

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL**  
**FACULDADE DE AGRONOMIA**  
**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIA DO SOLO**

**ALTERAÇÕES MINERALÓGICAS, QUÍMICAS E FÍSICAS DE SOLOS DO BRASIL**  
**DETERMINADAS POR FATORES BIÓTICOS (TÉRMITAS E PLANTAS)**

**Tatiele Fruett dos Santos**  
**(Tese de Doutorado)**

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL**  
**FACULDADE DE AGRONOMIA**  
**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIA DO SOLO**

**ALTERAÇÕES MINERALÓGICAS, QUÍMICAS E FÍSICAS DE SOLOS DO BRASIL**  
**DETERMINADAS POR FATORES BIÓTICOS (TÉRMITAS E PLANTAS)**

**TATIELE FRUETT DOS SANTOS**  
**Engenheira Agrônoma**  
**Mestre em Ciência do Solo (UFRGS)**

**Tese apresentada como um dos requisitos à obtenção do Grau de**  
**Doutora em Ciência do Solo.**

**Porto Alegre**  
**Rio Grande do Sul - Brasil**  
**Abril de 2020**

### CIP - Catalogação na Publicação

Santos, Tatiele Fruett  
ALTERAÇÕES MINERALÓGICAS, QUÍMICAS E FÍSICAS DE  
SOLOS DO BRASIL DETERMINADAS POR FATORES BIÓTICOS  
(TÉRMITAS E PLANTAS) / Tatiele Fruett Santos. -- 2020.  
146 f.  
Orientador: Alberto Vasconcelos Inda.

Tese (Doutorado) -- Universidade Federal do Rio  
Grande do Sul, Faculdade de Agronomia, Programa de  
Pós-Graduação em Ciência do Solo, Porto Alegre, BR-RS,  
2020.

1. Térmitas. 2. bioturbação. 3. mineralogia. 4. uso  
do solo. 5. latossolo. I. Inda, Alberto Vasconcelos,  
orient. II. Título.

TATIELE FRUETT DOS SANTOS  
Engenheira Agrônoma (UFSM)  
Mestre em Ciência do Solo (UFRGS)

## **TESE**

Submetida como parte dos requisitos  
para obtenção do Grau de

### **DOCTORA EM CIÊNCIA DO SOLO**

Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo  
Faculdade de Agronomia  
Universidade Federal do Rio Grande do Sul  
Porto Alegre (RS), Brasil

Aprovado em: 11/05/2020  
Pela Banca Examinadora

Homologado em: 30/07/2020  
Por



ALBERTO VASCONCELLOS INDA JUNIOR  
Orientador-PPG Ciência do Solo

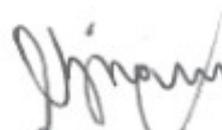


ALBERTO VASCONCELLOS INDA JUNIOR  
Coordenador do  
Programa de Pós-Graduação em  
Ciência do Solo

PAULO CESAR DO NASCIMENTO  
PPG Ciência do Solo/UFRGS  
(através de videoconferência)

YURI LOPES ZINN  
PPG Ciência do Solo/UFLA  
(através de videoconferência)

VIDAL BARRÓN LÓPEZ DE TORRE  
Universidad de Córdoba/Espanha  
(através de videoconferência)



CARLOS ALBERTO BISSANI  
Diretor da Faculdade  
de Agronomia

*“El Suelo nos da todo lo que necesitamos.  
Por eso necesita que lo cuidemos.”  
(autor desconhecido)*

## AGRADECIMENTOS

Agradeço ao Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo e Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS) pela oportunidade para a realização do doutorado, infraestrutura e por todo o conhecimento transmitido. Ao meu orientador professor Alberto Vasconcellos Inda, pela confiança, paciência e amizade durante estes 6 anos em que trabalhamos juntos. Aos professores Edson Bortoluzzi, Enilson Saccol, Josué Santana, Paulo César do Nascimento, Rodrigo Jacques e Yuri Zinn pela disponibilidade e contribuição para realização deste trabalho. Aos funcionários da UFRGS em especial ao Jader, Adão, Tonho e Tio Zé por sempre estar nos ajudando no dia a dia e disponíveis para ajudar no que precisamos. À professora Carla Rossa por todo apoio e ensinamentos essenciais para o melhor aproveitamento do doutorado sanduíche.

Ao meu supervisor do doutorado sanduíche professor Vidal Barrón pelos ensinamentos e pela oportunidade na Universidad de Córdoba (UCO). Assim como agradeço muito aos amigos do laboratório da UCO, José Maria, Mónica, Adrian, Antonio, Campi, Pepe, Mercedes e Maribel, pela acolhida carinhosa durante este período que me fizeram sentir em família. À Jessica pela amizade durante estes anos e ajuda na Espanha para melhor me adaptar nesta fase, em que podemos compartilhar das mesmas oportunidades. Às meninas do PPG, Carol, Edsleine, Estéfane, Jéssica(s), Letícia, Suane e Vanessa pela amizade, troca de experiências, desabafos e apoio em nossa salinha e laboratório do Raio. E aos demais colegas do PPG pelas conversas e momentos compartilhados principalmente nos nossos tradicionais seminários nas quartas-feiras.

Às bolsistas de iniciação científica Antônia e Keyrauan pelo apoio técnico e principalmente amizade que construímos desde o início das atividades do doutorado, que foram fundamentais para a realização deste trabalho. E também agradeço a um bolsista muito especial (Otonio Dutra), que me acompanhou em todas minhas angústias e vitórias durante estes anos, sendo fundamental para realização de mais essa etapa de minha vida. À CNPq pelo financiamento da bolsa essencial para realização de nossas pesquisas. E por fim, mas não menos importante agradeço à minha família e amigos do CTG que fizeram os dias de trabalhos se tornarem mais leves.

# ALTERAÇÕES MINERALÓGICAS, QUÍMICAS E FÍSICAS DE SOLOS DO BRASIL DETERMINADAS POR FATORES BIÓTICOS (TÉRMITAS E PLANTAS)<sup>1</sup>

Autor: Tatiele Fruett dos Santos

Orientador: Alberto Vasconcelos Inda

## RESUMO

Os organismos que habitam o solo compreendem espécies vegetais, fungos, bactérias, minhocas e insetos, dentre outros que atuam na transformação dos constituintes orgânicos e minerais do solo. Os térmitas são os organismos predominantes e um dos mais importantes para o solo. As plantas também exercem papéis fundamentais nas transformações pedogênicas do solo. Deste modo, o enfoque neste estudo nos organismos térmitas e plantas foram utilizados para prever possíveis modificações no comportamento do solo e influência nas propriedades físicas, químicas e mineralógicas dos solos. Assim dividimos o trabalho em 3 estudos. O estudo 1 e 2 tem como objetivo geral: Relacionar os materiais utilizados pelos térmitas na construção de termiteiros com os materiais dos solos adjacentes aos mesmos, quanto a composição, características e concentração de minerais, bem como relacionar as propriedades químicas e físicas de ambos os materiais. Já o estudo 3 tem como objetivo geral: Avaliar o impacto na mineralogia do solo causado por mudanças pedoambientais recentes na superfície de um Latossolo do sul do Brasil, determinadas por 30 anos com florestamento de eucalipto e por 30 anos com lavouras anuais, bem como identificar os efeitos das alterações mineralógicas sobre o comportamento físico e químico do solo. Para isso no primeiro estudo as amostras de solos foram coletadas em condição de vegetação natural em camada de 0 a 0,20 m e 0,20 a 0,40 m, em uma distância próxima do termiteiro. Também foram coletadas amostras do termiteiro epígio no meio e topo. Os locais de amostragem foram nos estados do RS, MT, PA, MG e PI. Já o segundo estudo foi no município de Júlio de Castilhos – RS, onde coletaram-se amostras no campo nativo, floresta de eucalipto e lavoura, até 0,6 m de profundidade. Os resultados evidenciam que os térmitas são seletivos quanto ao tamanho de partículas do solo transportadas e importantes atores na retenção e ciclagem de nutrientes e matéria orgânica. E foi possível observar a manutenção química e uma nova reestruturação do solo frente às mudanças pedoambientais recentes no Latossolo Vermelho, determinadas por 30 anos com florestamento de eucalipto e cultivos anuais.

Palavras-chaves: Térmitas, bioturbação, mineralogia, uso do solo, latossolo

---

<sup>1</sup> Tese de Doutorado em Ciência do Solo. Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo, Faculdade de Agronomia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre (127 p.) Abril, 2020. Trabalho realizado com apoio financeiro do CNPq.

# **MINERALOGICAL, CHEMICAL AND PHYSICAL CHANGES OF SOILS IN BRAZIL DETERMINED BY BIOTIC FACTORS (TERMS AND PLANTS)<sup>1</sup>**

Author: Tatiele Fruett dos Santos

Adviser: Alberto Vasconcellos Inda

## **RESUMO**

The organisms that inhabit the soil include plant species, fungi, bacteria, earthworms and insects, among others that act in the transformation of the organic and mineral constituents of the soil. Termites are the predominant organisms and one of the most important for the soil. Plants also play key roles in pedogenic soil changes. Thus, the focus in this study on termite organisms and plants was used to predict possible changes in soil behavior and influence on physical, chemical and mineralogical properties of soils. So we divided the work into 3 studies. The study 1 and 2 has the general objective: To relate the materials used by termites in the construction of nest with the materials of the soils adjacent to them, regarding the composition, characteristics and concentration of minerals, as well as to relate the chemical and physical properties of both materials. Study 3, on the other hand, aims to: Assess the impact on soil mineralogy caused by recent pedoenvironmental changes on the surface of an Oxisol in southern Brazil, determined for 30 years with eucalyptus forestation and for 30 years with annual crops, as well as identifying the effects of mineralogical changes on the physical and chemical behavior of the soil. For this, in the first study, soil samples were collected in natural vegetation condition in a 0 to 0.20 m and 0.20 to 0.40 m layer, at a distance close to the nest. Samples from the nest were also collected in the middle and top. The sampling locations were in the states of RS, MT, PA, MG and PI. The second study was in the municipality of Júlio de Castilhos - RS, where samples were collected in the native field, eucalyptus forest and crops, up to 0.6 m deep. The results show that the termites are selective as to the size of soil particles transported and important players in the retention and cycling of nutrients and organic matter. And it was possible to observe the chemical maintenance and a new restructuring of the soil in view of the recent pedoenvironmental changes in the Oxisol, determined by 30 years with eucalyptus forestation and annual crops.

Keywords: Termites, bioturbation, mineralogy, land use, Oxisol

---

<sup>1</sup> Doctoral Thesis in Soil Science. Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo, Faculdade de Agronomia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre (127 p.) April, 2020. Research supported by CNPq.

## SUMÁRIO

1.	CAPÍTULO I: INTRODUÇÃO GERAL E JUSTIFICATIVA .....	1
2.	CAPÍTULO II: REFERENCIAL TEÓRICO .....	3
3.	CAPÍTULO III: SELETIVIDADE DE CONSTITUINTES DO SOLO POR ORGANISMOS TÉRMITAS NA CONSTRUÇÃO DOS NINHOS.....	27
3.1.	Introdução.....	27
3.2.	Hipótese .....	30
3.3.	Objetivos.....	30
3.4.	Metodologia .....	30
3.4.1.	Seleção dos solos e preparo de amostras .....	30
3.4.2.	Análise granulométrica.....	32
3.4.3.	Área superficial específica (ASE).....	33
3.4.4.	Suscetibilidade magnética.....	33
3.4.5.	Carbono orgânico total (COT).....	34
3.4.6.	Dissoluções seletivas dos óxidos de ferro .....	34
3.4.7.	Difratometria de raios x (DRX) .....	35
3.4.8.	Espectroscopia de refletância difusa.....	35
3.4.10.	Análise dos dados .....	37
3.5.	Resultados e discussão.....	37
3.5.1.	Caracterização física e químicas. ....	37
3.5.2.	Análise dos espectros do Visível ao MIR dos solos e termiteiros.....	40
3.5.3.	Difratometria de raios x dos solos e termiteiros .....	53
3.6.	Considerações finais .....	56
4.	CAPÍTULO IV: ALTERAÇÕES DE ATRIBUTOS QUÍMICOS E MINERALÓGICOS DO SOLO PELA AÇÃO DE TÉRMITAS .....	58
4.1.	Introdução.....	58

4.2.	Hipótese .....	61
4.3.	Objetivos.....	61
4.4.	Metodologia .....	61
4.4.1.	Seleção dos solos e preparo de amostras .....	61
4.4.2.	Fluorescência de raios x (FRX).....	62
4.4.3.	Difratometria de raios x (DRX) .....	63
4.4.5.	Identificação dos organismos térmitas .....	64
4.4.6.	Análise estatística .....	64
4.5.	Resultados e discussão.....	65
4.5.1.	Propriedades químicas .....	67
4.5.2.	Características mineralógicas .....	68
4.5.3.	Identificação dos térmitas.....	65
4.6.	Considerações finais .....	80
5.	<b>CAPÍTULO V: ALTERAÇÕES MINERALÓGICAS, QUÍMICAS E FÍSICAS RECENTES EM LATOSSOLO VERMELHO DO SUL DO BRASIL SOB USOS DISTINTOS.....</b>	<b>81</b>
5.1.	Introdução.....	81
5.2.	Hipótese .....	84
5.3.	Objetivos.....	85
5.4.	Metodologia .....	85
5.4.1.	Descrição do local de coleta e preparo de amostras .....	85
5.4.2.	Análise granulométrica.....	88
5.4.3.	Área superficial específica (ASE).....	89
5.4.4.	Suscetibilidade magnética.....	89
5.4.5.	Carbono orgânico total (COT).....	89
5.4.6.	Complexo sortivo .....	90
5.4.7.	Dissoluções seletivas dos óxidos de ferro .....	90
5.4.8.	Fluorescência de raios x (FRX).....	90
5.4.9.	Concentração da fração óxidos de ferro .....	91
5.4.10.	Difratometria de raios x (DRX) .....	91
5.4.11.	Espectroscopia de refletância difusa.....	91
5.4.12.	Confecção de lâminas delgadas .....	92
5.4.13.	Análise dos dados.....	92
5.5.	Resultados e discussão.....	93

5.6.	Considerações finais .....	112
6.	CAPÍTULO VI: CONCLUSÃO GERAL.....	113
7.	REFERÊNCIAS .....	114

## RELAÇÃO DE TABELAS

Tabela 1. Identificação e localização geográfica das coletas dos termiteiros e solos adjacentes. ....	31
Tabela 2. Propriedades físicas dos termiteiros e solos adjacentes .....	39
Tabela 3. Médias dos teores de ferro extraído com ditionito-citrato-bicabornato de sódio (Fed), oxalato de amônio (Feo) e a relação Feo/Fed .....	41
Tabela 4. Coeficientes de determinação ( $R^2$ ) relativo as correlações entre materiais do solo e do termiteiro nos ambientes estudados, em relação as faixas do VIS e MIR.....	48
Tabela 5. Relação hematita/(hematita+goethita) (Hm/(Hm+Gt)) e classificação da amostra conforme essa proporção .....	49
Tabela 6. Parâmetros de cor dos materiais dos solos e dos termiteiros. ....	51
Tabela 7. Gêneros das espécies coletadas e hábito alimentar: .....	65
Tabela 8. Porcentagem da massa da composição mineral obtida por Fluorescência de raios x. ....	68
Tabela 9. Área das reflexões dos argilominerais 2:1 (2:1) e da caulinita (Ct) nos difratogramas de raios x das frações argila fina (AF) e argila grossa (AG).....	73
Tabela 10. Parâmetros da deconvolução da reflexão hkl 001 da caulinita.....	76
Tabela 11. Porcentagem da massa da composição mineral obtida por Fluorescência de raios x. ....	97

Tabela 12. Teores de ferro e alumínio extraídos com ditionito citrato bicarbonato de sódio e oxalato de amônio. ....	99
Tabela 13. Porcentagem de argila e dados de suscetibilidade magnética da fração terra fina seca ao ar dos três usos. ....	99
Tabela 14. Coeficientes de determinação ( $R^2$ ) relativo as correlações entre os dados dos espectros do solo sob campo nativo (CN) em relação aos usos florestamento de Eucalipto (EUC) e lavoura (LAV). ....	104
Tabela 15. Parâmetros de cor do solo sob campo nativo (CN), florestamento de Eucalipto (EUC) e lavoura (LAV). ....	105
Tabela 16. Descrição micromorfológica da lâmina delgada das amostras de campo nativo (CN), Lavoura (LAV), Eucalipto (EUC). ....	107

## RELAÇÃO DE FIGURAS

Figura 1. Efeitos benéficos dos térmitas em florestas tropicais em situação de escassez de água.....	6
Figura 2. Tipos de cupinzeiros ou termiteiros (ninhos) e alguns gêneros. ....	7
Figura 3. Diferentes formatos de térmitários (ninhos) de montículo. Fotos: do autor.....	8
Figura 4. Organização das castas no ciclo da vida dos térmitas.. ....	9
Figura 5. Rio Grande do Sul é o terceiro maior produtor nacional de grãos com 14,8% da produção total. ....	15
Figura 6. Distribuição de floresta plantada por município no RS (2017). ....	15
Figura 7. Esquerda: Geometria de Bragg para leitura de DRXs. Direita: Esquema do difratômetro.....	20
Figura 8. Difratômetro de raios x da Universidad de Córdoba (UCO).....	21
Figura 9. Esquema excitação, amostra e detecção – Fluorescência de raios x.. ....	22
Figura 10. Equipamento de análise de Fluorescência de raios X da Universidad de Córdoba (UCO).....	22
Figura 11. Espectro eletromagnético destacando a faixa do visível e infravermelhos. ....	23

Figura 12. Espectrômetro de infravermelho (MIR) da Universidad de Córdoba (UCO) .....	24
Figura 13. Análise micromorfológica utilizando microscópio ótico. ....	26
Figura 14. Termiteiro (A) e amostragem do solo adjacente (B). Foto do local da amostra coletada em Eldorado do Sul – RS. ....	31
Figura 15. Mapa da distribuição das coletas no Brasil. ....	32
Figura 16. Instrumento utilizado para análise de suscetibilidade magnética ....	34
Figura 17. Preparação das amostras e equipamento utilizado na leitura da reflectância difusa. ....	36
Figura 18. Porcentagem de argila dos termiteiros e dos solos adjacentes. ....	38
Figura 19. Carbono orgânico total dos termiteiros e solos adjacentes. ....	39
Figura 20. Relação entre teores de argila e concentração de ferro pedogênico. ....	42
Figura 21. Relação entre teor de argila e a suscetibilidade magnética de todos os ambientes. ....	43
Figura 22. Relação entre a concentração ferro pedogênicos e a suscetibilidade magnética de todos os ambientes. ....	44
Figura 23. Área superficial específica dos termiteiros e solos adjacentes. ....	44
Figura 24. Relação entre o teor de argila e a área superficial específica de todos os ambientes. ....	45
Figura 25. Espectros da faixa do Visível (VIS) e Infravermelho médio (MIR) dos materiais do solo e do termiteiro dos ambientes MG e MT. ....	46
Figura 26. Espectros da faixa do visível e infravermelho médio (MIR) das amostras de PA, PI, RS JC e RS ES. Nas profundidades 0-0,20 e 0,20-0,40 m e termiteiros na porção meio e topo. ....	47
Figura 27. Análise de componentes principais dos materiais a partir dos dados	

espectrais da faixa do infravermelho médio.....	52
Figura 28. Difratogramas de raios X da fração terra fina seca ao ar dos materiais da camada 0-0,20 m do solo (S) e da porção meio do termiteiro (T) nos ambientes Rio Grande do Sul (RS-JC), Rio Grande do Sul (RS-ES) e Minas Gerais (MG). .....	54
Figura 29. Difratogramas de raios X da fração terra fina seca ao ar dos materiais da camada 0-0,20 m do solo (S) e da porção meio do termiteiro (T) nos ambientes Piauí (PI), Mato Grosso (MT) e Pará (PA).....	55
Figura 30. Confecção de lâminas orientadas da fração argila total. ....	63
Figura 31. Espécimes de térmitas coletados para identificação referente aos ambientes. ....	66
Figura 32. Difratogramas de raios x da fração argila total (< 2 µm) dos solos e dos termiteiros nos ambientes .....	70
Figura 33. Difratogramas de raios x da fração argila fina (< 0,2 µm) dos solos e dos termiteiros nos ambientes .....	71
Figura 34. Difratogramas de raios x da fração argila grossa (2 a 0,2 µm) dos solos e dos termiteiros nos ambientes .....	72
Figura 35. Gráficos da deconvolução das reflexões hkl 001 da caulinita nos difratogramas da fração argila grossa dos materiais solo e termiteiro do ambiente MG.....	77
Figura 36. Gráficos da deconvolução das reflexões hkl 001 da caulinita nos difratogramas da fração argila grossa dos materiais solo e termiteiro do ambiente MT.....	77
Figura 37. Gráficos da deconvolução das reflexões hkl 001 da caulinita nos difratogramas da fração argila grossa dos materiais solo e termiteiro do ambiente PA. ....	78
Figura 38. Gráficos da deconvolução das reflexões hkl 001 da caulinita nos difratogramas da fração argila grossa dos materiais solo e termiteiro do ambiente	

Pl. ....	78
Figura 39. Gráficos da deconvolução das reflexões hkl 001 da caulinita nos difratogramas da fração argila grossa dos materiais solo e termiteiro do ambiente RS-JC. ....	79
Figura 40. Gráficos da deconvolução das reflexões hkl 001 da caulinita nos difratogramas da fração argila grossa dos materiais solo e termiteiro do ambiente RS-ES. ....	79
Figura 41. Mapa com a localização do estudo no município de Júlio de Castilhos – RS / Brasil. ....	86
Figura 42. Mapa do Bioma Pampa no Rio Grande do Sul, Brasil. ....	86
Figura 43. Perfil de elevação da área do experimento com a localização das trincheiras (■) em cada tratamento. ....	88
Figura 44. Teores médios de argila ao longo das camadas do solo sob os usos campo nativo (CN), florestamento com Eucalipto (EUC) e lavoura (LAV). ....	93
Figura 45. Carbono orgânico total (COT) e atributos do complexo sortivo do solo sob os usos campo nativo (CN), florestamento de Eucalipto e lavoura (LAV). .	95
Figura 46. Área superficial específica (ASE) dos usos campo nativo (CN), florestamento de Eucalipto e lavoura (LAV) nas profundidades de 0 a 0,6 m. ....	96
Figura 47. Relação entre a porcentagem de massa dos elementos químicos determinados por fluorescência de raios x e o teor de argila do solo sob os diferentes usos. ....	97
Figura 48. Relação entre os teores de ferro e alumínio na estrutura dos óxidos de ferro pedogênicos e os teores de argila do solo sob os diferentes usos. ....	98
Figura 49. Relação entre os valores de susceptibilidade magnética em baixa frequência ( $\chi_{LF}$ ) e os teores de argila e Fe relativo aos óxidos de ferro pedogênicos (Fed) do solo sob os diferentes usos. ....	100
Figura 50. Difratogramas de raios x da fração argila orientada da camada 0-0,10	

m do solo sob campo nativo (CN), florestamento de Eucalipto (EUC) e lavoura (LAV).....	101
Figura 51. Difratoformas de raios x da fração óxidos de ferro concentrada das camadas 0-0,05 e 0,05-0,10 m do solo sob campo nativo (CN), florestamento de Eucalipto (EUC) e lavoura (LAV).....	101
Figura 52. Espectros da faixa do Visível (lado esquerdo) e Infravermelho próximo (lado direito) do solo sob os usos campo nativo (CN), florestamento de Eucalipto (EUC) e lavoura (LAV) nas camadas 0-,05, 0,05-0,10 e 0,10-0,20 m.....	102
Figura 53. Espectros da faixa do infravermelho médio do solo sob os usos campo nativo (CN), florestamento de Eucalipto (EUC) e lavoura (LAV) nas camadas 0-0,05, 0,05-0,10 e 0,10-0,20 m.....	103
Figura 54. Correlações entre os parâmetros de cor e os teores de carbono orgânico total (COT) e argila do solo sob os diferentes usos do solo.....	106
Figura 55. PCA dos três usos do solo usando os espectros da faixa do MIR nas camadas 0-5, 5-10 e 10-20 cm. ....	106
Figura 56. Micrografias em PPL e XPL da amostra do Campo Nativo.....	109
Figura 57. Micrografias em PPL e XPL da amostra da Lavoura .....	110
Figura 58. Micrografias em PPL e XPL da amostra do Cultivo de Eucalipto...	111

## 1. CAPÍTULO I: INTRODUÇÃO GERAL E JUSTIFICATIVA

O solo é formado pela ação de cinco fatores: material de origem, relevo, clima, tempo e organismos. Os organismos que habitam o solo compreendem espécies vegetais, fungos, bactérias, minhocas e insetos, que atuam na transformação dos constituintes orgânicos e minerais do solo. Os insetos constituem a maior biodiversidade nos trópicos, dentre os artrópodes, os térmitas são organismos predominantes e de expressiva importância para os solos.

