthracology and soil $\delta^{13}C$ analysis. The Holocene, 13(1), pp.73-81.
- Silva, A.C., Vidal-Torrado, P., 1999. Gênese dos latossolos húmicos e sua relação com a evolução da paisagem numa área cratônica do sul de Minas Gerais, R. Bras. Ci. Solo 23, 329–341.
- Simonson, R.W., 1995. Factors of Soil Formation. A System of Quantitative Pedology. by Hans Jenny. Dover Publications, New York. Paperback, 281 pp. P
- Soares, P.C., Landim, P.M.B. 1976. Depósitos cenozóicos na região Centro Sul do Brasil. Campinas. Notícia Geomorfológica. v .16, 1.31, p.17 -39.
- Soil Survey Staff, 1999. Keys to soil taxonomy.8.ed. Washington, United States Department of Agriculture/Pocahontas Press.
- Soubiès F., 1980. Existence d'une phase sèche en Amazonie brésilienne datée par la présence de charbons dans les sols (6 000–3 000 ans BP), Cah. Orstom, sér. Géol. 11 (1), 133–148.
- Stevaux, J.C., 2000. Climatic events during the late Pleistocene and Holocene in the upper Parana River: Correlation with NE Argentina and South-Central Brazil. Quaternary International, 72(1), pp.73-85.
- Stoops, G., 1983. - Micromorphology of the oxic horizon. Proc. Vltth Int. Work. Meet. Soil Micromorph., London, P. Bullock and C.P. Murphy (Eds), AB Academic Publishers, Rothamsted, pp. 419-440.

- Stoops, G., 2021. Guidelines for Analysis and Description of Soil and Regolith Thin Sections. Second edition. Soil Sci. Soc. of Am. Inc. Madison.
- Tsai, C., Chen, Z., 2000. Lithologic discontinuities in Ultisols along a toposequence in Taiwan. *Soil Sci.* 165, 587–596.
- van Wambeke, A., Eswaran, H., Herbillon, A.J., Comerma, J., 1983. Oxisols. Reprinted from: *Pedogênese and Soil Taxonomy. II. The Soil Orders*, by Wilding, L.P., Smeck, N.E., Hall, G.F., (Editors), pp. 325–354
- Vidal-Torrado, P., 1994. Pedogênese e Morfogênese no distrito de Tupi (Piracicaba, SP). Piracicaba, Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”. (Tese de Doutorado). p. 212.
- Vidal-Torrado, P., Cooper, M., 2008. Ferralsol. In: Chesworth, W. (Org.). *Encyclopedia of Soil Science*. Dordrecht: Springer, pp. 237–240.
- Vidal-Torrado, P., Lepsch, I. F., 1999. Relações material de origem solo e pedogênese em uma sequência de solos predominantemente argilosos e latossólicos sobre psamitos na Depressão Periférica Paulista. *R. Bras. Ci. Solo* 23,357–369.
- Vidal-Torrado, P., Macias, F., Calvo, R., Carvalho, S. G., Silva, A.C. 2006. Gênese de Solos Derivados de Rochas Ultramáficas Serpentinizadas no Sudoeste de Minas Gerais. *Rev Bras.Ci. Solo*, 30, 523-541.
- Wood, T.G., 1988. Termites and soil environment. *Biol Fertil. Soils* 6, 228–236.
- Zeng, Z.B., 1994. Precision mapping of quantitative trait loci. *Genetics* 136: 1457-1468.

Anexo A

Atributo	P1 – Bw8	P1 – Bw9
Geral	Material grosso: 40% Material fino: 45% Poros: 15% Razão G/F: 0,89	Material grosso: 30% Material fino: 50% Poros: 20% Razão G/F: 0,60
Microestrutura	Pedal; microgranular fortemente desenvolvida; não-acomodada. Presença de muitos nódulos de Fe e de fragmentos de rocha. Distribuição aleatória; sem orientação.	Pedal; granular e granular coalescida formando blocos subangulares como estrutura secundária; fortemente e fracamente desenvolvida; não-acomodado, parcialmente acodado. Distribuição aleatória; sem orientação.
Material fino	Argila, óxidos de Fe e/ou Mn; Vermelho; Não orientado, Distribuição aleatória; Orientação de base Manchada	Argila, óxidos de Fe e/ou Mn; Vermelho; Não orientado, Distribuição aleatória; Orientação de base Manchada
Material grosso	Quartzo: 40% Nódulos: 30% Fragmento de rocha: 30%	Quartzo: 70% Nódulos: 30%
Poros	Fissuras: 35% Cavidades: 20% Canais: 35% Empilhamento Complexo: 10% Sem Orientação; Distribuição Aleatória	Fissuras: 20% Cavidades: 20% Canais: 25% Empilhamento Complexo: 25% Sem Orientação; Distribuição Aleatória
Distribuição relativa	Enáulica	Enáulica-Porfírica
Feições	Texturais: Preenchimento solto descontínuo irregular aderente Amorfais: Nódulos de Fe; arredondado, elíptico; bruno-avermelhado, vermelho; típico; com quartzo interno, sem nódulos de quartzo Fragmento de Rocha; angular; amarelo.	Texturais: Preenchimento solto descontínuo irregular aderente Excrementos coalescidos Amorfais: Nódulos de Fe; arredondado; vermelho, amarelo; típico; com quartzo interno, sem nódulos de quartzo