Os térmitas são insetos eussociais da Ordem Blattodea, atualmente classificados na subordem Isoptera e pertencentes à macrofauna do solo, que inclui organismos ditos visíveis a olho nu (>2,0 mm). Devido à sua importância como pragas de madeira, estes são relativamente bem estudados em termos biológicos, comportamentais e taxonômicos, apesar de ainda existir lacunas importantes. No entanto seus benefícios para o ecossistema são mais expressivos que a importância como praga. Térmitas de solo são vistos como “engenheiros do ecossistema” e alguns como “espécie chave”, por serem importantes para sobrevivência e manutenção de algumas espécies. Deste modo, seus efeitos no solo são vistos como possíveis amenizadores das mudanças antrópicas e até mesmo com relação a mudanças climáticas, considerando que os térmitas são capazes de resistir a condições adversas de temperatura. Como exemplo, eles são encontrados sob condições desérticas da Namíbia, onde aumentam a biodiversidade local resistindo a extensos períodos de secas.

As plantas também exercem importantes funções nas transformações pedogênicas. As plantas, animais e microorganismos agem em conjunto em processos de formação dos solos em reações que aceleram o intemperismo das rochas. A contribuição das plantas por meio de suas raízes, palhada e materiais decompostos no solo atuam no equilíbrio no sistema, podendo modificar as condições pedoambientais e desta forma causar alterações químicas, físicas e mineralógicas no solo.

Considerando o exposto, o enfoque em fatores biológicos, representado pelos organismos térmitas e plantas, é importante para o melhor entendimento da influência dos mesmos na formação, modificação e comportamento físico e químico dos solos. Por isso, objetiva-se neste estudo relacionar os materiais utilizados por térmitas na construção de termiteiros com os materiais dos solos adjacentes aos mesmos, sobre as propriedades químicas, físicas e mineralógicas de ambos os materiais. E avaliar o impacto nas características químicas, físicas e mineralógicas de um Latossolo Vermelho após 30 anos de uso com lavouras anuais e florestamento de Eucalipto (*Eucalyptus* spp.) em substituição ao campo nativo.

## **2. CAPÍTULO II: REFERENCIAL TEÓRICO**

O presente trabalho discute sobre as mudanças ocasionadas pelas ações dos organismos térmitas e ações antrópicas no solo, em especial as possíveis alterações na mineralogia do solo. Assim, o seguinte referencial teórico será dividido em três partes: Inicialmente será abordada a influência dos térmitas no ambiente e nas propriedades dos solo; após, será descrito o que a literatura fala sobre a influência antrópica em solos subtropicais; e por último, algumas técnicas espectrais e micromorfológica que são aqui tratadas para caracterização das propriedades do solo.

## **Influência dos térmitas no solo**

Os insetos predominantes em ambientes tropicais e subtropicais podem causar alterações no meio ambiente, em especial ao solo. Segundo Miklós (2012), ao considerar as diversas espécies que se encontram no solo destacam-se as minhocas, térmitas, formigas e raízes de plantas, pois são estes que mais impactam o solo devido à grandeza de suas populações, biomassas e ações transformadoras do ambiente.

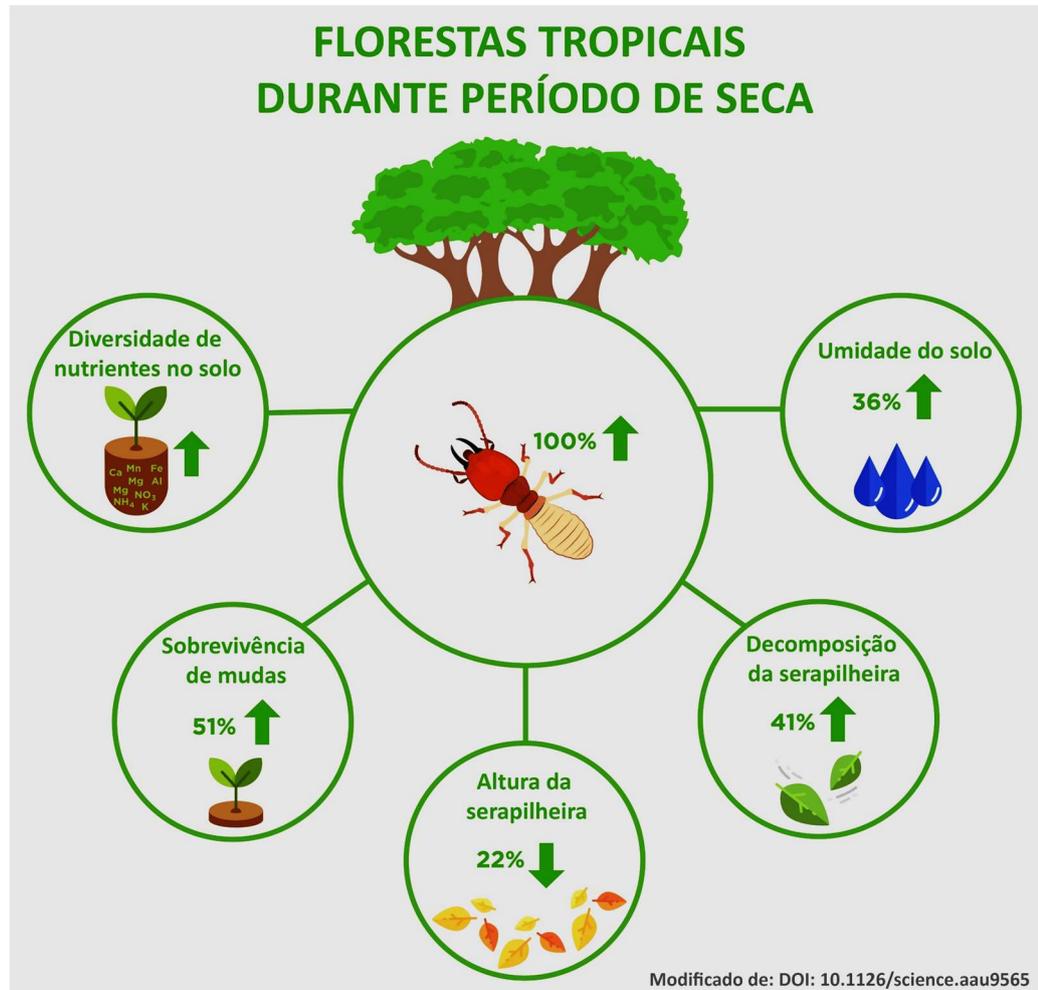
Há muitas pesquisas sobre a ação das formigas e, principalmente, sobre minhocas como transformadores das características do solo (Jouquet et al., 2016; Steffen et al., 2013; Miklós, 2012; Wink et al., 2005). No entanto, quanto a atuação dos térmitas, também chamados de cupins, há questões discordantes quanto a ação dos mesmos na formação do solo. Os térmitas são mais adaptados a pedoambientes mais secos e com temperaturas elevadas, onde podem substituir a função das minhocas (Evans et al., 2011; Jouquet et al., 2016).

Térmitas são representantes da macrofauna do solo, ou seja, pertencem ao grupo de invertebrados que possuem dentre outras características o tamanho de mais de 2 mm de diâmetro corporal. Tanto os térmitas quanto as minhocas e diplópodes têm a habilidade de cavar tuneis e criar estruturas que facilitam sua locomoção e sobrevivência no solo, além de gerar depósitos de coprólitos e fezes resultantes da atividade alimentar. Com essa ação, que interfere na estrutura do solo, eles são vistos como “engenheiros do ecossistema” (Stork e Eggleton, 1992; Correia, 2002).

Os térmitas promovem a bioturbação do solo, a qual inclui a abertura de poros que serão caminhos para os fluxos de água e gases, auxiliando deste modo a aeração e a infiltração de água no solo. Além disso, participam da agregação do solo, afetando a quantidade de microporos e macroporos do solo (Correia, 2002). Conforme Miklós (2012), com a bioturbação do solo, os térmitas trazem para a superfície partículas de argila acumuladas em profundidade pelo processo pedogenético de translocação de argila (lessivagem). Os térmitas têm

relevância na formação do húmus e incorporação de carbono no solo, na ciclagem do carbono, na dinâmica do CO<sub>2</sub> e no aquecimento global; bem como na morfologia do solo, devido a movimentação de materiais no solo (Holt e Lepage, 2000; Jouquet et al., 2011; Miklós, 2012; Bottinelli et al., 2015; Jouquet et al., 2016).

Sempre foi difícil separar qual era o papel real dos térmitas de outros organismos, que também realizam funções parecidas (como microrganismos decompositores ou formigas). Um experimento realizado por Ashton et al. (2019), na floresta tropical de Bornéu na Malásia, eliminou os térmitas com iscas envenenadas. Durante dois anos foram avaliadas parcelas com e sem ação dos térmitas. Em períodos chuvosos se verificaram diferenças expressivas, porém nos períodos de seca a atividade dos térmitas aumentou e deste modo foi possível observar as contribuições essenciais para manutenção da floresta, especialmente considerando as atuais mudanças climáticas. Abaixo no texto está um desenho esquemático que destaca os resultados marcantes e positivos que este trabalho encontrou, como aumento da umidade do solo, diversidade de nutrientes, decomposição da serapilheira e sobrevivência das mudas.



**Figura 1.** Efeitos benéficos dos térmitas em florestas tropicais em situação de escassez de água. Fonte: Disponível em: <<http://termite.wikidot.com/bio:guardioes>>

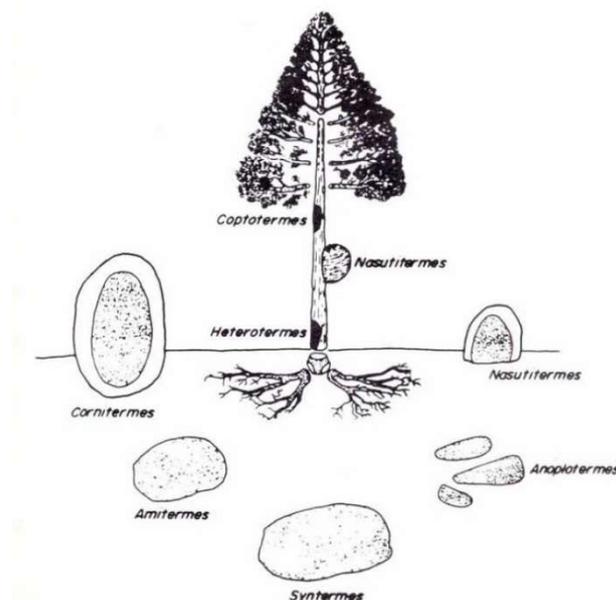
A base alimentar dos térmitas de solo geralmente é a mistura de estruturas minerais com compostos celulósicos. A passagem dessas misturas pelo trato digestivo auxilia na decomposição e na reciclagem de nutrientes. Eles realizam simbioses com bactérias fixadoras de nitrogênio, as quais compensam a alta relação C:N na sua dieta (Mello et al., 2009). Seu intestino é formado por compartimentos com diferentes gradientes de oxigênio e hidrogênio, podendo o pH alcançar valores de 12,5 (Donovan, S. E.; Eggleton. P.; Bignell, D. E., 2001a; Kaschuk et al., 2006). Podem ainda ocorrer interações mutualísticas no interior do tubo digestivo com protozoários fragelados e com térmitas inferiores (Correia, 2002). Estas informações certamente contribuem para o entendimento do potencial de mudanças/alterações que os térmitas podem determinar nas propriedades do solo.

Os térmitas se alimentam de uma grande variedade de produtos, tanto de origem animal como vegetal. Faz parte da dieta madeira, gramíneas, serapilheira, fungos, líquens, material orgânico presente no solo, excrementos, carcaça de animais e ninhos construídos por outras espécies de animais (Lee e Wood, 1971; Miura e Matsumoto, 1997; Resende, 2012). Resende (2012) sugeriu o uso de grupos funcionais alimentares divididos em: xilófagos, comedores de serapilheira, intermediários e humívoros, sendo os três últimos são sinônimos de geófagos, termo utilizado por Donovan et al. (2001b). Já uma das classificações mais utilizadas os divide em: geófagos os que ingerem partículas minerais do solo misturadas com matéria orgânica; intermediários que se alimentam de uma mistura de solo e madeira; xilófagos que consomem madeira; e comedores de serapilheira (Souza e Brown, 1994).

Quanto ao tipo de seus ninhos, os térmitas podem ser divididos em dois grupos (Figura 2):

a) Térmitas que vivem em madeira.

b) Térmitas que habitam o solo. Estes são subdivididos em subterrâneos superficiais, que são os térmitas de montículo, e arborícolas ou semi-arborícolas.



**Figura 2.** Tipos de cupinzeiros ou termiteiros (ninhos) e alguns gêneros. Fonte: Berti Filho (1993)

Os termiteiros de montículo possuem o seu formato variável (Figura 3), mas normalmente tem a forma cônica, que pode atingir na escala de centímetros até vários metros de altura. A composição do material utilizado para construção do termiteiro envolve excrementos e saliva produzidos pelos próprios térmitas, além do solo circundante.

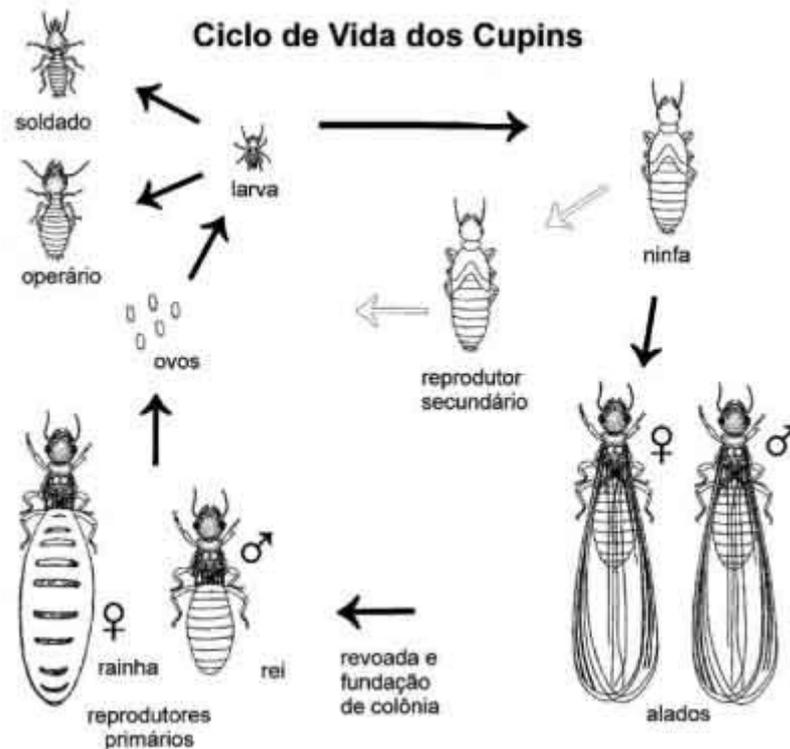


**Figura 3.** Diferentes formatos de termiteiros (ninhos) de montículo. Fotos: do autor.

O diâmetro de partículas que estes organismos podem carregar é relativo ao tamanho de suas mandíbulas. Portanto, grãos do tamanho de cascalho não são utilizados para a construção dos ninhos. Estima-se que os térmitas podem revolver de 300 a 1000 kg de solo por hectare/ano (Lepsch, 2011). Além do montículo eles formam galerias subterrâneas e carreiros (estradas) que formam um sistema isolado e fechado do meio externo. O termiteiro é erguido por compartimentos, o ninho cresce tanto para cima como para baixo do solo, cerca de 25 % do termiteiro pode ser subterrâneo. Entre as milhares de câmaras, a mais importante é onde fica a rainha, responsável pela fundação e reprodução do ninho. A entrada do termiteiro é feita por canais

subterrâneos que saem no solo, por onde as espécies de operários buscam alimento e material para construção do ninho (Vasconcelos, Y., 2011).

Os térmitas são chamados de organismos eussociais pois possuem uma organização social formada por castas, compostas por indivíduos que não podem desempenhar papéis de outras castas, exceto o cuidado cooperativo com a prole. São eles: os reprodutores, que se transformam em reis e rainhas; e os operários e soldados, que exercem funções específicas na colônia. Além disso, possuem diferenças morfológicas, fisiológicas de desenvolvimento e funcionais. Os soldados são responsáveis pela defesa da colônia. Os operários são os responsáveis pelo cuidado das larvas, alimentação de todos e construção e reparos do termiteiro. Os reprodutores alados saem voando das colônias e perdem as asas, formam novos casais e fundam novas colônias. Segundo o ciclo (Figura 4), dos ovos nascem as ninfas que podem se transformar em operários, soldados ou reprodutores (La Cruz et al. 2014).



**Figura 4.** Organização das castas no ciclo da vida dos térmites. Fonte: La Cruz et al. (2014).

São insetos vistos como pragas, no entanto seus benefícios ao ambiente são evidentes. Estima-se que apenas 10% das espécies de térmitas podem causar dano econômico (Rosenberg, D. M.; Danks, H. V.; Lehmkuhl, D. M., 1986; Lima e Costa, 2007; Melo e Silva, 2008). Pesquisas indicam que os térmitas consumidores de húmus têm suas populações reduzidas com o aumento de níveis de perturbação antrópica, enquanto as populações dos consumidores de madeira apresentam relação positiva com a perturbação (Eggleton et al. 1996, 2002; Thomanzini e Thomanzini, 2002; Wink et al., 2005; Vasconcellos et al., 2008).

Embora muitos considerem os térmitas como pragas agrícolas, existem espécies de térmitas, como as do gênero *Cornitermes* (cupim de montículo), que não estão associadas a indícios de degradação de pastagens, local onde ocorrem em alta densidade (Lima et al., 2011). Espécies desse gênero, segundo Forti e Andrade (1995) são abundantes onde o pastejo é mais intenso. No entanto nem todos autores concordam com essa hipótese. Em um levantamento em áreas de pastagem realizado por Lima (2012), com objetivo de conhecer as espécies dos ninhos e relacionar estas com as áreas degradadas, serapilheira, textura e fertilidade do solo, o autor verificou que a presença de ninhos não foi indicador de degradação química e biológica das pastagens. Em adição, a maior quantidade de ninhos não foi relacionada com parâmetros de degradação, e sim a fatores climáticos e ecológicos.

A distribuição dos ninhos pode estar relacionada com a competição intraespecífica (Cunha, 2006), ou também com a distância do voo e as condições climáticas do momento da revoada, as quais vão influenciar no local em que o casal de reprodutores irá se instalar para formar uma nova colônia. As revoadas são sazonais e acontecem geralmente em condições de temperatura e umidade relativa do ar elevadas. De acordo com Valério (1996), a revoada de térmitas de montículos ocorre nos primeiros meses de época chuvosa, logo após fortes chuvas. A formação de pastagem facilita a proliferação de ninhos, devido à homogeneidade do ambiente e ausência de competidores (Cunha e Morais, 2010).

Fernandes, P. M.; Czepak, C.; Veloso, V.R.S. (1998) consideraram o *status* dos térmitas como praga estética, enquanto outros autores constataram que a presença dos termiteiros, bem como a sua altura, não causa efeito negativo na área útil de pastagem para o gado (Cunha, 2011; Cunha e Morais 2010; Ackreman et al., 2007; Czepak, C.; Araújo, E. G.; Fernandes, P. M., 2003). A área ocupada pelos ninhos fica em torno de 0,4 a 1% da área das pastagens, não prejudicando a área útil, além de estarem distribuídos de forma aleatória (Lima, 2012; Holt e Coventry, 1982; Valério, 1995; 2006). Outros estudos relatam que a eliminação do cupim-de-montículo não modificou a qualidade das pastagens, não alterou a produção de matéria seca e a cobertura vegetal (Lima, 2012; Fernandes, P. M.; Czepak, C.; Veloso, V.R.S., 1998; Cosenza e Carvalho, 1974). No entanto, ainda há estudos que levantam questões contrárias à manutenção dos ninhos nas áreas em virtude de eles serem possíveis abrigos para animais peçonhentos, reduzirem a área útil de pastagem e dificultarem o manejo do solo com o uso de maquinários, o que poderia depreciar as propriedades rurais.

Os térmitas são essenciais para o equilíbrio do ecossistema, pois os ninhos epígeos e suas galerias, quando ativos, servem de abrigo para várias outras espécies e, quando abandonados, passam a ser habitados por inquilinos (outras colônias ou invertebrados) por anos ou até séculos (Traoré et al., 2008, 2015; Rückamp et al., 2012; Oliveira et al., 2014; Erens et al., 2015). Segundo Redford (1984), se retirados os ninhos, várias espécies de formigas, aranhas e outros organismos podem entrar em extinção. Este autor verificou em um estudo com a espécie *Cornitermes cumulans* que este se tratava de uma espécie chave em seu habitat natural, pois são muitos animais de mesofauna e macrofauna associados aos seus ninhos, além dos que utilizam os termiteiros abandonados como nova moradia (Constantino, 1999; Valério, 2006). Para Constantino (2005), os ninhos antigos e abandonados servem também como substrato para o desenvolvimento da vegetação local. Embora pareçam apenas ilhas de acúmulo de argila que reduzem áreas de pastejo, os ninhos epígeos são estruturas que concentram material orgânico e nutrientes essenciais. A influência dos térmitas sobre a produtividade de todo um bioma pode ser constatada pela regeneração de árvores em savanas que tiveram os montículos de térmitas como pontos

focais de regeneração (Traoré et al., 2008, 2015; Moe, S. R.; Mobæk, R.; Narmo, A. K., 2009; Jouquet et al., 2016).

No trabalho de Evans (2011), foi constatado que formigas e térmitas podem ser responsáveis por um incremento de até 36% no rendimento de trigo no oeste da Austrália. O autor sugere que esse aumento na produtividade se deve à construção de canais e galerias que facilitam a infiltração de água e a dinâmica do nitrogênio no solo. O local do experimento expressa condições que simulam a falta de água prevista para o futuro, com uma precipitação média anual de 284 mm e um solo arenoso pobre em nutrientes. Deste modo é reforçada a ideia de que térmitas podem influenciar de forma positiva no manejo de áreas agrícolas com vistas às futuras possíveis mudanças climáticas.

Os efeitos da bioturbação causada pelos térmitas, os quais movimentam partículas vertical e horizontalmente é reconhecido, contudo há discordâncias se estas partículas são selecionadas para construção dos ninhos ou não. Jouquet, P.; Lepage, M.; Velde, B. (2002) relatam incrementos de argila nos ninhos em torno de 20% em relação ao solo adjacente. Entretanto, não há consenso quanto a causa desse aumento, o qual pode ser devido a seleção de minerais pelos térmitas (Donovan et al., 2001b) ou resultado de transformações mineralógicas no trato digestivo dos térmitas (Kaschuk et al., 2006). Adicionalmente, em algumas situações não se verificam diferenças texturais entre os materiais de termiteiros e os materiais dos solos adjacentes (Almeida, 2006; Kaschuk et al., 2006).

Investigando em laboratório uma colônia de térmitas africanas, Jouquet et al. (2007), observou uma preferência dos mesmos por partículas de tamanho argila, as quais sofreram alterações durante o processo de construção dos ninhos. O mineral illita presente no solo foi transformado à esmectita nos termiteiros devido a ação da saliva dos térmitas na passagem do trato digestivo. A possível alteração mineralógica pelos térmitas pode ser explicada pela liberação de potássio para a solução externa (Meunier e Velde, 2004). Isso pode ser devido ao efeito direto da saliva de térmitas, ou uma estimulação indireta da microflora com saliva ou material orgânico, ou por uma combinação destes (Jouquet et al. 2007). Já para Kaschuk (2006), os térmitas não causaram modificações mineralógicas nos solos do sul do Brasil, possivelmente devido a

alta estabilidade dos minerais presentes no solo (caulinita e vermiculita com hidróxi-Al). Por outro lado, foram importantes na mudança de propriedades químicas e físicas do solo, apresentando maiores teores de P, K, Ca e Mg, além de incrementos de C orgânico nos ninhos em relação ao solo adjacente.

Usando experimentos de laboratório, Jouquet et al. (2002) encontraram uma modificação das propriedades da argila por ação de térmitas em argilominerais 2:1 com criação de camadas de esmectita com pequenas cargas. No estudo de Jouquet et al. (2007), os térmitas aumentaram o conteúdo de ilita pouco cristalizada (PCI) em detrimento de ilita bem cristalizada (WCI) na construção do ninho. Segundo Lanson (1998), PCI pode ser considerado como uma fase grande de ilita com algumas camadas de esmectita, enquanto a WCI é uma ilita pura. Portanto, os resultados enfatizaram um intemperismo leve, mas significativo destes organismos na mineralogia de argilas de silicato através do aumento da proporção de camadas de esmectita e / ou diminuição do número de camadas nos cristalitos.

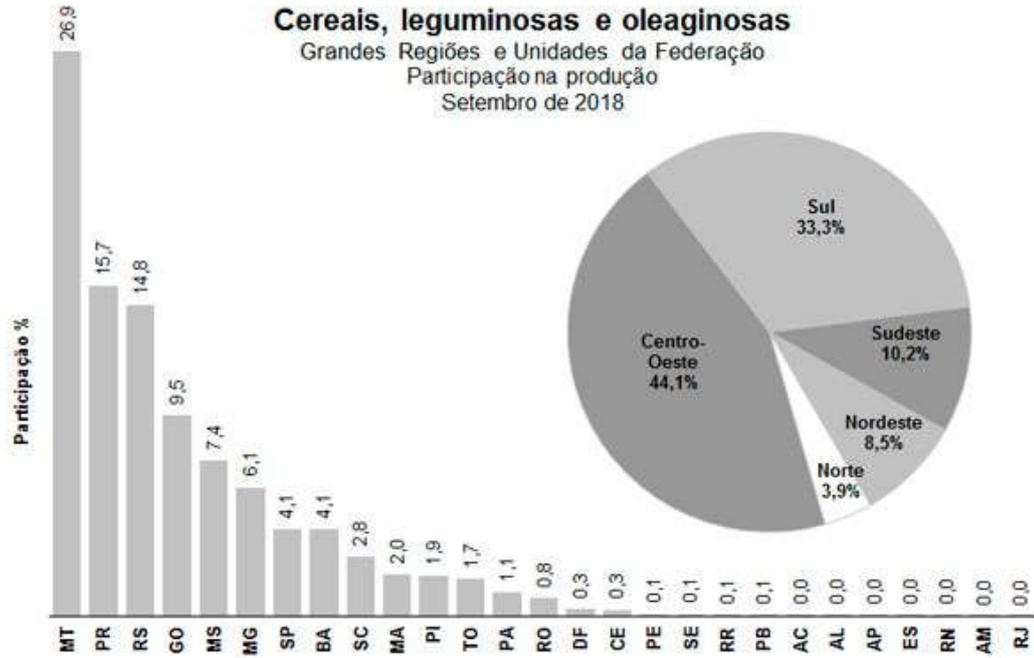
A transformação da ilita em outros minerais contendo menos potássio é observado em vários tipos de solos (Meunier & Velde, 2004). A Ilita ocorrendo em solos é frequentemente considerada instável em estudos de gênese do solo, sendo transformada em vermiculita (Wilke et al., 1984; Koch et al., 1992) ou interestratificado ilita-esmectita (Hughes, R. E.; Moore, D. M.; Glass, H., 1994). No entanto, a reação observada por Jouquet et al. (2007) tem lugar em escala de tempo mais rápida do que normalmente está associada a processos. Os térmitas podem, assim, ser consideradas como agentes aceleradores de alteração de argila em ecossistemas tropicais. Portanto, o modelo que considerar a dinâmica da transformação de ilita em esmectita deve levar em conta a atividade de térmitas e outros engenheiros do solo (Jones, C. G.; Lawton, J. H.; Shachak, M., 1994; Jouquet et al., 2006).

Considerando as extensas áreas com ocorrência de térmitas no Brasil e o pouco conhecimento a respeito dos mecanismos e processos geradores das diferenças e/ou similaridades entre os materiais minerais que compõem os termiteiros e os solos adjacentes, o presente estudo busca elucidar a ação dos térmitas na transformação da mineralogia do solo, já que muitas questões nesta linha ainda podem ser melhor compreendidas.

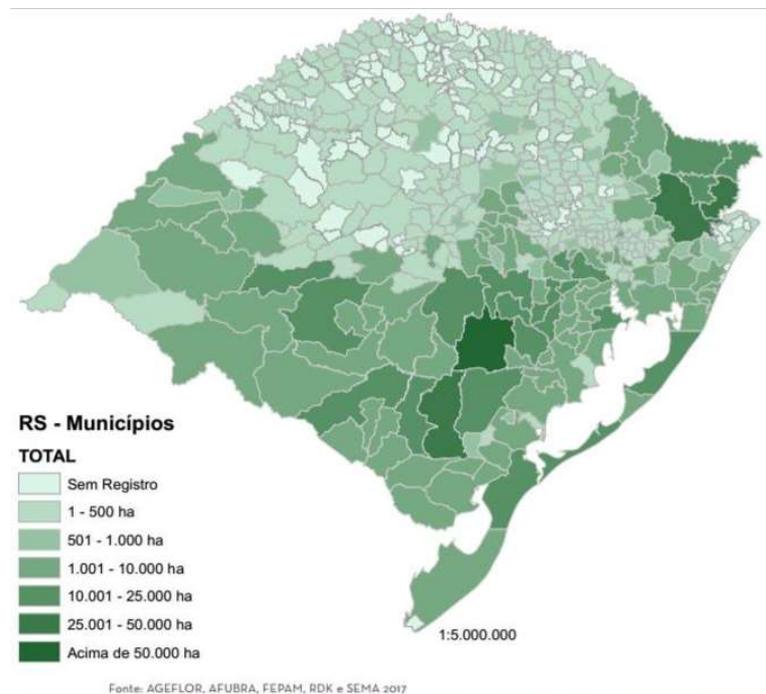
## **Ações antrópicas em solos subtropicais**

O homem é considerado um agente de mudanças dos recursos naturais em busca de desenvolvimento, principalmente econômico e social. No tocante a agricultura, houve e continua havendo no Brasil uma expansão de áreas de cultivo agrícola, utilizando inicialmente um preparo de solo com intensa mobilização, que tem sido substituído pelo plantio direto, com manutenção da palhada sobre a superfície do solo. Esse avanço das fronteiras agrícolas sobre áreas de campos e florestas nativas determina mudanças das condições pedoambientais, expressas por variáveis como temperatura, umidade, teor de matéria orgânica e atividade dos organismos edáficos (Silva Neto et al., 2008). Essas mudanças afetam o comportamento físico, químico e biológico dos solos e, conseqüentemente, a qualidade dos mesmos.

Segundo a Embrapa Territorial, o Brasil utiliza cerca de 65 milhões de hectares ou 7,8% de seu território com lavouras, onde se destaca a produção de grãos. Além disso, possui uma área de aproximadamente 10 milhões de hectares com florestas plantadas, sendo 75% de eucalipto (IBGE, 2018). O Rio Grande do Sul (RS) é o estado mais meridional do Brasil e se caracteriza por sua importante diversidade agropecuária, particularmente pela histórica produção de grãos e carne (Figura 5), e mais recentemente pela expansão das áreas de florestas plantadas (Figura 6). Conforme já mencionado, mudanças no uso da terra alteram o comportamento do solo, porém, a dimensão desses impactos na química, física e mineralogia dos solos necessita ser melhor compreendida.



**Figura 5.** Rio Grande do Sul é o terceiro maior produtor nacional de grãos com 14,8% da produção total. Fonte: IBGE (2018).



**Figura 6.** Distribuição de floresta plantada por município no RS (2017). Fonte: AGEFLOR

Na região sul do Brasil predominam solos em avançados estágios de intemperização, como Latossolos e Argissolos, os quais são utilizados na agricultura e silvicultura da região. A composição mineralógica destes solos é formada predominantemente por diferentes proporções de argilominerais 1:1 (caulinita), óxidos de silício (quartzo), óxidos e hidróxidos de ferro (hematita, goethita, magnetita) óxidos de alumínio (gibbsita) e argilominerais 2:1 com hidróxi-Al entrecamadas (2:1 HE) (Kämpf e Curi, 2003; Nitzsche et al., 2008; Schaefer et al., 2008).

Os óxidos de ferro são vistos como indicadores pedoambientais em solos tropicais e subtropicais (Kämpf & Curi, 2000; Bigam et al., 2002). Em ambientes aeróbios os tipos minerais desse grupo possuem alta estabilidade, mas mudanças nas condições de umidade, no tempo de residência da água no solo que promovam a anaerobiose total ou parcial, nos teores de matéria orgânica e na atividade microbiológica podem determinar processos de dissolução/neoformação e uma remobilização desses minerais, via reações redutivas, complexativas e/ou protônicas (Schwertmann, 1991).

Os argilominerais do tipo 2:1 também são suscetíveis a alterações quando ocorrem mudanças no pedoambiente (Bertolazzi et al., 2017; Fink et al., 2014; Inda et al., 2010; et al., 2006). Sob condições ácidas os argilominerais 2:1 expansivos (vermiculitas e esmectitas) podem intercalar polímeros de hidróxi- $\text{Al}^{3+}$  nas entrecamadas. Essa transformação no estado sólido forma argilominerais 2:1 HE (VHE ou EHE) (Barnhisel e Bertsch, 1989; Meunier, 2007) e reduz a expansividade e a capacidade de troca catiônica (CTC), ao mesmo tempo que aumenta a estabilidade desses argilominerais. Esse processo é favorecido em pedoambientes moderadamente ácidos a ácidos, com baixos conteúdos de matéria orgânica e frequentes ciclos de umedecimento e secagem (Barnhisel e Bertsch, 1989; Meunier, 2007; Sparks, 1987; Rich, 1968).

Segundo Kämpf, N.; Curi, N.; Marques, J. J. (2009), as alterações mineralógicas no solo (dissoluções/neoformações e transformações no estado sólido) variam conforme as condições pedoambientais, com destaque para o pH da solução, a concentração de elementos em solução, a concentração de ligantes orgânicos, a atividade dos organismos do solo e a quantidade de água disponível para a lixiviação; e conforme a estabilidade dos minerais, determinada

pelo arranjo estrutural, cristalinidade, composição química, solubilidade dos elementos e área superficial específica.

Assim como foi abordado na parte inicial desta revisão bibliográfica, a atividade biológica é complexa e depende dos organismos presentes, os quais tem ações na formação do solo. Contudo, o fator biológico também é representado pelas plantas, que exercem importante influência durante a pedogênese e durante os processos atuais de desenvolvimento do solo.

As áreas que possuem floresta plantada e cultivos anuais transformam as características originais do solo alterando sua química e física devido a ação antrópica recente. Com a aplicação de fertilizantes, corretivos de pH, revolvimento do solo e manejos de colheita surgem novas condições de umidade do solo, teor de matéria orgânica, nutrientes na solução do solo e pH, o que gera alterações nas características da matriz e rizosfera deste solo.

Os resultados de Chaer e Tótola (2007), que avaliaram indicadores químicos, físicos e microbiológicos do solo em plantios de eucalipto após terem sido submetidos a diferentes métodos de manejo, o que mais se aproximou da área de vegetação natural, usada como referência foi onde não se efetuou o corte das árvores no primeiro ciclo (povoamento com 11 anos de idade). Mesmo assim não superou a melhor qualidade da vegetação nativa.

Ao considerar a qualidade do solo, o eucalipto apresenta grande capacidade de conservação de nutrientes imobilizados na sua biomassa e uma eficiente ciclagem, que resulta em maior produtividade com menores requerimentos nutricionais (Gama Rodrigues e Barros, 2002; Fernandes et al. 2013). Outros trabalhos indicam que em termos de cultivo de espécies florestais foi observado melhorias da estrutura e fertilidade do solo, principalmente da camada superficial, como consequência do maior acúmulo de matéria orgânica em relação a culturas agrícolas, devido aos ciclos serem maiores (Montagnini e Sancho, 1994; Fernandes et al., 2013). Mesmo assim o eucalipto é conhecido por extrair grandes quantidades de nutrientes e água do solo, além de causar acidificação, que pode gerar dissolução de alguns minerais do solo (Korchagin et al., 2019).

Para Miklós (2012), as plantas por meio de suas raízes alteram os minerais do solo e também os minerais primários das rochas. O ambiente rizosférico é complexo, devido o aporte de células, mucilagens, exsudados, os quais contêm aminoácidos, enzimas, proteínas, açúcares, carboidratos complexos, álcoois, vitaminas e hormônios (Kluepfel, 1993).

O efeito rizosférico não é causado somente pela ação dos exsudatos radiculares, mas também devido aos efeitos físicos das raízes na porosidade e aeração do solo (Susarla, S.; Medina, V. F.; Mccutcheon, S. C., 2002). Além disso, a produção de mucilagens na rizosfera favorece a agregação e a estabilidade dos agregados (Moreira e Siqueira, 2006).

Estudos do solo rizosférico de eucalipto mostram as alterações importantes no que diz respeito às suas propriedades químicas, devido principalmente à reação de acidificação, causado pelo elevado teor de  $H^+$ Al (Bortoluzzi et al., 2015). Mudanças no pH do solo são capazes de provocar reações modificando o comportamento eletroquímico dos colóides, a atividade microbiana, o crescimento vegetal, os quais podem promover um novo ciclo de transformações.

O pH na rizosfera também é modificado pela excreção de ácidos orgânicos derivados da atividade da raiz e de microorganismos. Estes ácidos orgânicos ocorrem naturalmente na rizosfera e na ação de microorganismos do solo, porém a capacidade de sua exsudação pode variar de acordo com a espécie. Segundo Guppy et al. (2005), alguns resultados têm mostrado que a concentração de ácidos orgânicos é dois terços menor em áreas cultivadas quando comparadas a áreas de florestas.

O ácido cítrico e o oxálico tem sido utilizados em estudos de cinética de liberação de K em solos. Esses ácidos orgânicos podem facilitar a intemperização dos minerais com a formação de complexos organo-metálicos (Castilhos e Meurer, 2001). Yong-Guan e Jia-Xian (1993) comparando-se os dois ácidos, verificaram que o ácido oxálico extraiu maior quantidade de K do solo do que o ácido cítrico. Resultados semelhantes foram observados em um trabalho de Mehta, B. K.; Shiozawa, S.; Nakano, M., (1995) em quatro solos da Índia onde o ácido oxálico também extraiu maior quantidade de K do que o ácido cítrico e, até mesmo que o ácido nítrico. Essa diferença foi atribuída as diferentes

quantidades de íons  $H^+$  e a diferença na capacidade de complexação dos ligantes. Os íons  $H^+$  podem deslocar os íons  $K^+$  e desestabilizar a estrutura dos minerais quando oxigênios apicais são incorporados na lâmina tetraedral, reduzindo assim a carga da camada (Castilhos e Meurer, 2001).

Segundo Castilhos e Meurer (2001), a quantidade de K não trocável extraído pelo ácido oxálico na fração silte e na areia foram maiores do que a quantidade extraída pelo ácido nítrico, demonstrando que, possivelmente, há liberação de K estrutural que pode significar alterações na mineralogia dessas frações.

Nesse contexto, o papel do fator biológico é fundamental para a formação e alteração do solo, inclusive na sua mineralogia, os quais são analisadas neste estudo.

### **Metodologias utilizadas na avaliação de alterações químicas (composição elementar), físicas (cor), mineralógicas e micromorfológicas**

Cada vez mais se utilizam técnicas não destrutivas, que evitam o desperdício de amostras, de reagentes e que diminuem os danos ao ambiente por meio de resíduos químicos de laboratório. Deste modo a adoção de técnicas espectrais têm sido uma boa escolha para estas análises, as quais normalmente se realizam também com maior rapidez e com utilização de aparelhos que necessitam de pouca manutenção. A micromorfologia é uma técnica que nos auxilia na descrição e ajuda a compreender melhor a gênese e características físicas dos solos. Estas técnicas são expostas a seguir.

#### **Difratometria de raios x (DRX)**

A difratometria de raios x (DRX) é uma técnica muito usada para estudo de minerais do solo, principalmente para a fração argila. O descobridor dos raios x foi o alemão Wilhelm Conrad Roentgen em 1845, no entanto a aplicação na identificação e caracterização de cristais só deixou de ser mera

hipótese em 1912 com as ideias de Max Von Laue, a partir de seus experimentos que as radiações do tipo raios x foi empregado na cristalografia (Resende et al., 2005). A DRX se baseia na lei de Bragg que consiste em os raios x serem difratados de maneira construtiva pela estrutura cristalina da amostra, de modo que quando ocorrem difração construtiva, registra-se um pico correspondente a uma dimensão específica do retículo cristalino de determinado mineral.

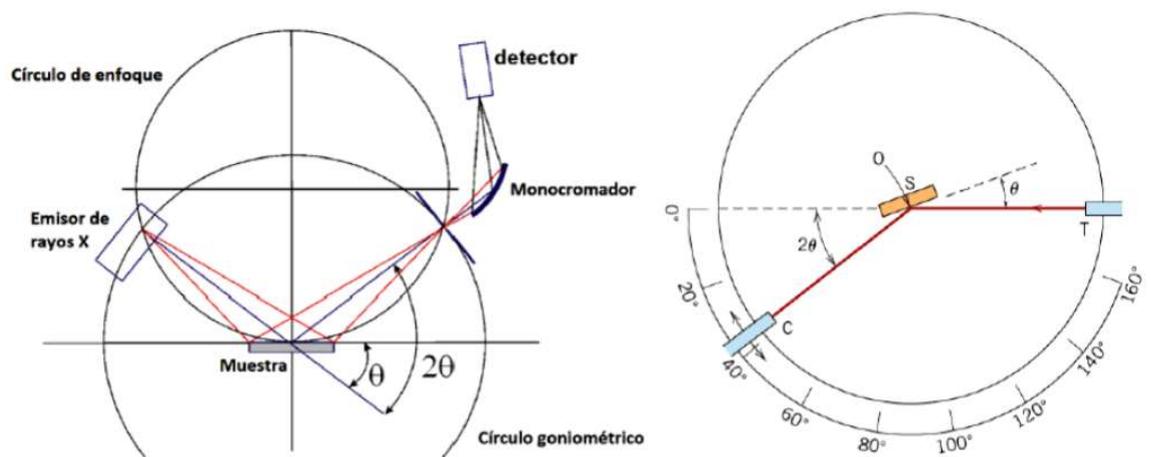
$$n \cdot \lambda = 2 \cdot d \cdot \text{sen}(\theta)$$

$n$  = número inteiro referente à ordem de difração.

$\lambda$  = comprimento de onda dos raios x incidentes.

$d$  = distância entre planos atômicos.

$\theta$  = ângulo de Bragg.



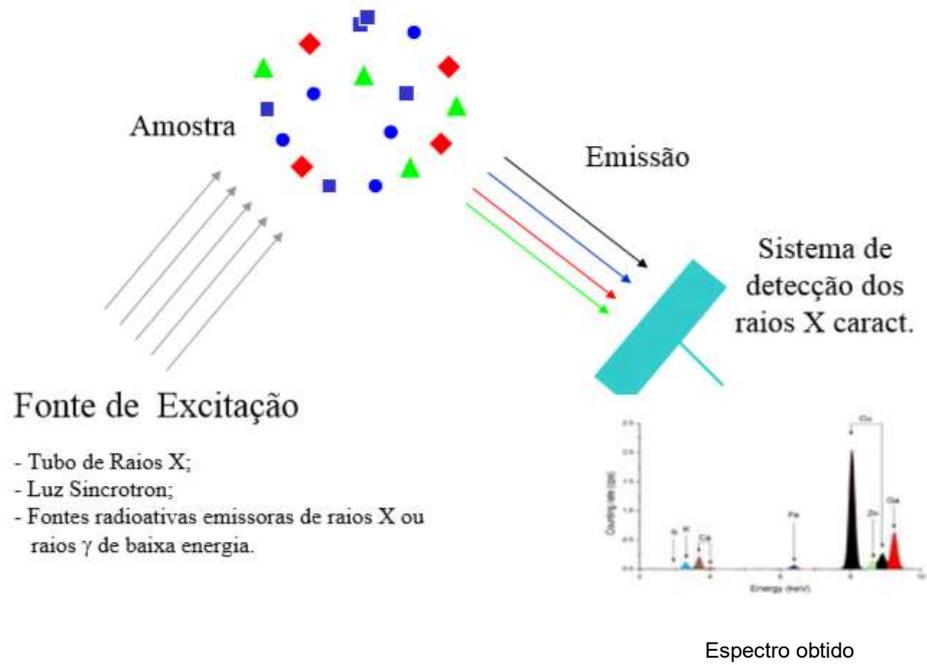
**Figura 7.** Esquerda: Geometria de Bragg para leitura de DRXs. Direita: Esquema do difratômetro: T= fonte de raios X, S= amostra, C= Detector e O= eixo por onde giram a amostra e detector. Fonte: Adaptado Colonia Surichaqui, R. C. (2013).



**Figura 8.** Difratorômetro de raios x da Universidad de Córdoba (UCO).

### **Fluorescência de raios x**

Esta técnica é empregada em vários setores como: caracterização de materiais históricos, industriais, questões ligadas a saúde humana e animal, também utilizada para identificação da composição dos solos em seus diversos usos. A técnica consiste em identificar elementos químicos presentes em uma amostra e sua concentração. Durante a análise ocorre a detecção da radiação de raios x emitida pelos elementos químicos da amostra, após a excitação realizada por uma fonte de energia controlada (Figura 9). Cada elemento tem uma característica específica de absorção da energia, o que permite sua identificação e quantificação (Beckhoff, 2006).