Atributo	P1 - BC	P1 - C
Geral	Material grosso: 78% Material fino: 15% Poros: 7% Razão G/F: 5,2	Material grosso: 65% Material fino: 20% Poros: 15% Razão G/F: 3,2
Microestrutura	Pedal; blocos subangulares fracamente desenvolvida; médios e pequenos; parcialmente acomodado Distribuição aleatória; sem orientação.	Pedal; blocos subangulares fracamente desenvolvida; pequenos; não acomodado Distribuição aleatória; sem orientação. Obs: Pouco material fino estruturado, maior parte está solto
Material fino	Argila, óxidos de Fe e/ou Mn; Vermelho; Não orientado, Distribuição paralelo; Orientação de base estriada	Argila; Vermelho; Não orientado, Distribuição aleatória; Orientação de base manchada
Material grosso	Quartzo: 15% Fragmento de rocha: 85%	Quartzo: 20% Fragmento de rocha: 80%
Poros	Fissuras: 70% Cavidades: 5% Canais: 25% Sem Orientação; Distribuição Aleatória	Fissuras: 35% Cavidades: 50% Empilhamento Complexo: 15% Sem Orientação; Distribuição Aleatória
Distribuição relativa	Porfírica	Porfírica
Feições	Fragmentos de rocha, subangulares, claros e escuros.	Texturais: Preenchimento solto, descontínuo, arredondado, aderente Fragmentos de rocha, subangulares, cores variegadas.

Atributo	P3 – Bw2	P3 – Bw9
Geral	Material grosso: 70% Material fino: 20% Poros: 10% Razão G/F: 3,5	Material grosso: 55% Material fino: 30% Poros: 15% Razão G/F: 1,8
Microestrutura	Pedal; material solto; grãos simples; (blocos subangulares, fracamente desenvolvida; pequenos; parcialmente acomodado observados somente em luz UV, que se desfazem em grãos simples) Distribuição aleatória; sem orientação.	Pedal; material solto; grãos simples; (blocos subangulares, fracamente desenvolvida; pequenos; parcialmente acomodado observados somente em luz UV, que se desfazem em grãos simples) Distribuição aleatória; sem orientação.
Material fino	Argila Vermelho-amarelo Sem orientação; Distribuição aleatória	Argila Vermelho-amarelo Sem orientação; Distribuição aleatória
Material grosso	Quartzo: 95% Carvões: 5% Sem orientação; Distribuição aleatória	Quartzo: 100% Obs: Material muito mal selecionado Sem orientação; Distribuição aleatória
Poros	Empilhamento Complexo: 85% Cavidades: 15% Sem Orientação; Distribuição aleatória.	Empilhamento Complexo: 70% Cavidades: 10% Canais: 20% Sem Orientação; Distribuição aleatória.
Distribuição relativa	Gefúrica	Gefúrica
Feições	Texturais: Preenchimento solto; contínuo; arredondado; aderente Quartzos revestidos; Carvões, médio Acumulo de argila, subangular com quartzo interno muito pequenos (diferentes dos da matriz do solo).	Texturais: Preenchimento denso; completo; circular; aderente

Atributo	P3 – Bw10	
Geral	Material grosso: 50% Material fino: 30%	Poros: 20% Razão G/F: 1,6
Microestrutura	Pedal; material solto; grãos simples; (blocos subangulares, fracamente desenvolvida; pequenos; parcialmente acomodado observados somente em luz UV, que se desfazem em grãos simples) Distribuição aleatória; sem orientação.	
Material fino	Argila Vermelho-amarelo	Sem orientação; Distribuição aleatória
Material grosso	Quartzo: 100% Obs: Material muito mal selecionado	Sem orientação; Distribuição aleatória
Poros	Empilhamento Complexo: 40% Cavidades: 35% Canais: 25%	Sem Orientação; Distribuição aleatória.
Distribuição relativa	Gefúrica	
Feições	Texturais: Preenchimento solto; descontínuo; arredondado; aderente Preenchimento denso; completo; circular; aderente. Alinhamento de grãos de quartzo na forma arredondada, indicativo de movimentação de minhocas.	