**Figura 9.** Esquema excitação, amostra e detecção – Fluorescência de raios x. Fonte: Parreira, (2006).

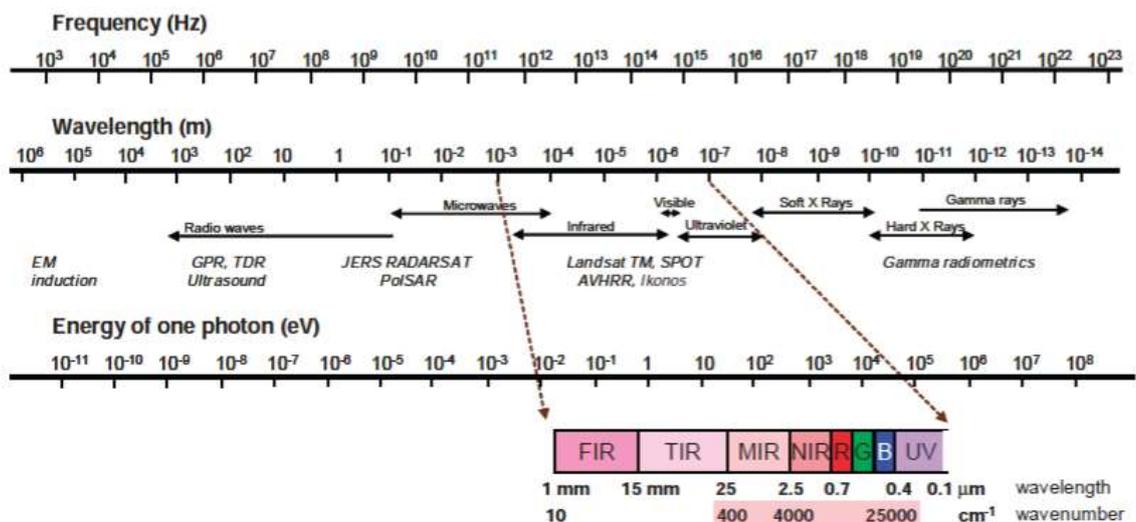


**Figura 10.** Equipamento de análise de Fluorescência de raios X da Universidad de Córdoba (UCO).

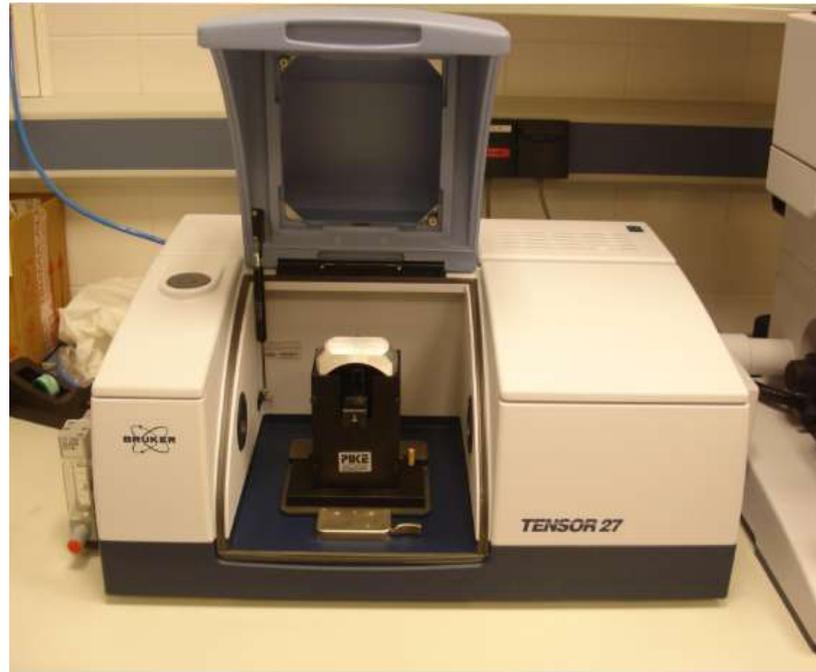
## Espectroscopia de refletância difusa (ERD)

A ERD é uma técnica que permite que com um único espectro sejam caracterizadas várias propriedades do solo. A ERD possui vantagens sobre algumas técnicas convencionais de análise do solo, pois as análises são rápidas, baratas e não destrutivas. Além disso, essa técnica não requer o pré-processamento da amostra ou a utilização de reagentes químicos (Viscarra Rossel et al., 2006).

A faixa eletromagnética referente aos comprimentos de ondas dos espectros do Visível (VIS), Infravermelho próximo (NIR) e infravermelho médio (MIR) podem ser observadas na figura 11 a seguir. A região que compreende o VIS é importante para identificar parâmetros de cor do solo, bem como classificar a proporção entre minerais óxidos de ferro, como a hematita e a goethita, responsáveis pela pigmentação dos solos (Ramos, 2019). Já as regiões do NIR e MIR são utilizadas na caracterização da composição mineralógica, da distribuição granulométrica, e de propriedades químicas do solo, conforme constatado em estudos de Viscarra Rossel et al. (2001), Janik, L. J.; Merry, R. H.; Skjemstad, O. (1998), Viscarra Rossel et al. (2006) e Torrent e Barrón (2008).



**Figura 11.** Espectro eletromagnético destacando a faixa do visível e infravermelhos. Fonte: Viscarra Rossel et al. (2006) adaptado de Mcbratney, A. B.; Santos, M. L. M.; Minasny, B. 2003.



**Figura 12.** Espectrômetro de infravermelho (MIR) da Universidad de Córdoba (UCO)

Sendo o solo uma mistura de partículas, nem completamente transparentes e nem opacas, a interação dessa com a luz incidente faz com que parte dessa luz seja absorvida e parte dispersa (Barrón e Torrent, 1986).

A cor do solo é uma característica morfológica de expressiva importância na Ciência do Solo, sendo indicadora de processos pedogenéticos e reconhecida em sistemas de classificação de solos. Mudanças nas condições pedoambientais recentes ou pretéritas podem alterar a cor do solo, sejam elas por alterações climáticas, de manejo do solo ou mesmo pela ação de organismos. Parâmetros da cor de solos podem ser obtidos através de suas assinaturas espectrais, obtidas por análises de espectroscopia de refletância difusa (ERD).

Para obter parâmetros de cor utiliza-se a faixa do espectro referente ao visível (VIS). Após análise dos espectros das bandas referentes a hematita e goethita aplica-se a fórmula  $Hm/(Hm+Gt)$  para a proporção destes minerais e assim classificar em: goethítico  $[0,00 < Hm/(Hm + Gt) \leq 0,75]$ , goethítico-hematítico  $[0,25 < Hm/(Hm+Gt) \leq 0,50]$ , hematítico-goethítico  $[0,5 < Hm/(Hm + Gt) \leq 0,75]$  ou hematítico  $[0,75 < Hm/(Hm + Gt) \leq 1,00]$ .

## **Micromorfologia de solos**

As alterações mineralógicas ocorrentes durante o processo de intemperismo, associadas a processos de pedoturbação, formam uma massa de material fino, anteriormente chamada de plasma, constituída principalmente por argilominerais (filossilicatos) e óxidos (Fe, Al, Mn e Ti) (Nahon, 1991; Kämpf et al., 2009) e que pode ser observada microscopicamente. Ao analisar o solo em escalas micrométrica podem ser definidas diferenças que a classificação morfológica de campo não nos permite observar. Assim, a micromorfologia de solo é uma ferramenta útil para estudar as organizações microestruturais dos constituintes do solo, que pode desvendar diferenças em níveis relevantes.

Segundo Stoops et al. (2010), o objetivo da micromorfologia ou também chamada micropedologia, é contribuir para resolver problemas relacionados à gênese, classificação e manejo de solos. A interpretação das observações nas seções finas é a mais importante parte desse tipo de estudo, utilizando uma descrição por meio de uma análise objetiva e detalhada. Estes estudos tiveram início no século XX por Delage e Lagatu (1904) e Agafonoff (1929, 1935/1936), mas foi somente após a publicação do livro *Micropedology* (Kubiena, 1938) que um verdadeiro começo foi realizado com as tentativas de entender a gênese do solo pelo estudo das seções delgadas.

Nas seções delgadas é possível identificar características derivadas da pedoturbação (bioturbação e hidroturbação), a qual promove a redistribuição e acumulação dos minerais, utilizando os fluxos de percolação quando ocorrem processos de expansão e contração dos ciclos de umedecimento e secagem do solo. Assim, a matriz do solo é formada pelos minerais primários e secundários unidos em agregados estruturais (peds), os quais interagem com as soluções que transitam por meio dos poros, dando sequência aos processos de intemperismo (Kämpf et al., 2009).



**Figura 13.** Análise micromorfológica utilizando microscópio ótico. (Fonte: <<http://laboratoriobagolini.it/ricerca/laboratory-activities/ongoing-activities/study-of-the-thin-sections?lang=en>>)

Diante do exposto, a seguir são apresentados os três estudos referentes ao tema da influência dos térmitas nas propriedades do solo e o efeito da ação antrópica sobre Latossolo Vermelho no sul do Brasil.

### **3. CAPÍTULO III: SELETIVIDADE DE CONSTITUINTES DO SOLO POR ORGANISMOS TÉRMITAS NA CONSTRUÇÃO DOS NINHOS**

#### **3.1. Introdução**

O homem é considerado um agente de mudanças dos recursos naturais em busca de desenvolvimento, principalmente econômico e social. Também os insetos predominantes em ambientes tropicais e subtropicais podem causar alterações ao meio ambiente, em especial ao solo. Miklós (2012) destaca as minhocas, térmitas, formigas e raízes de plantas, como os principais fatores bióticos que mais impactam o solo devido à grandeza de suas populações, biomassas e ações transformadoras do ambiente.

Há muitas pesquisas sobre a ação das formigas e, principalmente, sobre minhocas como transformadores das características do solo (Jouquet et al., 2016; Steffen et al., 2013; Miklós, 2012; Wink et al., 2005). No entanto, quanto a atuação dos térmitas, também chamados de cupins, há questões discordantes quanto a ação dos mesmos na formação do solo. Os térmitas são mais adaptados a pedoambientes secos e com temperaturas elevadas, onde podem substituir a função que as minhocas desempenham (Evans et al., 2011; Jouquet et al., 2016).

Térmitas são representantes da macrofauna do solo, ou seja, pertencem a um grupo de invertebrados que possuem dentre outras características o tamanho de mais de 2 mm de diâmetro corporal. Tanto os térmitas quanto as minhocas e diplópodes têm a habilidade de cavar tuneis e criar estruturas que facilitam sua locomoção e sobrevivência no solo, além de gerar depósitos de coprólitos e fezes resultantes da atividade alimentar. Com essa ação, que interfere na estrutura do solo, eles são vistos como “engenheiros do ecossistema” (Stork e Eggleton, 1992; Correia, 2002).

Os térmitas promovem a bioturbação do solo, a qual inclui a abertura de poros que serão caminho para os fluxos de água e gases, auxiliando deste modo a aeração e a infiltração de água no solo. Além disso, os térmitas participam da agregação do solo, afetando a proporção entre microporos e macroporos do solo (Correia, 2002). Conforme Miklós (2012), estes organismos participam da bioturbação do solo, trazendo para a superfície partículas de argila acumuladas em profundidade pelo processo pedogenético de translocação de argila (lessivagem). Os térmitas têm relevância na degradação da matéria orgânica, na incorporação e ciclagem de carbono no solo, na dinâmica do CO<sub>2</sub> e no aquecimento global; bem como na morfologia do solo, devido a movimentação de materiais no solo (Holt e Lepage, 2000; Jouquet et al., 2011; Miklós, 2012; Bottinelli et al., 2015; Jouquet et al., 2016).

Em muitas situações, os térmitas são vistos como pragas, no entanto seus benefícios ao ambiente são evidentes. Estima-se que apenas 10% desses organismos podem causar dano econômico (Rosenberg, D. M.; Danks, H. V.; Lehmkuhl, D. M., 1986; Lima e Costa, 2007; Melo e Silva, 2008). Pesquisas indicam que os térmitas consumidores de húmus têm suas populações reduzidas com o aumento de níveis de perturbação antrópica, enquanto as populações dos consumidores de madeira apresentam relação positiva com a perturbação (Eggleton et al., 1996, 2002; Thomanzini e Thomanzini, 2002; Wink et al., 2005; Vasconcellos et al., 2008).

Questões contrárias à manutenção dos ninhos nas áreas são levantadas em virtude de serem possíveis abrigos para animais peçonhentos, reduzirem a área útil de pastagem e dificultarem o manejo do solo com o uso de maquinários, o que poderia depreciar as propriedades rurais. No entanto, alguns

levantamentos mostram que a área ocupada pelos termiteiros é próxima a 1% da área útil total, evidenciando que os térmitas e sobretudo seus ninhos não trazem malefícios e sim benefícios para o solo habitado (Holt e Coventry, 1982; Valério, 1995; 2006).

Embora pareçam apenas estruturas que reduzem áreas de pastejo, os ninhos epígeos concentram material orgânico e nutrientes essenciais. A influência dos térmitas sobre a produtividade de todo um bioma pode ser constatada pela regeneração de árvores em savanas que tiveram os termiteiros como pontos focais de regeneração (Traoré et al., 2008, 2015; Moe, S. R.; Mobæk, R.; Narmo, A. K., 2009; Jouquet et al., 2016). Formigas e térmitas foram responsáveis por um incremento de até 36% no rendimento de trigo na região oeste da Austrália (Evans, 2011). O autor sugere que esse aumento na produtividade foi devido à construção de canais e galerias que facilitaram a infiltração de água e a dinâmica do nitrogênio no solo. O local do experimento expressou condições que simularam a falta de água prevista para o futuro, com uma precipitação média anual de 284 mm e solo arenoso pobre em nutrientes. Assim é reforçada a ideia de que térmitas podem influenciar de forma positiva no manejo de áreas agrícolas com vistas às futuras possíveis mudanças climáticas.

Os efeitos da bioturbação causada pelos térmitas, os quais movimentam partículas vertical e horizontalmente é reconhecido, contudo há discordâncias se estas partículas são selecionadas para construção dos ninhos ou não. Jouquet, P.; Lepage, M.; Velde, B. (2002) relatam incrementos de argila nos ninhos em torno de 20% em relação ao solo adjacente. Entretanto, não há consenso quanto a causa desse aumento, o qual pode ser devido a seleção de minerais pelos térmitas (Donovan et al., 2001b) ou resultado de transformações mineralógicas no trato digestivo destes organismos (Kaschuk et al., 2006). Adicionalmente, em algumas situações não se verificam diferenças texturais entre os materiais de termiteiros e os materiais dos solos adjacentes (Almeida, 2006; Kaschuk et al., 2006).

Considerando as extensas áreas com ocorrência de térmitas no Brasil e o pouco conhecimento a respeito dos mecanismos e processos geradores das diferenças e/ou similaridades entre os materiais minerais que compõem os termiteiros e os solos adjacentes, o presente estudo busca elucidar a ação dos

térmitas nos processos de seleção de minerais do solo, já que muitas questões nesta linha precisam ser melhor compreendidas.

### **3.2. Hipótese**

Organismos térmitas tem preferências por determinados constituintes do solo, deste modo selecionam materiais para construção de seus ninhos e assim mudam as características físicas, químicas e mineralógicas em relação ao solo adjacente.

### **3.3. Objetivos**

**Geral:** Relacionar os materiais utilizados por térmitas na construção de termiteiros com os materiais dos solos adjacentes aos mesmos, quanto a composição, características e concentração de minerais, bem como relacionar as propriedades químicas e físicas de ambos os materiais.

**Específicos:** (i) caracterizar a composição mineralógica dos materiais utilizados nos termiteiros e do solo adjacente aos mesmos; (ii) caracterizar as propriedades físicas distribuição granulométrica, área superficial específica e susceptibilidade magnética em ambos os materiais (termiteiros e solos); e (iii) definir as variáveis espectrais em ambos os materiais (termiteiros e solos).

### **3.4. Metodologia**

#### **3.4.1. Seleção dos solos e preparo de amostras**

As amostras de solos foram coletadas em condição de vegetação natural nas camadas de 0-0,20 e 0,20-0,40 m de profundidade, em área próxima do termiteiro sem ação visível dos térmitas. Nos termiteiros, as amostras foram coletadas nas posições de meio e topo (parte externa), onde também foram coletados espécimes de térmitas para posterior identificação e classificação das espécies. As amostras foram secas ao ar, destorroadas e passadas em peneiras com malha de 2 mm para obtenção da fração terra fina seca ao ar (TFSA). Os

locais de amostragem foram nos estados do Rio Grande do Sul, Mato Grosso, Pará, Minas Gerais e Piauí (Tabela 1).



**Figura 14.** Termiteiro (A) e amostragem do solo adjacente (B). Foto do local da amostra coletada em Eldorado do Sul – RS.

**Tabela 1.** Identificação e localização geográfica das coletas dos termiteiros e solos adjacentes.

<b>Código da Amostra</b>	<b>Cidade / Estado</b>	<b>Localização Geográfica</b>
RS-JC	Júlio de Castilhos / RS	- 29° 6'1.52" S - 53°37'19.36" W
RS-ES	Eldorado do Sul / RS	- 30° 6'10.84" S - 51°40'33.80" W
MG	Lavras / MG	- 21° 12'18.03" S - 44°59'36.95" W
MT	Canabrava do Norte / MT	- 11° 0'39.66" S - 51°38'7.33" W
PA	Santana do Araguaia / PA	- 9°41'36.52" S - 50°57'31.11" W
PI	Cristino Castro / PI	- 8° 51'13.30" S - 44°17'36.07" W



**Figura 15.** Mapa da distribuição das coletas no Brasil.

As amostras coletadas nos termiteiros e solos adjacentes foram secas ao ar e peneiradas em peneiras de malha de 2 mm para a obtenção da fração terra fina seca ao ar (TFSA).

### 3.4.2. Análise granulométrica

A análise granulométrica foi realizada pelo método da pipeta (Donagema et al., 2011). Foram colocados 50 g de solo em snapcaps de 300 mL e adicionados 25mL de solução de hidróxido de sódio e duas esferas de acrílico. O volume foi completado com água destilada, deixando-se um espaço com ar para agitação. As amostras foram agitadas por 12 horas em agitador mecânico elétrico. O conteúdo foi peneirado em peneira com malha de 0,053 mm e colocado em uma proveta de 1.000 mL. A fração areia foi pesada após secagem em estufa. O conteúdo das provetas foi agitado durante 20 segundos e, após aguardar 60 minutos para sedimentação, foi realizada a coleta da argila e silte com a pipeta em 5 cm na suspensão. Tirada a temperatura inicial calcula-se o

tempo para a segunda coleta só da fração argila, tomando como base a lei de Stokes. Após, foram calculados os teores de argila, areia e silte, sendo este último por diferença.

### 3.4.3. Área superficial específica (ASE)

A área superficial específica (ASE) da fração TFSA foi estimada pelo método da adsorção de água (Quirk, 1955). Amostras com aproximadamente 1,0 g foram colocadas em recipientes pesa filtros de vidro previamente pesados, submetidas a uma atmosfera com UR=0 % por 12 dias em dessecadores contendo pentóxido de fósforo, sendo então novamente pesadas. As amostras foram então submetidas a uma atmosfera com UR=20 % por doze dias em dessecadores contendo uma solução saturada de acetato potássico e novamente pesadas. Considerando que uma molécula de água cobre uma área de 0,108 nm<sup>2</sup>, a ASE foi calculada conforme a seguinte equação:

$$\text{ASE (m}^2 \text{ g}^{-1}\text{)} = (6,02214 \times 10^{23} \text{ moléculas de H}_2\text{O} / 18 \text{ g de H}_2\text{O}) \times (0,108 \times 10^{-18} \text{ m}^2/\text{molécula de H}_2\text{O}) \times (\text{g H}_2\text{O/g de amostra})$$

### 3.4.4. Suscetibilidade magnética

A suscetibilidade magnética ( $\chi$ ) foi medida em 0,47 kHz ( $\chi_{\text{LF}}$ ) e 4,7 kHz ( $\chi_{\text{HF}}$ ) na fração TFSA. Para isso, utilizou-se um magnetômetro Bartington com sensor de frequência dual (Sistema MS2) (Figura 16).



**Figura 16.** Instrumento utilizado para análise de suscetibilidade magnética

### 3.4.5. Carbono orgânico total (COT)

A determinação do carbono orgânico total (COT) do solo foi realizada na TFSA após a moagem das amostras em gral de ágata. Cerca de 1g da amostra foi submetida à combustão seca em analisador de carbono SHIMADZU VCSH.

### 3.4.6. Dissoluções seletivas dos óxidos de ferro

A quantificação dos teores de Fe extraídos seletivamente nos solos foi realizada na fração TFSA. O teor de Fe relativo aos óxidos de ferro pedogênicos (Fed) foi extraído com ditionito-citrato-bicarbonato de sódio a 80° C em duas extrações sucessivas (Mehra e Jackson, 1960). O teor de Fe referente aos óxidos de ferro de baixa cristalinidade (Feo) foi extraído por oxalato de amônio 0,2 mol L<sup>-1</sup> a pH 3, no escuro (Schwertmann, 1964). Na posse destes dados foram calculados a razão Feo/Fed, indicadora do grau de cristalinidade dos óxidos de ferro pedogênicos.

### 3.4.7. Difractometria de raios x (DRX)

A identificação e caracterização dos minerais que constituem na fração TFSA foi realizada por meio de difratometria de raios X em equipamento Bruker-D2-Phaser. A referida fração foi analisada em lâminas confeccionadas com material em pó (sem orientação). Leituras de 2 a 70 graus 2 teta Cu K $\alpha$ .

### 3.4.8. Espectroscopia de refletância difusa

As amostras da fração TFSA moídas foram analisadas em espectrofotômetro de refletância difusa. Os espectros registrados foram gerados em intervalos de 0,5 nm no intervalo de comprimento de onda de 380 a 800 nm em um equipamento UV-Visible CARY 5000 (Figura 17), com uma esfera integradora acoplada de 73 mm de diâmetro. Um máximo de refletância (100 % T) foi obtido com BaSO<sub>4</sub> padrão Merck, e um mínimo de refletância (0 % T) com a colocação de uma tarja preta na entrada do feixe de luz (Barrón, V.; Mello, J.; Torrent, J., 2000). Do espectro foram retirados os valores de X, Y e Z, e aplicou-se estes no programa Munsell Conversion, que disponibiliza os dados de matiz (M), valor (V) e croma(C), RGB, entre outros parâmetros de cor. Para calcular o índice de avermelhamento (*redness rating*) (Torrent & Barrón, 1993) foi usada a fórmula  $RRf(hm)=(10-M)*(C/V)$ .



**Figura 17.** Preparação das amostras e equipamento utilizado na leitura da reflectância difusa.

O espectrofotômetro MIR equipado com um hemisfério de reflexão de Pike EasiDi foi usado para varrer a faixa de onda de  $4000$  a  $600\text{ cm}^{-1}$  ( $2500$  a  $16.666\text{ nm}$ ) a intervalos de  $8$  a  $1,64$  vezes por segundo, Tensor 27 MIR (Bruker Optics). O Brometo de potássio (KBr) foi usado como referência espectral para a faixa MIR.

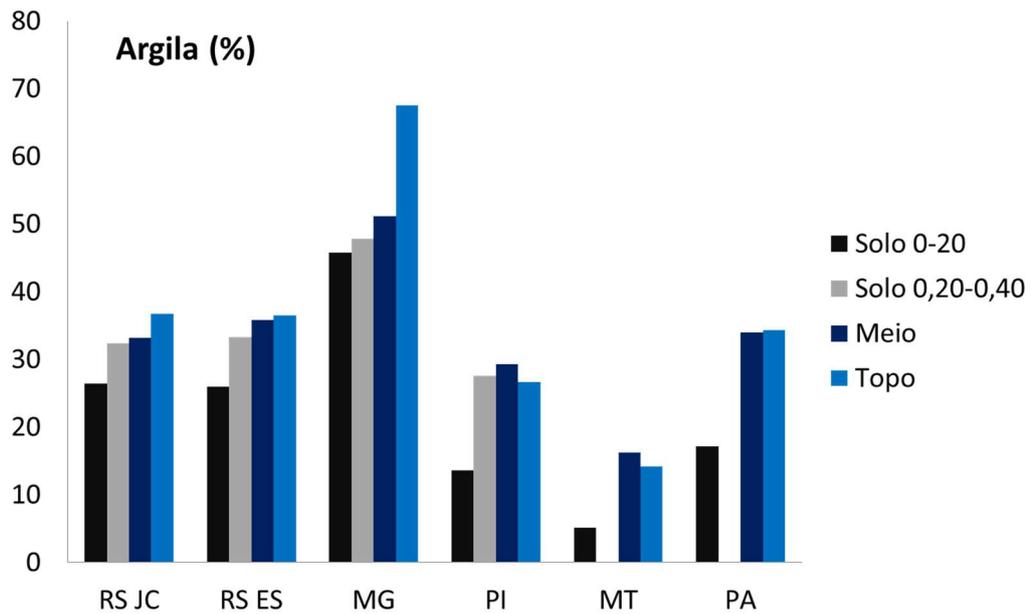
#### **2.4.10. Análise dos dados**

A estatística entre os parâmetros avaliados foi determinada utilizando o programa Past 3, onde foram comparadas médias pelo teste de Tukey ao nível de 5% de significância ( $p < 0,05$ ). Os dados foram comparados entre os termiteiros e solo somente dentro de cada local de coleta. Também foi utilizado o programa R estúdio para análise de PCA. Todos os dados utilizados seguiram o número de amostras coletadas que foi em triplicata.

### **3.5. Resultados e discussão**

#### **3.5.1. Caracterização física e químicas.**

Os teores de argila nos solos variaram entre 5 % (MT – 0-0,20 m) e 46 % (MG – 0,20-0,40 m); e nos termiteiros entre 14 % (MT topo) e 68 % (MG topo) (Tabela 2). Em todos os ambientes os teores de argila foram maiores nos materiais dos termiteiros em comparação ao solo adjacente, principalmente em relação à camada 0-0,20 m dos solos, indicando uma seletividade dos organismos térmitas por partículas dessa fração de tamanho. Os incrementos de argila variaram entre 30% no ambiente RS-JC e 200% no ambiente MT (Figura 18). Em experimento de laboratório, com solos e espécimes de térmitas africanos, Jouquet et al. (2002) também relataram incrementos de argila nos ninhos, os quais variaram em torno de 20% em relação as amostras de solos disponibilizadas aos térmitas para a construção.



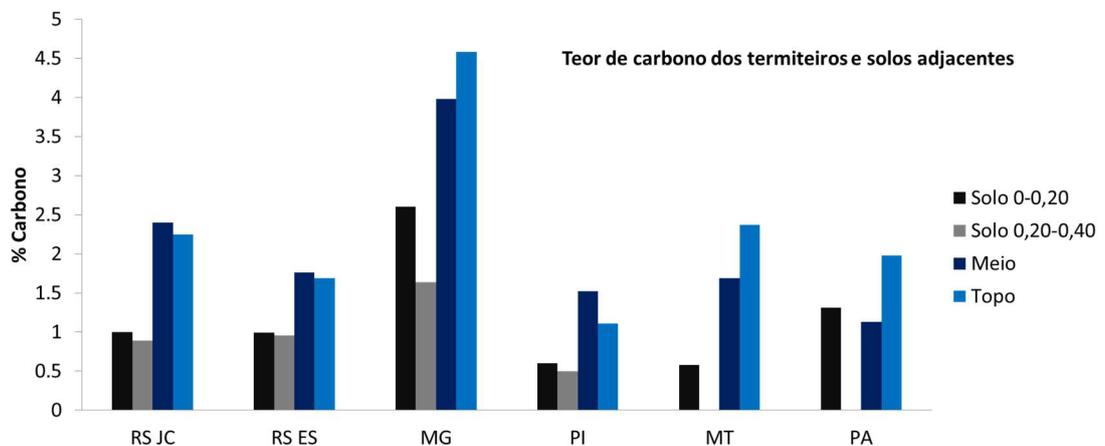
**Figura 18.** Porcentagem de argila dos termiteiros e dos solos adjacentes.

Os teores de carbono orgânico total (COT) nos solos variaram entre 0,50 % (PI – 0,20-0,40 m) e 1,76 % (MG – 0-0,20 m); e nos termiteiros entre 1,11 % (PI topo) e 2,40 % (RS-JC meio) (Tabela 2). Os teores de COT nos termiteiros foram superiores aos dos solos adjacentes em todos os ambientes avaliados (Figura 19). Essa acumulação de carbono se deve não só ao modo como constroem seus ninhos, mas também pela reciclagem de nutrientes e decomposição provinda de sua base alimentar, composta por minerais e matéria orgânica (Kaschuk et al. 2006; Mello et al., 2009).

**Tabela 2.** Propriedades físicas dos termiteiros e solos adjacentes

		Argila	Silte	Areia	SM LF	C	ASE
		%			( $10^{-7} \text{ m}^3 \text{ kg}^{-1}$ )	(%)	$\text{m}^2 \text{ g}^{-1}$
<b>RS-JC</b>	<b>Solo 0-0,20</b>	26,45	7,89	65,66	73,7 c	0,99 c	31,5 a
	<b>Solo 0,20-0,40</b>	32,43	10,18	57,39	79,1 a	0,88 d	32,0 a
	<b>Meio</b>	33,21	10,97	55,82	59,3 d	2,41 a	34,7 a
	<b>Topo</b>	36,75	10,07	53,18	77,0 b	2,25 b	34,9 a
<b>RS-ES</b>	<b>Solo 0-0,20</b>	25,99	17,48	56,53	10,4 d	0,84 c	33,5 b
	<b>Solo 0,20-0,40</b>	33,34	17,16	49,50	29,0 a	0,72 c	31,7 b
	<b>Meio</b>	35,77	19,56	44,67	14,4 c	1,76 a	41,9 a
	<b>Topo</b>	36,50	17,58	45,92	16,1 b	1,69 b	42,2 a
<b>MG</b>	<b>Solo 0-0,20</b>	45,73	42,56	11,70	896,8 b	2,60 c	45,9 a
	<b>Solo 0,20-0,40</b>	47,86	41,93	10,21	944,3 a	1,64 d	43,8 a
	<b>Meio</b>	51,14	38,83	10,04	815,0 d	3,98 b	49,9 a
	<b>Topo</b>	67,55	17,32	15,13	859,8 c	4,58 a	51,2 a
<b>PI</b>	<b>Solo 0-20</b>	13,63	2,92	83,45	0,6 c	0,58 c	16,9 b
	<b>Solo 0,20-0,40</b>	27,61	6,52	65,87	1,1 a	0,50 d	19,3 a
	<b>Meio</b>	29,28	6,01	64,71	0,8 bc	1,53 a	21,5 a
	<b>Topo</b>	26,64	6,22	67,14	0,9 ab	1,11 b	17,5 b
<b>MT</b>	<b>Solo 0-0,20</b>	5,14	1,84	93,02	0,6 c	0,59 c	12,5 c
	<b>Meio</b>	16,28	3,63	80,09	1,6 b	1,69 b	19,4 b
	<b>Topo</b>	14,19	4,16	81,65	2,6 a	2,38 a	27,4 a
<b>PA</b>	<b>Solo 0-0,20</b>	17,12	6,52	76,36	2,3 b	1,32 b	20,2 b
	<b>Meio</b>	33,95	9,07	56,98	2,0 c	1,13 c	34,2 a
	<b>Topo</b>	34,36	9,03	56,61	2,6 a	1,99 a	28,8 b

Médias seguidas pela mesma letra não diferem entre si pelo teste de Tukey, ao nível de 5% de probabilidade. SM = Suscetibilidade magnética LF= baixa frequência;

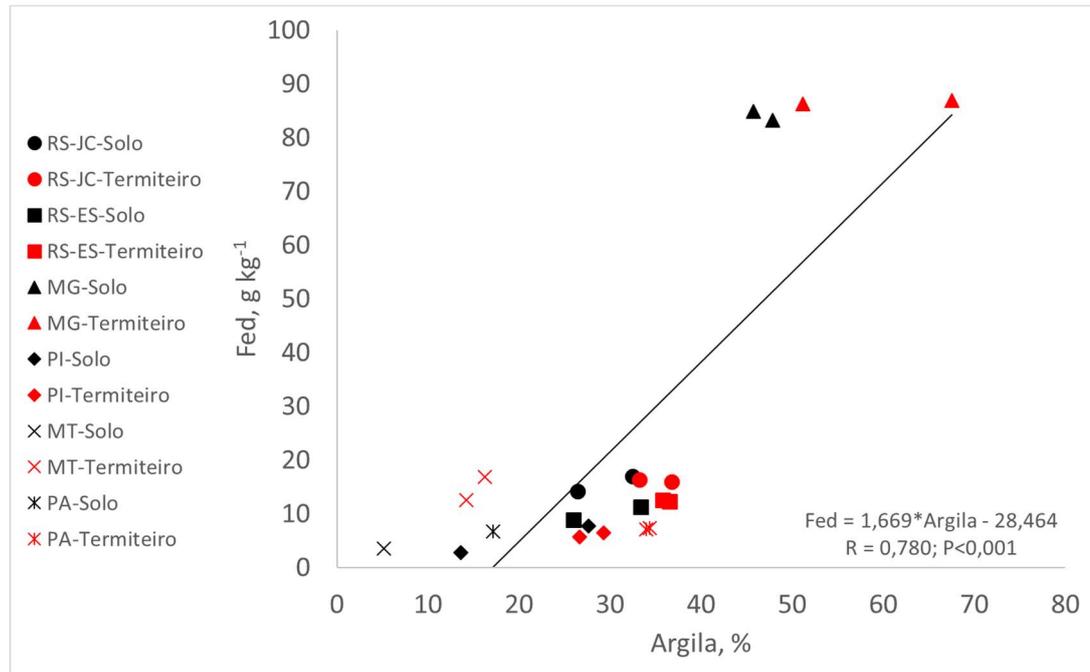
**Figura 19.** Carbono orgânico total dos termiteiros e solos adjacentes.

A concentração de óxidos de ferro pedogênicos nos solos variou entre 2,8 g kg<sup>-1</sup> (PI - 0-0,20 m) e 84,8 g kg<sup>-1</sup> (MG - 0-0,20 m); e nos termiteiros entre 5,7 g kg<sup>-1</sup> (PI topo) e 86,8 g kg<sup>-1</sup> (MG topo) (Tabela 3). Os baixos valores da relação Feo/Fed, na maioria inferiores a 0,15, indicam uma predominância de tipos cristalinos de óxidos de ferro (hematita, goethita e maghemita) em detrimento a tipos de baixa cristalinidade como a ferrihidrita (Kämpf e Curi, 2000; Curi e Kämpf, 2012). Em quatro ambientes (RS-JC, RS-ES, PI e MT) ocorreu aumento dos teores de óxidos de ferro nos termiteiros em relação à camada 0-0,20 cm dos solos. Em adição, embora não significativa estatisticamente, uma tendência de incremento de Fed foi verificada nos materiais do termiteiro no ambiente MG. Considerando que os óxidos de ferro são constituintes da fração argila dos solos, esses resultados corroboram com o enriquecimento dessa fração verificado nos materiais dos termiteiros. Na Figura 20 se observa a uma relação positiva entre os teores de argila e a concentração de Fed considerando os resultados obtidos no solo e termiteiro de todos os ambientes. Nos diferentes ambientes se verificou que o aumento de argila do solo para o termiteiro resultou em aumento na concentração de óxidos de ferro. Nos ambientes MT e PA, o aumento do grau de cristalinidade dos óxidos de ferro nos materiais dos termiteiros, expresso pela redução da relação Feo/Fed, pode estar relacionado a dissolução de cristais com baixa cristalinidade durante a passagem do solo pelo trato digestivo dos térmitas.

**Tabela 3.** Médias dos teores de ferro extraído com ditionito-citrato-bicarbonato de sódio (Fed), oxalato de amônio (Feo) e a relação Feo/Fed

		Fed	Feo	Feo/Fed
		(g/kg)		
<b>RS-JC</b>	<b>Solo 0-0,20</b>	14.23 b	0.71 b	0.05
	<b>Solo 0,20-0,40</b>	16.94 a	0.68 b	0.04
	<b>Meio</b>	16.33 a	0.69 b	0.04
	<b>Topo</b>	16.03 b	1.01 a	0.06
<b>RS-ES</b>	<b>Solo 0-0,20</b>	8.84 b	1.06 a	0.12
	<b>Solo 0,20-0,40</b>	11.23ab	0.51 c	0.05
	<b>Meio</b>	12.55 a	0.95ab	0.08
	<b>Topo</b>	12.32 a	0.81 b	0.07
<b>MG</b>	<b>Solo 0-0,20</b>	84.83 a	1.39 a	0.02
	<b>Solo 0,20-0,40</b>	83.28 a	1.28 a	0.02
	<b>Meio</b>	86.26 a	0.96 a	0.01
	<b>Topo</b>	86.87 a	1.24 a	0.01
<b>PI</b>	<b>Solo 0-0,20</b>	2.77 d	0.15 c	0.05
	<b>Solo 0,20-0,40</b>	7.79 a	0.17 bc	0.02
	<b>Meio</b>	6.47 b	0.36 a	0.06
	<b>Topo</b>	5.73 c	0.23 b	0.04
<b>MT</b>	<b>Solo 0-0,20</b>	3.58 c	0.97 b	0.27
	<b>Meio</b>	16.88 a	0.93 b	0.06
	<b>Topo</b>	12.50 b	1.44 a	0.12
<b>PA</b>	<b>Solo 0-0,20</b>	6.75 a	0.86 a	0.13
	<b>Meio</b>	7.14 a	0.25 c	0.03
	<b>Topo</b>	7.37 a	0.46 b	0.06

Médias seguidas pela mesma letra não diferem entre si pelo teste de Tukey, ao nível de 5% de probabilidade.

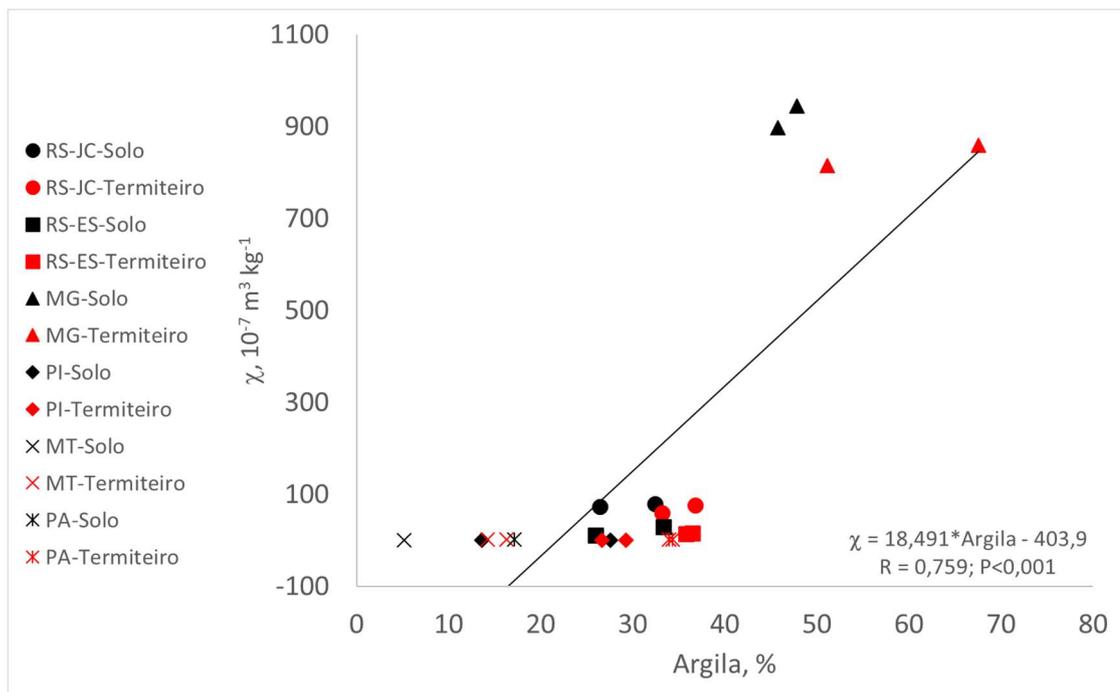


**Figura 20.** Relação entre teores de argila e concentração de ferro pedogênico. As cores pretas são dos solos nas profundidades 0-0,20m e 0,20-0,40m e as cores vermelhas são referentes aos termiteiros na porção meio e topo.

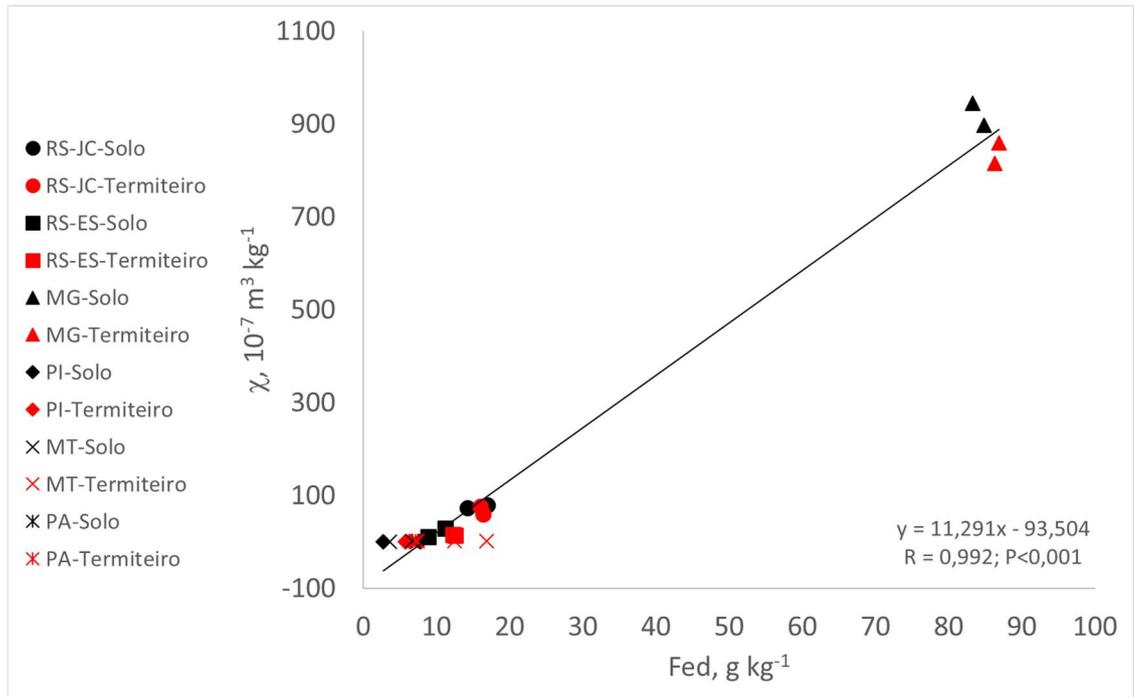
Conforme esperado, os resultados obtidos no solo e termiteiro de todos os ambientes mostraram relações expressivas entre a suscetibilidade magnética ( $\chi$ ) e os teores de argila e de óxidos de ferro (Figuras 21 e 22). Entretanto, analisando cada ambiente individualmente, os incrementos de argila e óxidos de ferro nos termiteiros não se refletiu em aumentos da  $\chi$ , indicativa da ocorrência dos tipos de óxidos de ferro magnéticos (magnetita e maghemita). Nos ambientes onde os materiais apresentaram as maiores suscetibilidades magnéticas (RS-JC, RS-ES, MG) se verificou inclusive uma redução da  $\chi$  nos materiais dos termiteiros (Tabela 2). Esses resultados podem ser consequência da seletividade dos térmitas pela fração argila, onde não ocorre a presença de magnetita por sua transformação a maghemita, e são sugestivos também de uma possível dissolução seletiva de cristais de maghemita durante a passagem do solo pelo trato digestivo dos térmitas.

A área superficial específica (ASE) nos solos variou entre 12,5 m<sup>2</sup> g<sup>-1</sup> (MT - 0-0,20 m) e 45,9 m<sup>2</sup> g<sup>-1</sup> (MG - 0-0,20 m); e nos termiteiros entre 17,5 m<sup>2</sup> g<sup>-1</sup> (PI topo) e 51,2 m<sup>2</sup> g<sup>-1</sup> (MG topo) (Figura 23). Nos ambientes RS-ES, MT e PA,

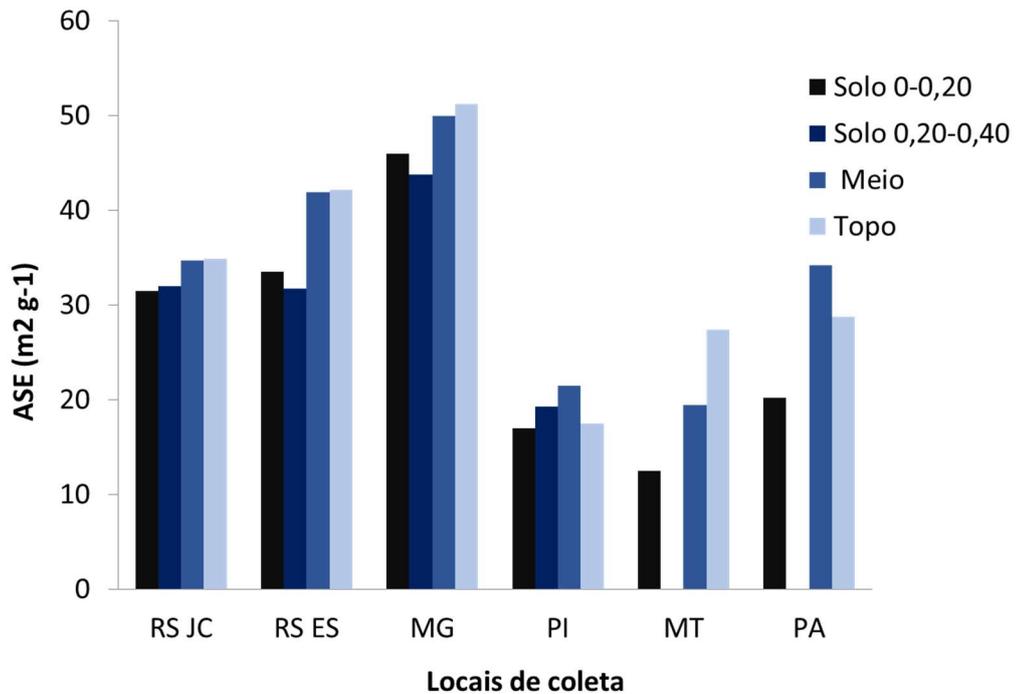
o aumento da ASE nos termiteiros em relação aos solos foi significativo, enquanto nos demais foram observadas somente tendências de incremento da ASE nos termiteiros. Esses resultados refletiram as relações positivas obtidas entre os valores de ASE e os teores de argila (Figura 24), de óxidos de ferro ( $R=0,752$ ;  $P<0,001$ ) e de carbono orgânico total ( $R=0,486$ ;  $P=0,022$ ).



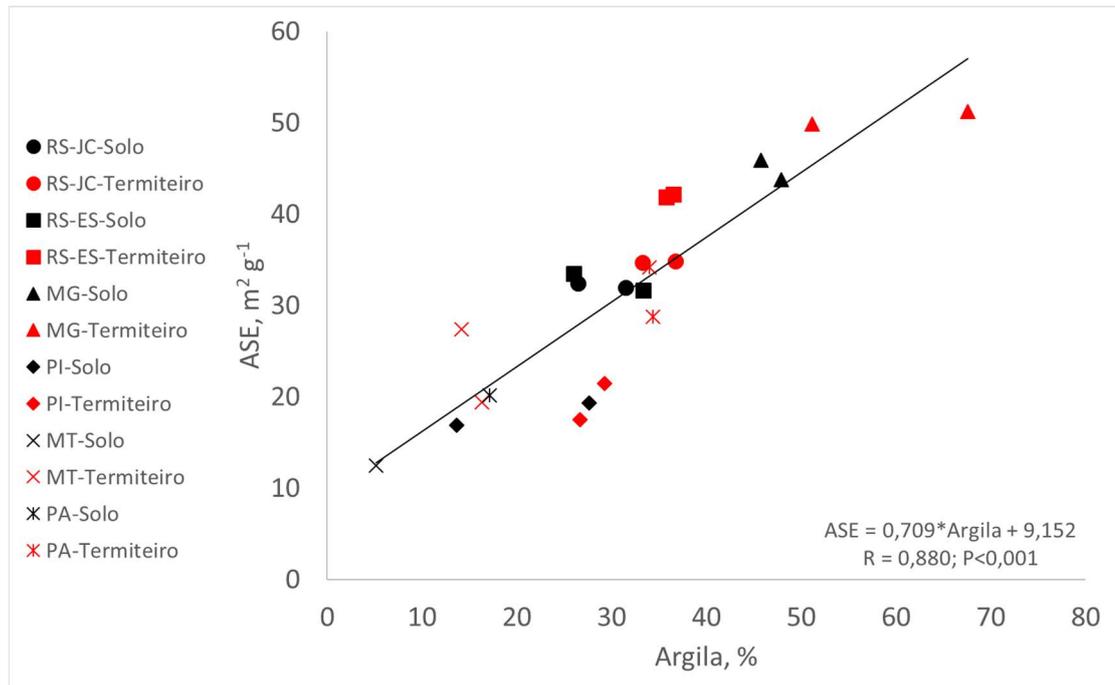
**Figura 21.** Relação entre teor de argila e a suscetibilidade magnética de todos os ambientes. As cores pretas são dos solos nas profundidades 0-0,20m e 0,20-0,40m e as cores vermelhas são referentes aos termiteiros na porção meio e topo.



**Figura 22.** Relação entre a concentração ferro pedogênicos e a suscetibilidade magnética de todos os ambientes. As cores pretas são dos solos nas profundidades 0-0,20m e 0,20-0,40m e as cores vermelhas são referentes aos termiteiro na porção meio e topo.



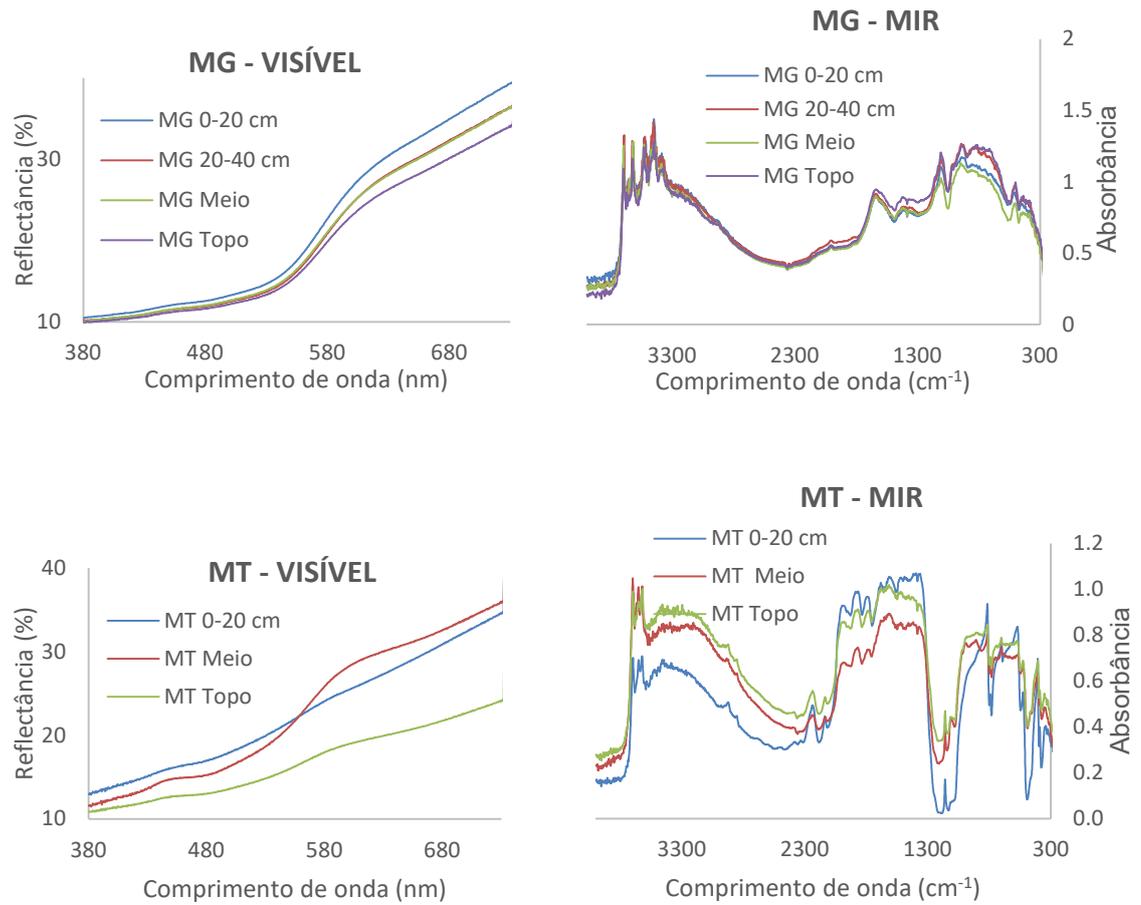
**Figura 23.** Área superficial específica dos termiteiros e solos adjacentes.



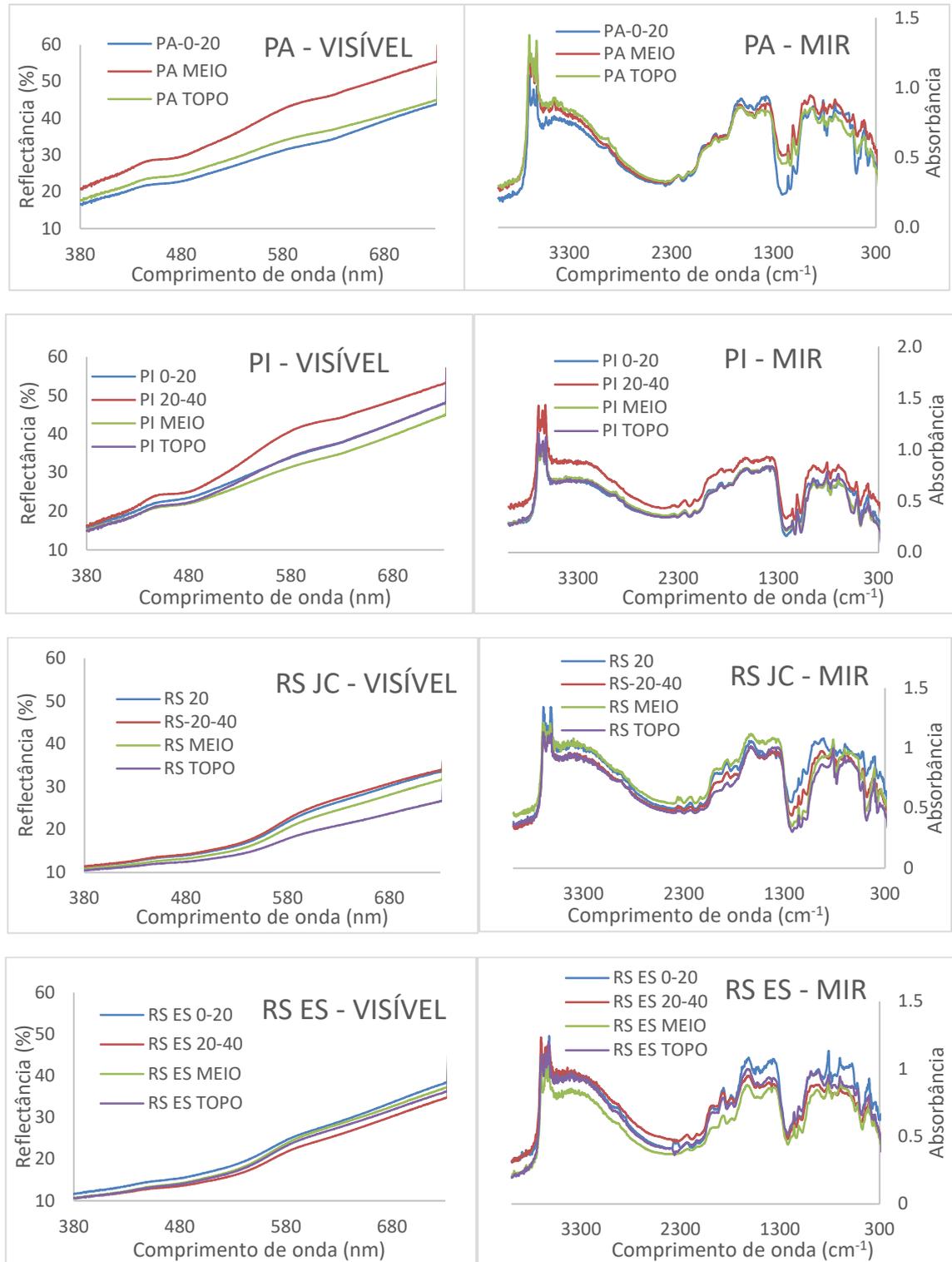
**Figura 24.** Relação entre o teor de argila e a área superficial específica de todos os ambientes. As cores pretas são dos solos nas profundidades 0-0,20m e 0,20-0,40m e as cores vermelhas são referentes aos termiteiro na porção meio e topo.

### 3.5.2. Análise dos espectros do Visível ao MIR dos solos e termiteiros

Na Figura 25 são mostrados os espectros das faixas do visível (VIS) e do infravermelho médio (MIR) dos materiais do solo e do termiteiro de dois dos ambientes estudados. Os espectros obtidos no ambiente MG, indicaram similaridade entre os materiais do solo e do termiteiro nas duas faixas analisadas. Já os espectros obtidos nos materiais do ambiente MT sugeriram alterações entre os materiais do solo e do termiteiro nesse local. Os demais espectros se encontram na Figura 26.



**Figura 25.** Espectros da faixa do Visível (VIS) e Infravermelho médio (MIR) dos materiais do solo e do termiteiro dos ambientes MG e MT.



**Figura 26.** Espectros da faixa do visível e infravermelho médio (MIR) das amostras de PA, PI, RS JC e RS ES. Nas profundidades 0-0,20 e 0,20-0,40 m e termiteiros na porção meio e topo.

Uma análise utilizada para expressar a similaridade entre os materiais do solo e do termiteiro foi a correlação entre os dados dos espectros obtidos nas duas faixas analisadas (VIS e MIR). Na Tabela 4 são apresentados os valores dos coeficientes de determinação para as correlações entre os espectros das camadas de solos com as porções do meio e topo dos termiteiros.

**Tabela 4.** Coeficientes de determinação ( $R^2$ ) relativo as correlações entre materiais do solo e do termiteiro nos ambientes estudados, em relação as faixas do VIS e MIR.

	VIS $R^2$	MIR $R^2$
RS JC 0-20 X MEIO	0,99	0,78
RS JC 20-40 X MEIO	0,99	0,90
RS JC 0-20 X TOPO	0,99	0,79
RS JC 20-40 X TOPO	0,98	0,92
RS ES 0-20 X MEIO	0,99	0,97
RS ES 20-40 X MEIO	0,99	0,91
RS ES 0-20 X TOPO	0,99	0,95
RS ES 20-40 X TOPO	0,99	0,93
MG-0-20 X MEIO	0,99	0,98
MG-20-40 X MEIO	0,99	0,97
MG 0-20 X TOPO	0,99	0,93
MG 20-40 X TOPO	0,99	0,97
PI 0-20 X MEIO	0,99	0,96
PI 20-40 X MEIO	0,99	0,93
PI 0-20 X TOPO	0,96	0,95
PI 20-40 X TOPO	0,98	0,94
MT-0-20 X MEIO	0,97	0,69
MT 0-20 X TOPO	0,99	0,81
PA-0-20 X MEIO	0,98	0,87
PA 0-20 X TOPO	0,99	0,86

Os coeficientes de determinação obtidos para a faixa do visível (380 a 730 nm) foram sempre superiores a 0,96, com a maioria das correlações apresentando  $R^2 \geq 0,99$ . Por outro lado, os valores de  $R^2$  das correlações entre os dados obtidos na faixa do infravermelho médio (300 a 4000  $\text{cm}^{-1}$ ) indicaram alterações nos materiais dos termiteiros em relação aos materiais de solos, principalmente nos ambientes MT, RS-JC e PA (Tabela 4).

A análise da proporção entre a hematita e a goethita ( $\text{Hm}/(\text{Hm}+\text{Gt})$ ), os dois mais comuns tipos de óxidos de ferro ocorrentes em solos tropicais e

subtropicais e responsáveis pela pigmentação desses solos, mostrou uma expressiva amplitude de valores, variando entre 0,07 no solo do ambiente PI e 0,69 no solo do ambiente MG (Tabela 5). O enquadramento dos solos estudados variou entre solos goethíticos e solos hematíticos-goethíticos segundo a classificação proposta por Ramos (2019), evidenciando uma grande diversidade pedoambiental entre os solos (Kämpf e Curi, 2000; Bigham et al., 2002). Entretanto, não foram observadas mudanças consideráveis dos valores da razão  $Hm/(Hm+Gt)$  entre os solos e os termiteiros nos diferentes ambientes, concordando com os altos valores de  $R^2$  obtidos nas correlações relativas a faixa do visível (onde é determinada essa relação), e indicando que a proporção desses minerais não foi afetada pela passagem no trato digestivo dos térmitas.

**Tabela 5** Relação hematita/(hematita+goethita) ( $Hm/(Hm+Gt)$ ) e classificação da amostra conforme essa proporção

AMOSTRA	$Hm/(Hm+Gt)$	CLASSIFICAÇÃO
RS JC 0-20	0,55	HEMATÍTICO – GOETHÍTICO
RS JC 20-40	0,53	
RS JC MEIO	0,59	
RS JC TOPO	0,59	
RS ES 0-20	0,48	GOETHÍTICO – HEMATÍTICO
RS ES 20-40	0,52	
RS ES MEIO	0,49	
RS ES TOPO	0,49	
MG 0-20	0,67	HEMATÍTICO – GOETHÍTICO
MG 20-40	0,69	
MG MEIO	0,67	
MG TOPO	0,67	
PI 0-20	0,07	GOETHÍTICO
PI 20-40	0,09	
PI MEIO	0,08	
PI TOPO	0,08	
MT 0-20	0,28	GOETHÍTICO – HEMATÍTICO
MT MEIO	0,30	
MT TOPO	0,34	
PA 0-20	0,12	GOETHÍTICO
PA MEIO	0,14	
PA TOPO	0,14	

Em relação a cor dos solos e dos termiteiros, classificada utilizando-se o programa Munsell Conversion, versão 6.4, os resultados são apresentados na Tabela 6. Os parâmetros matiz (M), valor (V) e (C), o índice de

avermelhamento (RR) e a combinação RGB, indicaram intensidades distintas de mudança da cor entre o solo e o termiteiro nos diferentes ambientes. Com base nesses parâmetros, nos ambientes RS-ES e MG os materiais do solo e dos termiteiros se mostraram semelhantes. No ambiente PI, pequenas mudanças no croma indicaram similaridades entre os materiais do solo 0-0,20 m e da porção média do termiteiro; e entre os materiais do solo 0,20-0,40 m e do topo do termiteiro. A semelhança entre as cores dos materiais (solo e termiteiro) dentro de cada um desses três ambientes foi corroborada pelos elevados coeficientes de determinação das correlações realizadas (Tabela 4).

No ambiente RS-JC, o material do topo do termiteiro apresentou um aumento da matiz e diminuições do valor, do croma e do índice de avermelhamento, em relação aos materiais do solo e da porção média do termiteiro. No ambiente MT, os materiais do termiteiro apresentaram parâmetros de cor alterados em relação ao material do solo, com destaque a porção do meio, onde a matiz diminuiu consideravelmente, enquanto o croma e o avermelhamento aumentaram. No ambiente PA, somente o material do meio do termiteiro diferiu em cor do material do solo, com incrementos do valor, do croma e do avermelhamento. Nesses três últimos ambientes, as alterações verificadas na cor dos termiteiros em relação aos solos também foram indicadas pelos menores coeficientes de determinação das correlações realizadas (Tabela 4).

Não foram observadas relações diretas entre os parâmetros de cor e as demais características físicas e químicas determinadas nos materiais dos solos e dos termiteiros. Possivelmente, as mudanças de cor observadas entre os solos e os termiteiros nos diferentes ambientes estão relacionadas com combinações de incrementos de argila, de carbono orgânico e de óxidos de ferro verificados nos termiteiros. Em adição, deve ser considerado que mudanças de cor entre as porções dos termiteiros também são consequência da diferença na exposição a intempérie.

**Tabela 6.** Parâmetros de cor dos materiais dos solos e dos termiteiros.

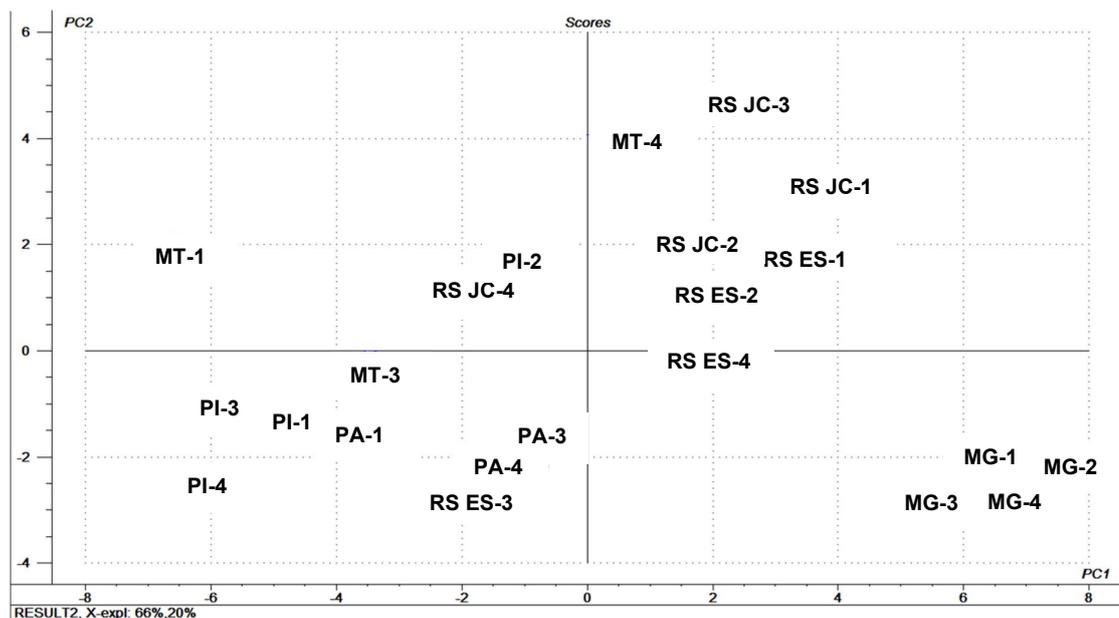
AMOSTRA	MATIZ	VALOR	CROMA	RR=f(hm)	COMBINAÇÃO RGB
RS-JC 0-0,20	5,72YR	4,96	3,66	3,16	
RS-JC 0,20-0,40	5,78YR	5,02	3,77	3,17	
RS-JC MEIO	5,88YR	4,82	3,50	2,99	
RS-JC TOPO	6,56YR	4,59	2,90	2,17	
RS-ES 0-0,20	7,08YR	5,22	3,78	2,11	
RS-ES 0,20-0,40	6,49YR	4,94	3,67	2,61	
RS-ES MEIO	6,66YR	5,12	4,01	2,62	
RS-ES TOPO	6,69YR	5,07	3,91	2,55	
MG 0-0,20	3,69YR	4,96	4,81	6,12	
MG 0,20-0,40	3,55YR	4,8	4,57	6,14	
MG MEIO	3,83YR	4,82	4,51	5,77	
MG TOPO	3,87YR	4,71	4,28	5,57	
PI 0-0,20	8,86YR	6,11	3,53	0,66	
PI 0,20-0,40	8,98YR	6,52	4,21	0,66	
PI MEIO	8,90YR	5,92	3,36	0,62	
PI TOPO	8,85YR	6,09	3,78	0,71	
MT 0-0,20	8,38YR	5,26	3,09	0,95	
MT MEIO	6,72YR	5,29	4,02	2,49	
MT TOPO	8,05YR	4,62	2,54	1,07	
PA 0-0,20	8,83YR	5,93	3,1	0,61	
PA MEIO	8,55YR	6,72	3,66	0,79	
PA TOPO	8,89YR	6,13	3,17	0,57	

RR=f(hm): Redness rating

A análise de componentes principais utilizando a faixa espectral do infravermelho médio (MIR), indicou alterações e similaridades tanto entre os seis ambientes estudados como entre os materiais de solo e termiteiro em cada ambiente (Figura 27). Entre ambientes pode ser destacado o distanciamento verificado entre os materiais do MG e MT, justificado por características distintas como granulometria (>45 e <17 % de argila, respectivamente), teor de óxidos de ferro (>83 e <17 g kg<sup>-1</sup> de Fed, respectivamente), razão Hm/(Hm+Gt) (>0,65 e

<0,35, respectivamente), e índice de avermelhamento (>5,5 e <2,5, respectivamente).

Considerando cada ambiente isoladamente, a similaridade analítica verificada nesse estudo entre os materiais do ambiente MG foi expressa pelo agrupamento dos mesmos (MG-1, MG-2, MG-3 e MG-4) no gráfico da PCA (Figura 27). Também em um mesmo quadrante foram agrupados os materiais do ambiente PA, porém com um pequeno afastamento do material do solo (PA-1) em relação aos materiais do termiteiro (PA-2 e PA-3). Por outro lado, no ambiente MT, onde os materiais do solo e do termiteiro apresentaram teores variáveis de COT, de óxidos de ferro e de granulometria, se verificou a maior dispersão entre os pontos (MT-1, MT-2 e MT-3) no gráfico da PCA.



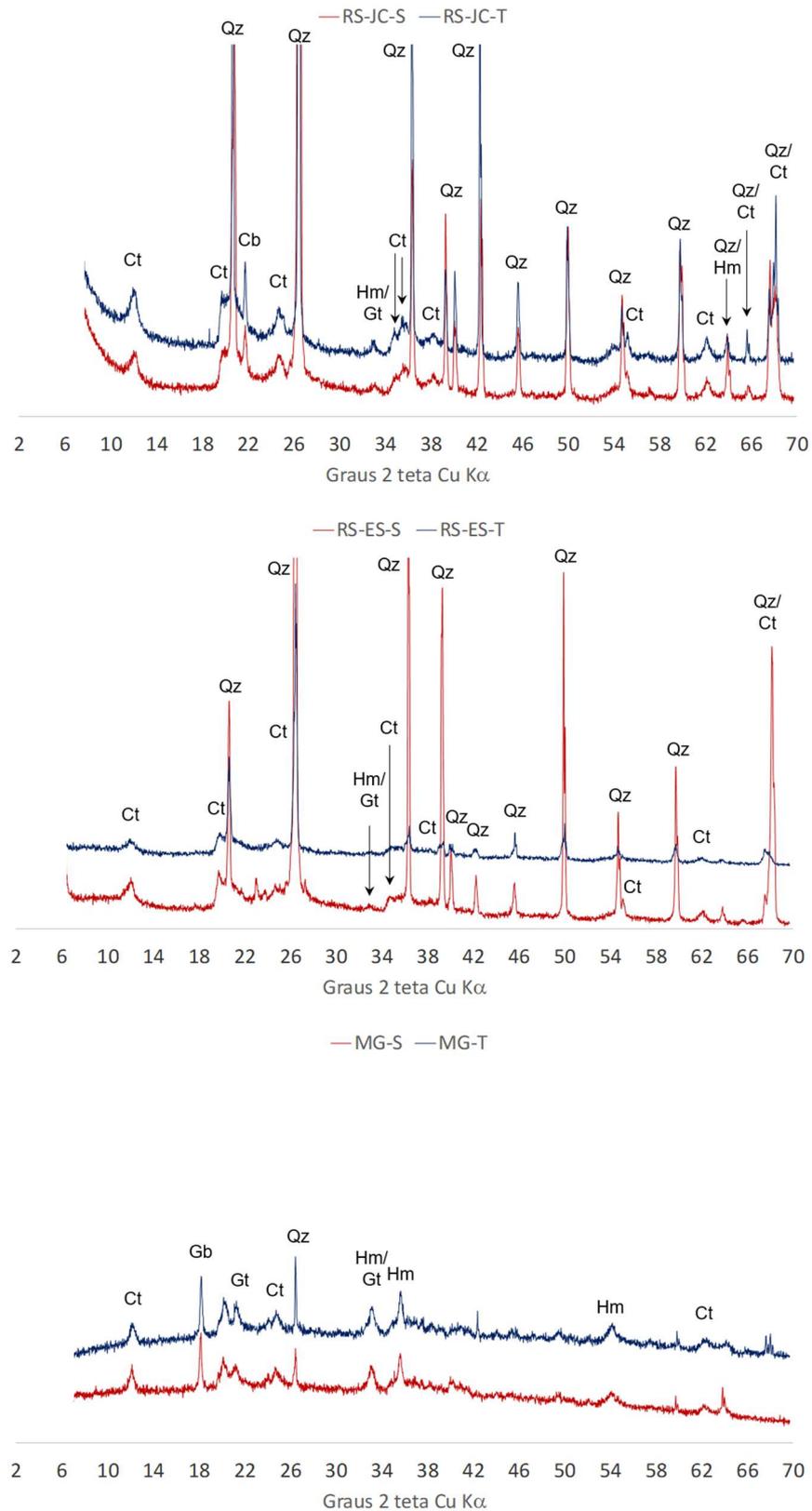
**Figura 27.** Análise de componentes principais dos materiais a partir dos dados espectrais da faixa do infravermelho médio. XX-nº= XX se refere ao ambiente e o nº se refere ao material analisado na sequência Solo-0-0,20 m, Solo-0,20-0,40 m, Termiteiro Meio, Termiteiro Topo respectivamente.

### 3.5.3. Difractometria de raios x dos solos e termiteiros

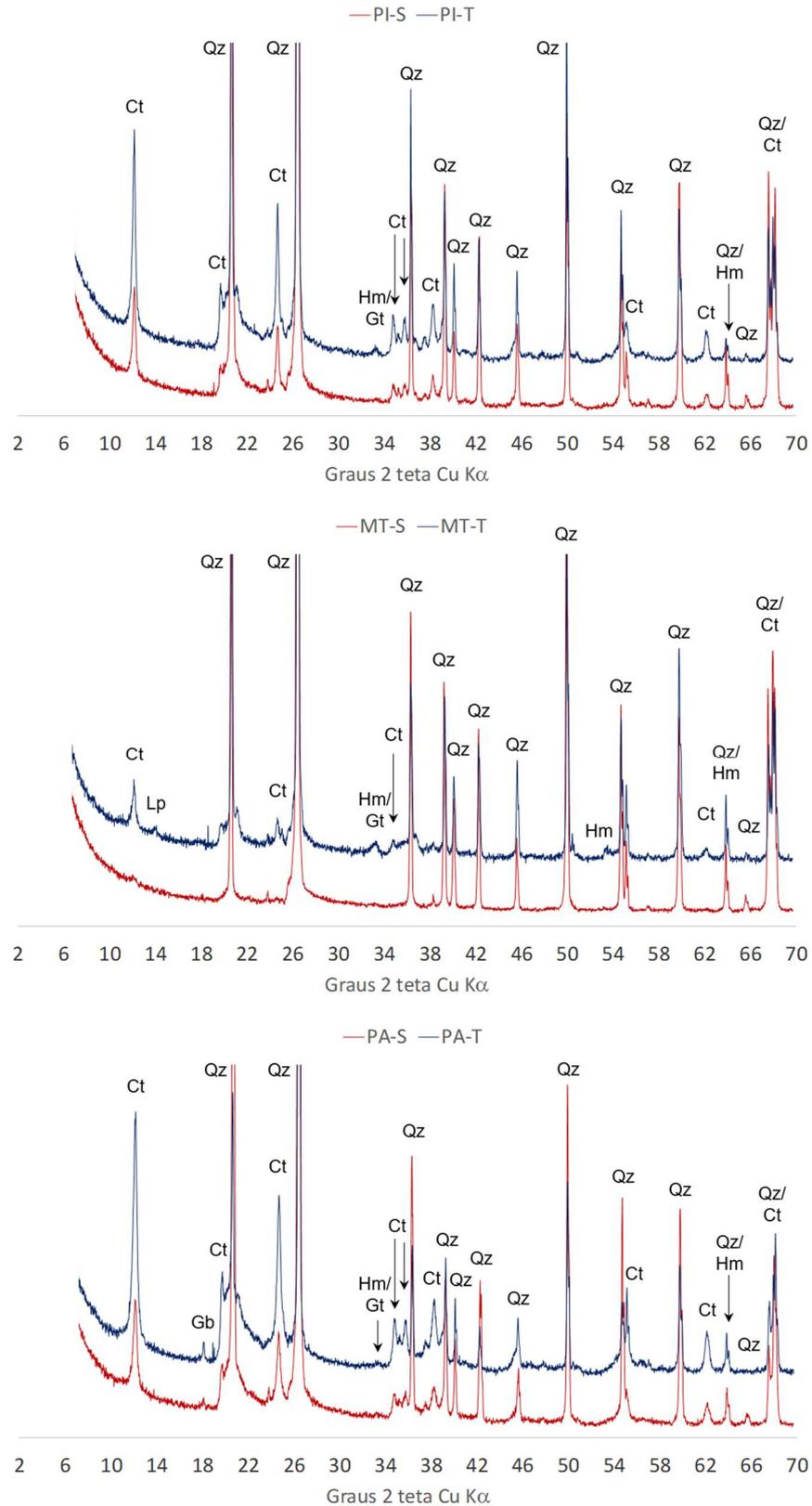
Os resultados das análises por difratometria de raios X (DRX) da fração TFSA são mostrados nas Figuras 28 e 29. As composições mineralógicas identificadas foram representativas de solos altamente intemperizados de regiões tropicais e subtropicais (Kämpf e Curi, 2003), formadas por diferentes proporções de caulinita, gibbsita, óxidos de ferro (hematita, goethita) e de silício (quartzo). Nos ambientes RS-JC, RS-ES e MT, os materiais foram considerados quartzoso-caulinítico; nos ambientes PI e PA, os materiais foram caulinítico-quartzoso; e no ambiente MG, oxidico (gibbsita, hematita, goethita), quartzoso-caulinítico.

Em todos os ambientes, as análises não indicaram mudanças nas composições mineralógicas entre os solos e os termiteiros. Entretanto, considerando a observação rigorosa do peso das amostras analisadas, foram constatadas mudanças importantes nas intensidades das reflexões entre os difratogramas dos solos e dos termiteiros. Em quatro ambientes (RS-JC, PI, MT, PA) se verificou uma diminuição das intensidades das reflexões do quartzo nos difratogramas dos termiteiros em relação aos solos (camada 0-0,20 m); e um aumento das intensidades das reflexões da caulinita nos difratogramas dos termiteiros dos ambientes RS-JC, PI, MT e PA. Também tiveram as intensidades das reflexões aumentadas nos termiteiros os óxidos de ferro hematita e goethita (RS-JC, PI, MT) e lepidocrocita (MT); e o óxido de alumínio gibbsita (PA). Esses resultados corroboram com a seletividade dos térmitas por partículas de tamanho argila (<0,002 mm) na construção de seus termiteiros, conforme também verificado pelos incrementos de argila e dos valores de ASE.

Um exemplo extremo dessa seletividade foi observado no difratograma do material do termiteiro do ambiente RS-ES, onde as reflexões do quartzo foram muito inferiores ao do material solo, possivelmente devido ao tamanho dos cristais de quartzo, considerando que o solo foi desenvolvido de granito. Por outro lado, no ambiente MG os difratogramas do solo e do termiteiro foram semelhantes, não sugerindo seletividade por parte dos organismos térmitas, possivelmente devido ser um solo muito argiloso desenvolvido de basalto.



**Figura 28.** Difrátogramas de raios X da fração terra fina seca ao ar dos materiais da camada 0-0,20 m do solo (S) e da porção meio do termiteiro (T) nos ambientes Rio Grande do Sul (RS-JC), Rio Grande do Sul (RS-ES) e Minas Gerais (MG). Ct-caulinita, Gb-gibbsita, Cb-cristobalita, Qz-quartzo, Hm-hematita, Gt-goethita.



**Figura 29.** Difratogramas de raios X da fração terra fina seca ao ar dos materiais da camada 0-0,20 m do solo (S) e da porção meio do termiteiro (T) nos ambientes Piauí (PI), Mato Grosso (MT) e Pará (PA). Ct-caulinita, Gb-gibbsita, Cb-cristobalita, Qz-quartzo, Hm-hematita, Gt-goethita, Lp-lepidocrocita.

### 3.6. Considerações finais

Em geral, os organismos térmitas mostram ser seletivos na seleção dos materiais dos solos adjacentes durante a construção dos termiteiros. Essa seletividade se expressa em aumentos nos teores de argila, de carbono orgânico total e de ferro relativo aos óxidos de ferro pedogênicos como a hematita, a goethita e a lepidocrocita. Essa seletividade por componentes orgânicos e minerais de tamanho argila aumenta os valores da área superficial específica dos materiais dos termiteiros.

Os espectros das faixas do visível (VIS) e do infravermelho médio (MIR) são sensíveis em indicar tanto similaridades como alterações entre os materiais do solo e do termiteiro. Neste sentido, nos ambientes estudados não se constata mudanças consideráveis nas proporções de hematita e goethita (razão  $Hm/(Hm+Gt)$ ) entre os solos e os termiteiros, indicando que essa proporção não é afetada pela passagem do solo no trato digestivo dos térmitas.

Os parâmetros de cor matiz, valor e croma, e o índice de avermelhamento e a combinação RGB, também são sensíveis em indicar intensidades distintas de mudança da cor entre o solo e o termiteiro nos diferentes ambientes. Por outro lado, não se observam relações diretas entre os parâmetros de cor e as demais características físicas e químicas dos solos e dos termiteiros.

As composições mineralógicas dos materiais dos ambientes estudados são representativas de solos altamente intemperizados de regiões tropicais e subtropicais. Os materiais dos diferentes ambientes foram enquadrados como quartzoso-caulinítico, caulinítico-quartzoso e oxídico (gibbsita, hematita, goethita), quartzoso-caulinítico. Para a construção dos termiteiros, os organismos térmitas selecionam partículas de tamanho argila como a caulinita, os óxidos de ferro (hematita, goethita, lepidocrocita) e de alumínio (gibbsita), em detrimento de partículas maiores como o quartzo.

O aumento do grau de cristalinidade dos óxidos de ferro nos materiais dos termiteiros em dois dos ambientes sugere uma dissolução seletiva de cristais com baixa cristalinidade durante a passagem do solo pelo trato digestivo dos térmitas. Já a redução da suscetibilidade magnética nos termiteiros de três

ambientes sugere uma dissolução seletiva de cristais de maghemita durante a passagem do solo pelo trato digestivo dos térmitas.

## **4. CAPÍTULO IV: ALTERAÇÕES DE ATRIBUTOS QUÍMICOS E MINERALÓGICOS DO SOLO PELA AÇÃO DE TÉRMITAS**

### **4.1. Introdução**

A sustentabilidade da agricultura cada vez mais vai necessitar de investimento e aplicação de estudos sobre a utilização de biodiversidade do solo no funcionamento do agroecossistema (Jouquet, P.; Chaudhary, E.; Kumar, A. R. V., 2018). Compreender o impacto de organismos térmitas nos ecossistemas é uma questão que continua fundamental na ecologia (Harit, 2017) e, conseqüentemente, na ciência do solo. Um levantamento realizado por Jouquet, P.; Chaudhary, E.; Kumar, A. R. V., (2018), onde os autores quantificaram o número de artigos sobre térmitas como pragas ou como engenheiros do ecossistema, revelou diferenças muito claras, com 2077 contra 154 artigos, respectivamente (fonte: Web of Science). Isso evidencia que mais esforços foram dispendidos na erradicação dos térmitas do que na compreensão de seus impactos no ambiente ou de seus efeitos em funções ecossistêmicas específicas. Portanto, este assunto é subestimado e mais pesquisas são necessárias para avaliar melhor a importância da atividade e diversidade de térmitas em agroecossistemas tropicais e subtropicais (Jouquet, P.; Chaudhary, E.; Kumar, A. R. V., 2018).

Os organismos térmitas são essenciais para o equilíbrio do ecossistema, pois os ninhos epígeos e suas galerias, quando ativos, servem de abrigo para várias outras espécies e quando abandonados, passam a ser

habitados por inquilinos (outras colônias ou invertebrados) por anos ou até séculos (Traoré et al., 2008, 2015; Rückamp et al., 2012; Oliveira et al., 2014; Erens et al., 2015). Segundo Redford (1984), uma vez destruídos esses ninhos, várias populações de formigas, aranhas e outros organismos podem entrar em declínio. O mesmo autor verificou que a espécie de térmita *Cornitermes cumulans* é uma espécie chave em seu habitat natural, pois são muitos animais de mesofauna e macrofauna associados aos seus ninhos, além dos que utilizam os termiteiros abandonados como moradia (Constantino, 1999; Valério, 2006). Para Constantino (2005), os ninhos antigos e abandonados servem também como substrato para o desenvolvimento da vegetação local.

A base alimentar da maioria dos térmitas de solo é uma mistura de estruturas minerais com compostos celulósicos. A passagem dessas misturas pelo trato digestivo dos térmitas auxilia na decomposição da matéria orgânica e na ciclagem de nutrientes. Eles também realizam simbioses com bactérias fixadoras de nitrogênio, as quais compensam a alta relação C:N na sua dieta (Mello et al., 2009). Seu intestino é formado por compartimentos com diferentes gradientes de oxigênio e hidrogênio, podendo o pH alcançar valores de 12,5 (Donovan, S. E.; Eggleton, P.; Bignell, D. E., 2001a; Kaschuk et al., 2006). Podem ainda ocorrer interações mutualísticas no interior do tubo digestivo com protozoários flagelados e também com térmitas inferiores (Correia, 2002). Essas informações certamente contribuem para o entendimento do potencial que os organismos térmitas tem de gerar mudanças/alterações nas características físicas, químicas e mineralógicas do solo.

Investigando em laboratório a construção de termiteiros por uma colônia de térmitas africanas, Jouquet et al. (2007), observou uma seletividade dos mesmos por partículas de tamanho argila, as quais sofreram alterações mineralógicas durante o processo de construção. O argilomineral ilita presente no solo foi transformado em esmectita nos termiteiro devido à ação da saliva dos térmitas na passagem do trato digestivo. Já Kaschuk (2006) não observou alterações mineralógicas causadas por térmitas em solos do sul do Brasil, possivelmente devido à alta estabilidade dos minerais presentes no solo (caulinita e vermiculita-HE). Por outro lado, os térmitas causaram mudanças em características químicas do solo, como o incremento dos teores de P, K<sup>+</sup>, Ca<sup>2+</sup>,

Mg<sup>2+</sup> e C orgânico nos ninhos em relação ao solo adjacente, bem como a atividade de bioturbação e construção dos ninhos melhoraram a qualidade física do solo.

A transformação da illita em outros argilominerais contendo menos potássio tem sido observada em vários tipos de solos (Meunier e Velde, 2004). Nos estudos de gênese em ambientes tropicais e subtropicais, as micas e a illita são em geral instáveis ao intemperismo, sendo transformadas em vermiculita (Wilke et al., 1984; Koch et al., 1992), interestratificado illita-esmectita (Hughes, R. E.; Moore, D. M.; Glass, H., 1994) ou argilominerais 2:1 com hidróxi-Al entrecamadas (2:1 HE) (Azevedo et al., 2012). No entanto, a reação observada por Jouquet et al. (2007) tem lugar em escala de tempo mais rápida do que normalmente àquela associada a processos pedogenéticos.

A alteração mineralógica pelos térmitas pode ser explicada pela liberação de potássio para a solução externa (Meunier e Velde, 2004). Isso pode ser devido ao efeito direto da saliva de térmitas, ou uma estimulação indireta da microflora com saliva ou material orgânico, ou por uma combinação destes (Jouquet et al. 2007). Usando experimentos de laboratório, Jouquet et al. (2002) encontraram uma modificação das propriedades da argila por ação de térmitas em argilominerais 2:1 com criação de camadas de esmectita com pequenas cargas. No estudo de Jouquet et al. (2007), os térmitas aumentaram o conteúdo de illita pouco cristalizada (PCI) em relação ao conteúdo de illita bem cristalizada (WCI) no material utilizado para o termiteiro. Segundo Lanson (1998), PCI pode ser considerado como uma fase grande de illita com algumas camadas de esmectita/vermiculita, enquanto a WCI é uma illita de alta cristalinidade. Portanto, os resultados demonstraram um efeito importante dos térmitas na alteração mineralógica de argilas através do aumento da interestratificação e/ou pela diminuição do número de camadas nos cristalitos. Assim, os térmitas podem ser consideradas como agentes aceleradores de alterações mineralógicas no ambiente pedogênico, e devem, junto com outros engenheiros do solo, ser considerados em modelos que descrevem a formação do solo (Jones, C. G.; Lawton, J. H.; Shachak, M., 1994; Jouquet et al., 2006).

Nesse contexto, o presente estudo considera que os térmitas são seletivos na escolha dos materiais utilizados para a construção de seus ninhos

e que nesse processo ocorrem alterações químicas e mineralógicas nesses materiais devido a passagem dos mesmos pelo trato digestivo dos térmitas.

## **4.2. Hipótese**

A ação dos organismos térmitas sobre o solo durante a construção de seus termiteiros além de ser seletiva, altera a composição elementar do solo e a mineralogia da fração argila durante a passagem do solo pelo trato digestivo.

## **4.3. Objetivos**

**Geral:** Relacionar os materiais utilizados por térmitas na construção de cupinzeiros com os materiais dos solos adjacentes aos mesmos quanto a composição elementar, a concentração e características dos argilominerais.

**Específicos:** (i) Determinar a composição elementar dos materiais de solos e termiteiros; (ii) Identificar e caracterizar os minerais da fração argila dos materiais de solos e termiteiros. (iii) Verificar com base nas características químicas possíveis alterações na composição mineralógica dos materiais de solos durante a construção dos termiteiros; (v) Identificar as espécies de térmitas dos diferentes termiteiros.

## **4.4. Metodologia**

### **4.4.1. Seleção dos solos e preparo de amostras**

As amostras de solos foram coletadas em condição de vegetação natural nas camadas de 0-0,20 e 0,20-0,40 m de profundidade, em área próxima do termiteiro sem ação visível dos térmitas. Nos termiteiros, as amostras foram coletadas nas posições de meio e topo, onde também foram coletados espécimes de térmitas para posterior identificação e classificação das espécies. As amostras dos solos e dos termiteiros foram secas ao ar, destorroadas e passadas em peneiras com malha de 2 mm para obtenção da fração terra fina seca ao ar (TFSA). Uma porção de TFSA foi peneirada em peneira de malha de

0,053 mm para a obtenção da fração silte+argila. A fração argila foi coletada por sedimentação, segundo a Lei de Stokes, após dispersão total das partículas primárias da fração TFSA. A fração argila foi floculada com solução de cloreto de cálcio  $0,5 \text{ mol L}^{-1}$ , com posterior lavagem com solução de etanol:água (1:1) e secagem em estufa a  $50 \text{ }^\circ\text{C}$ .

A fração argila total foi separada em duas frações via sedimentação, em partículas de 2 a  $0,2 \text{ }\mu\text{m}$  e outra em partículas menores que  $0,2 \text{ }\mu\text{m}$ . Para isso, foram realizadas sucessivas centrifugações até que o sobrenadante ficasse limpo, com base no cálculo a seguir:

$$t \text{ min} = (63 \cdot 10^8 \cdot n \cdot \log_{10} \cdot R/S / (Nm)^2 \cdot (D\mu)^2 \cdot \Delta S) \cdot CT$$

onde:

n = viscosidade

N = rotação

D = diâmetro de partícula

R e S = distância do centro da centrífuga até a base do tubo falcon e topo da solução.

$\Delta S$  e CT = valor tabelado de acordo com a temperatura

#### **4.4.2. Fluorescência de raios x (FRX)**

A quantificação multi-elementar da fração TFSA dos solos e dos materiais dos termiteiros foi realizada por análises de FRX em espectrômetro modelo Shimadzu EDX-720. Os elementos que foram analisados compreendem deste o sódio (Na) até urânio (U) da tabela periódica de elementos químicos. Antes da análise, amostras com  $0,5 \text{ g}$  foram preparadas na forma de pastilhas utilizando-se uma prensa com pressão de  $5 \text{ Mg cm}^{-2}$  durante 2 minutos.

#### 4.4.3. Difractometria de raios x (DRX)

A identificação e caracterização dos minerais que constituem os solos e os materiais dos termiteiros foram realizadas por análises de DRX em equipamento Bruker-D8 Advance (Radiação Cu-K $\alpha$ ). As amostras da fração argila total e suas subfrações (argila grossa e argila fina) foram analisadas em lâminas de vidro confeccionadas com material orientado.

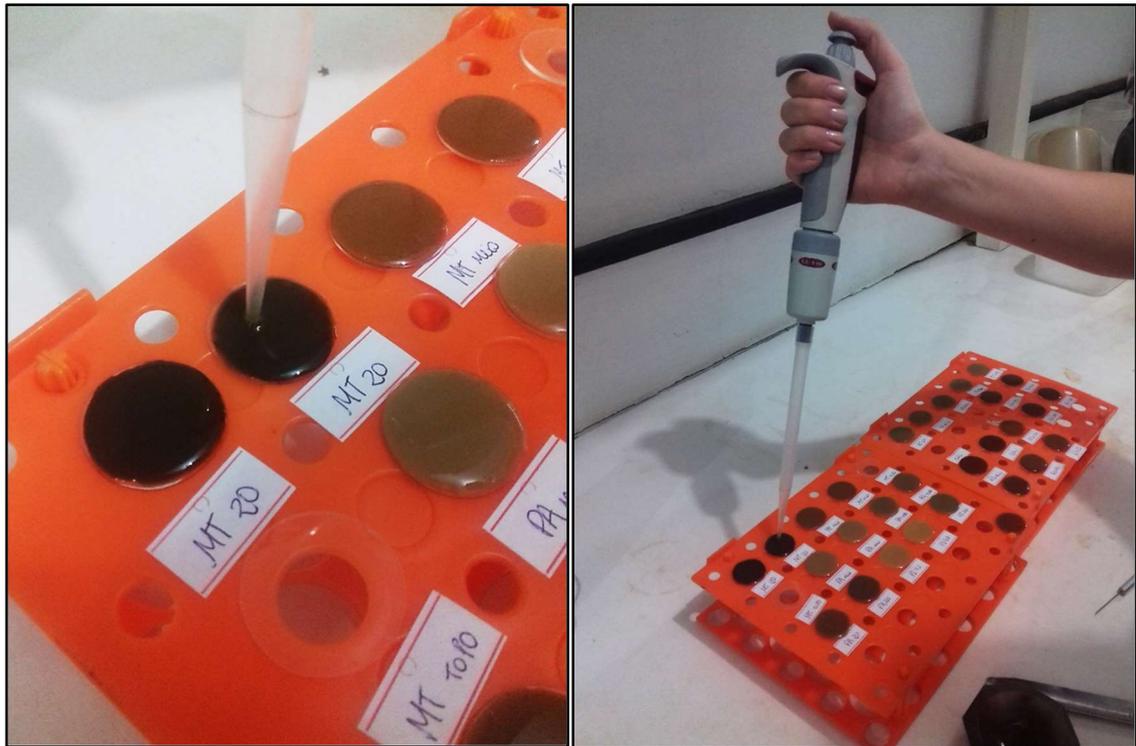


Figura 30. Confeção de lâminas orientadas da fração argila total.

#### 4.4.4. Deconvolução das reflexões dos difratogramas

As reflexões nos difratogramas de raios x foram decompostas utilizando o programa DMFIT Program, que é uma ferramenta projetada para ajuste de espectros. Para realizar os ajustes, após a remoção da linha de base, aplicou-se uma mistura entre as linhas gaussianas e lorentzianas. Assim pode-se aproximar da linha da reflexão original. Para isso padronizou-se o pico

principal da caulinita na posição 7,10 a 7,20 Å e rodou-se o programa para encontrar, se existente, a presença de outra reflexão, utilizando como variáveis os valores de amplitude, de posição e de largura meia altura. Ao final da análise, o programa informa a porcentagem de contribuição de cada reflexão existente. As equações usadas foram duas:

a) Gaussiana (G)

$$\frac{C_0^{1/2}}{H_k \pi^{1/2}} \exp \left[ \frac{-C_0(2\theta_i - 2\theta_k)}{H_k^2} \right]$$

b) Lorentziana (L)

$$\frac{C_1^{1/2}}{H_k} \frac{H_k^2}{1 + C_1(2\theta_i - 2\theta_k)^2}$$

#### 4.4.5. Identificação dos organismos térmitas

Os indivíduos térmitas coletados nos termiteiros foram armazenados em frascos com álcool 70% para posterior identificação. Para a identificação foi utilizada a Chave Ilustrada para Identificação dos Gêneros de térmitas (Insecta: Isoptera) que ocorrem no Brasil, e o Catalog of the termites of the New World (Insecta: Isoptera) (Constantino, 1998, 1999). Foram feitas fotos com os indivíduos em álcool 70 + glicero para identificação.

#### 4.4.6. Análise estatística

Para a comparação da média dos atributos foi aplicado o teste de Tukey ao nível de 5% de probabilidade. Os cálculos foram efetuados no programa Past 3. Os dados foram comparados entre os termiteiros e solo

somente dentro de cada local de coleta. Todos os dados utilizados seguiram o número de amostras coletadas que foi em triplicata.

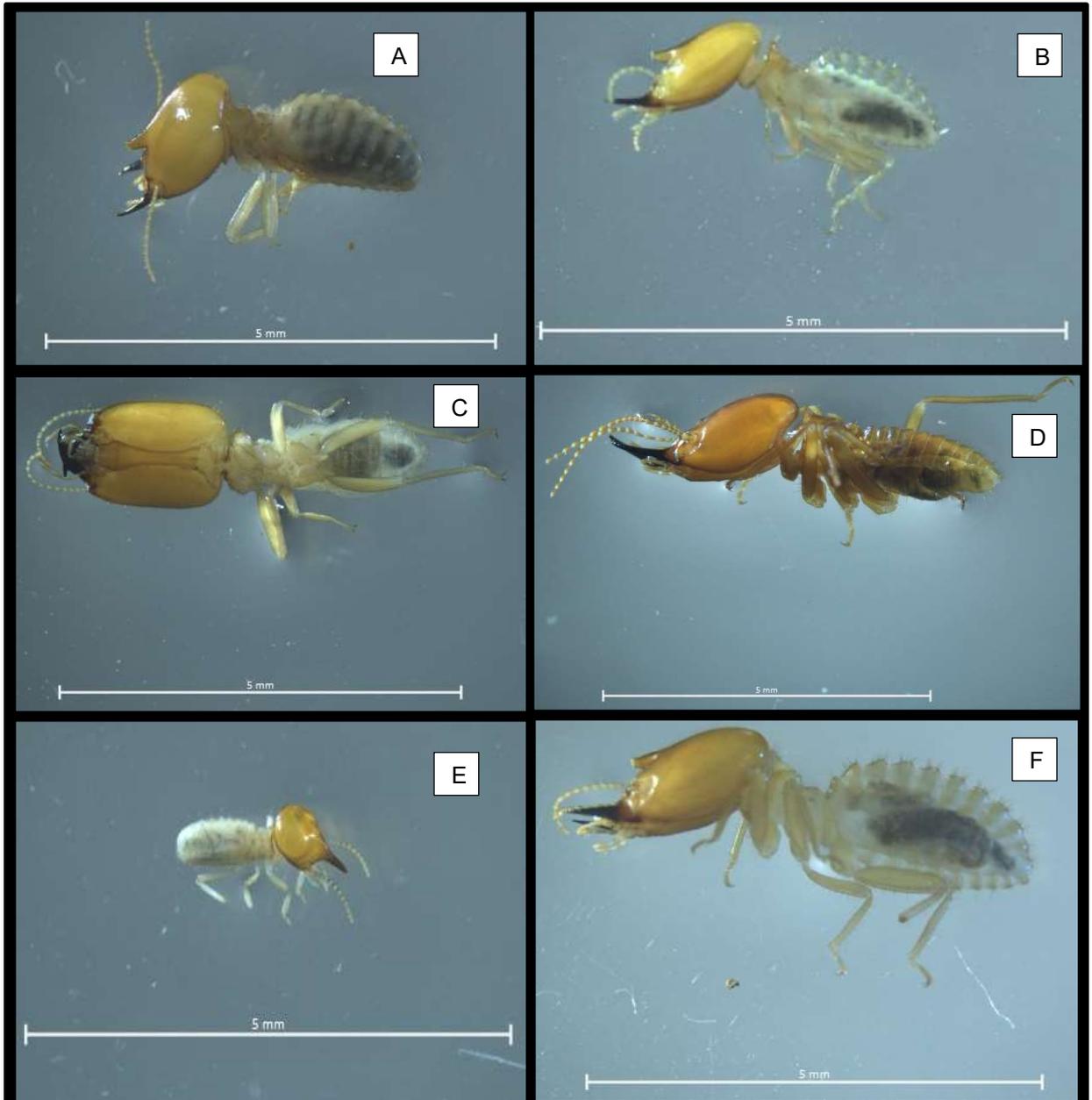
## 4.5. Resultados e discussão

### 4.5.1. Identificação dos térmitas

Os térmitas dos diferentes ambientes foram classificados até o nível de gênero e são apresentados, juntamente ao hábito alimentar, na tabela 7. Foram identificados três hábitos alimentares, com destaque para os indivíduos coletados no ambiente RS-JC, os quais se alimentam apenas de vegetais, sendo essa a possível razão da expressiva semelhança constatada entre os materiais do solo e do termiteiro nesse ambiente. Por outro lado, os organismos do ambiente PA utilizam somente solo na dieta. Nos demais ambientes, os organismos utilizam uma mistura de serrapilheira e solo em sua nutrição.

**Tabela 7.** Gêneros das espécies coletadas e hábito alimentar:

Identificação	Amostra	Gênero	Hábito alimentar
A	MG	Cornitermes	Serrapilheira e solo
B	MT	Cornitermes	Serrapilheira e solo
C	PA	Labiotermes	Solo
D	PI	Syntermes	Serrapilheira e solo
E	RS JC	Cortaritermes	Gramíneas
F	RS ES	Cornitermes	Serrapilheira e solo



**Figura 31.** Espécimes de térmitas coletados para identificação referente aos ambientes: A- MG; B- MT; C – PA; D – PI; E – RS JC; F – RS ES.

#### 4.5.2. Propriedades químicas

Os teores totais dos elementos químicos determinados por fluorescência de raios x nos materiais dos solos e termiteiros são apresentados na tabela 8. Nos termiteiros em relação aos solos, o elemento Si teve seus teores reduzidos na maioria dos ambientes, exceto nos ambientes MG e RS-JC, onde os solos foram desenvolvidos de basalto. Esses resultados eram esperados, considerando a seletividade dos térmitas na confecção dos termiteiros verificada anteriormente pela análise da fração TFSA. Nesse processo, os térmitas selecionam partículas de tamanho argila em detrimento a partículas de tamanho areia, onde o quartzo ( $\text{SiO}_2$ ), normalmente, é o silicato predominante. Por outro lado, a praticamente ausência de quartzo em solos desenvolvidos de basalto (MG) torna esse processo menos evidente.

Os elementos de menor solubilidade, como Al, Fe, Ti e P, e os cátions básicos Ca, Mg e K, apresentaram comportamento inverso ao do Si, com destaque aos resultados verificados entre o solo e o termiteiro do ambiente MT. O incremento dos primeiros nos termiteiros se justifica por serem componentes de minerais pedogênicos de tamanho argila (gibbsita, caulinita, óxidos de ferro e titânio). Já o incremento de cátions básicos confirma o processo de biociclagem de nutrientes realizado pelos organismos térmitas no ambiente pedogênico.

**Tabela 8.** Porcentagem da massa da composição mineral obtida por Fluorescência de raios x.

AMOSTRA	Si	Al	Fe	Ti	Mn	Ca	Mg	K	P
	----- % MASSA-----								
<b>MG 0-0,20</b>	18,45 ns	35,39 ns	42,20 a	1,75 a	0,24 ns	0,23 d	0,56 a	0,12 c	0,15 ns
<b>MG 0,20-0,40</b>	18,16	36,09	41,71 ab	1,7 a	0,24	0,12 c	0,49 b	0,11 c	0,13
<b>MG meio</b>	18,23	37,47	41,24 b	1,54 b	0,22	0,31 b	0,50 b	0,17 b	0,13
<b>MG topo</b>	18,21	36,45	41,14 b	1,64 b	0,20	0,41 a	0,51ab	0,20 a	0,13
<b>MT 0-0,20</b>	95,07 a	1,83 b	1,16 c	0,27 b	-	0,00 c	0,00 c	0,03 b	0,02 b
<b>MT meio</b>	83,49 b	8,48 a	6,47 a	0,71 a	-	0,07 b	0,09 b	0,18 a	0,02 b
<b>MT topo</b>	81,93 c	9,77 a	5,12 b	0,72 a	-	0,23 a	0,15 a	0,18 a	0,09 a
<b>PA 0-0,20</b>	69,13 a	24,27 b	4,06 c	0,74 b	0,06 ns	0,20 ns	0,15 b	0,84 ns	0,08 ns
<b>PA meio</b>	55,44 b	37,97 a	4,97 a	1,18 a	0,05	0,22	0,20 a	0,87	0,06
<b>PA topo</b>	56,08 b	37,10 a	5,19 b	1,01 a	0,07	0,29	0,21 a	0,89	0,09
<b>PI 0-0,20</b>	85,37 c	11,03 c	1,82 b	0,44 b	-	0,04 b	0,08 b	0,34 c	0,05 b
<b>PI 0,20-0,40</b>	60,29 b	35,07 a	4,74 a	1,22 a	-	0,04 b	0,16 a	0,71 b	0,09 a
<b>PI meio</b>	64,70 a	25,89 b	4,72 a	1,03 a	-	0,21 a	0,18 a	0,82 a	0,08 a
<b>PI topo</b>	61,91 ab	33,52 a	4,34 a	1,15 a	-	0,08 b	0,16 a	0,75 ab	0,08 a
<b>RS-JC 0-0,20</b>	64,32 c	24,61 a	8,66 b	1,81 a	0,06 ns	0,06 c	0,45 b	0,35 b	0,14 b
<b>RS-JC 0,20-0,40</b>	61,09 b	25,51 a	9,74 ab	1,93 a	0,07	0,06 c	0,48 ab	0,33 b	0,16 b
<b>RS-JC meio</b>	67,14 a	20,31 b	8,00 b	1,45 b	0,10	0,11 b	0,49 ab	0,38 ab	0,14 b
<b>RS-JC topo</b>	59,57 b	26,43 a	10,72 a	-	0,11	0,22 a	0,55 ab	0,44 a	0,21 a
<b>RS-ES 0-0,20</b>	71,93 a	19,84 b	5,48 c	1,70 a	0,06 ns	0,13 b	0,38 a	1,25 c	0,09 ns
<b>RS-ES 0,20-0,40</b>	68,25 b	21,87 b	6,30 b	1,36 b	0,00	0,11 b	0,33 b	1,32 ac	0,08
<b>RS-ES meio</b>	62,97 c	25,35 a	7,71 a	1,49 b	0,04	0,31 a	0,50 a	1,45 ab	0,09
<b>RS-ES topo</b>	62,64 c	25,33 a	7,76 a	1,29 b	0,06	0,30 a	0,49 a	1,38 b	0,10

Médias seguidas pela mesma letra não diferem entre si pelo teste de Tukey, ao nível de 5% de probabilidade.

### 4.5.3. Características mineralógicas

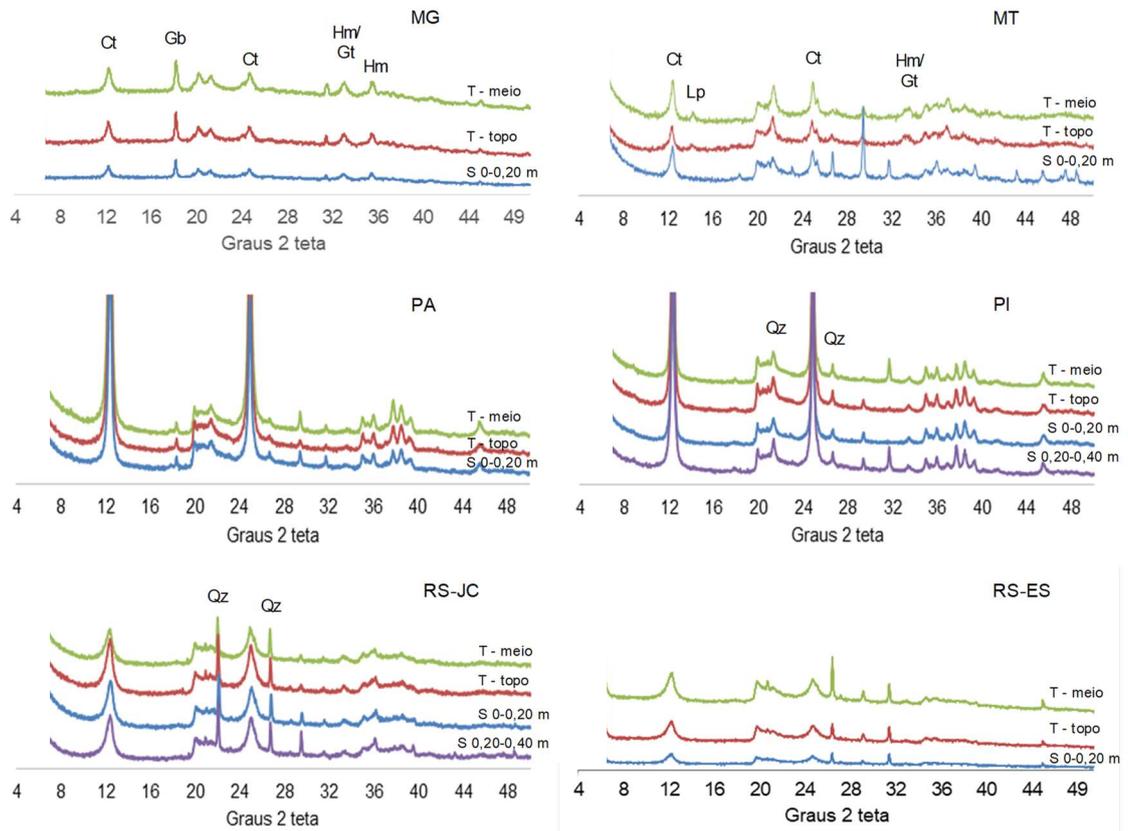
As análises por difratometria de raios x na fração argila total (Figura 32) indicaram a presença de minerais pedogênicos representativos de solos altamente intemperizados de regiões tropicais e subtropicais (Kämpf e Curi, 2003). As composições mineralógicas são formadas por diferentes proporções de caulinita, gibbsita, óxidos de ferro (hematita, goethita) e de silício (quartzo). Não foi constatada a ocorrência de argilominerais do tipo 2:1, exceto pela presença de reflexões de muito baixa intensidade em ângulos inferiores a 10 °2θ nos difratogramas dos solos dos ambientes PA e PI. Ao contrário do verificado nas análises por DRX da fração TFSA, onde foram observadas diferenças nas proporções das frações areia, silte e argila entre os materiais de solo e de

termiteiro (Capítulo 3); a fração argila total mostrou similaridade entre os materiais de solo e de termiteiro dos diferentes ambientes (Figura 32). Para obter informações mais detalhadas a respeito do efeito da atividade dos térmitas na construção dos termiteiros sobre a mineralogia dos filossilicatos, a fração argila foi fracionada em argila fina e argila grossa e novamente analisada por DRX.

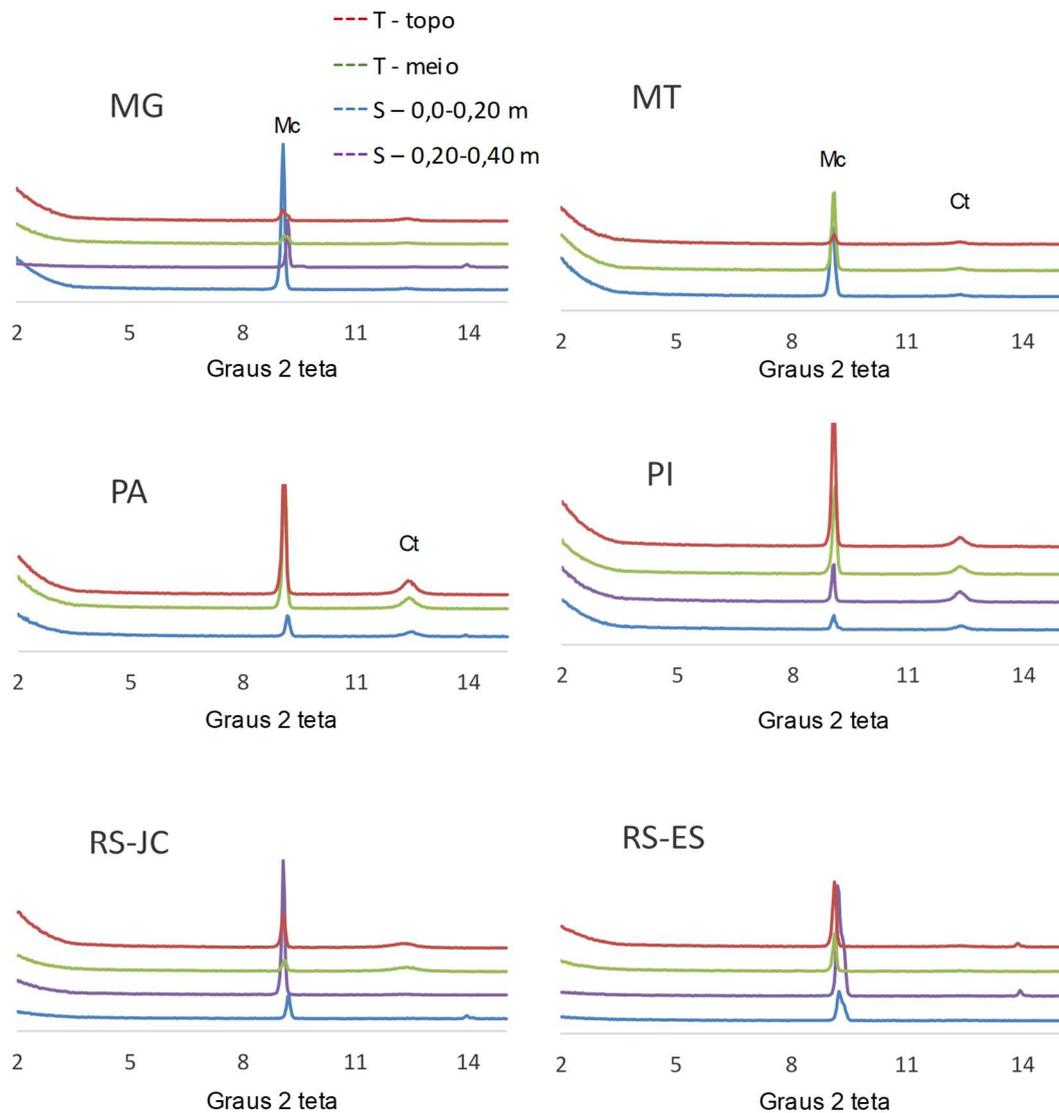
A fração argila fina ( $< 0,2 \mu\text{m}$ ) dos materiais em todos os ambientes foi composta principalmente pelo filossilicato mica, associada com menores proporções de caulinita, conforme mostraram os DRX e o cálculo da proporção entre os argilominerais 2:1 e a caulinita [razão  $2:1/(2:1+Ct)$ ] (Figura 33; Tabela 9). É comum a literatura citar a ocorrência de argilominerais 2:1, preferencialmente, na fração argila grossa (Kämpf e Curi, 2003; Azevedo et al., 2012; Korchagin et al., 2019). Entretanto, a presença de filossilicatos 2:1 também tem sido verificada na argila fina (Furquim et al., 2008; Melo, V. F.; Mattos, J. M. S. M.; Lima, V. C, 2009; Tye, A. M.; Kempa, S. J.; Poultonb, P. R., 2009). Nos ambientes PA e PI, a mica ocorreu associada com a caulinita (Figura 33). No ambiente MG, as reflexões da mica na argila fina diminuíram nos materiais dos termiteiros em relação ao solo nas duas profundidades. No MT a redução da intensidade da mica foi verificada somente no material do topo do termiteiro. Nos ambientes PA e PI, as reflexões da mica foram maiores nos materiais dos termiteiros em relação aos materiais do solo, com o mesmo comportamento sendo verificado para a caulinita. Nos ambientes RS-JC e RS-ES, as reflexões da mica nos solos e nos termiteiros variaram, sendo menores na camada mais superficial do solo e no meio do termiteiro, e maiores na camada mais profunda do solo e no topo do termiteiro.

Na fração argila grossa ( $2 \text{ a } 0,2 \mu\text{m}$ ) a caulinita foi o filossilicato predominante, conforme mostraram os DRX e a razão  $2:1/(2:1+Ct)$  (Figura 34; Tabela 9), ocorrendo em todos os materiais de solo e termiteiro. Nos ambientes MT, PA e PI, a caulinita foi praticamente o único filossilicato identificado. Nos ambientes MG e RS-ES, a caulinita ocorreu associada com traços de mica; enquanto no ambiente RS-JC, a caulinita ocorreu associada com argilominerais 2:1. Na comparação com os solos, a fração argila grossa dos termiteiros, assim como a argila total, também não sofreu alterações consideráveis. Exceções foram o material do meio do termiteiro do MT, onde se verificou um aumento da

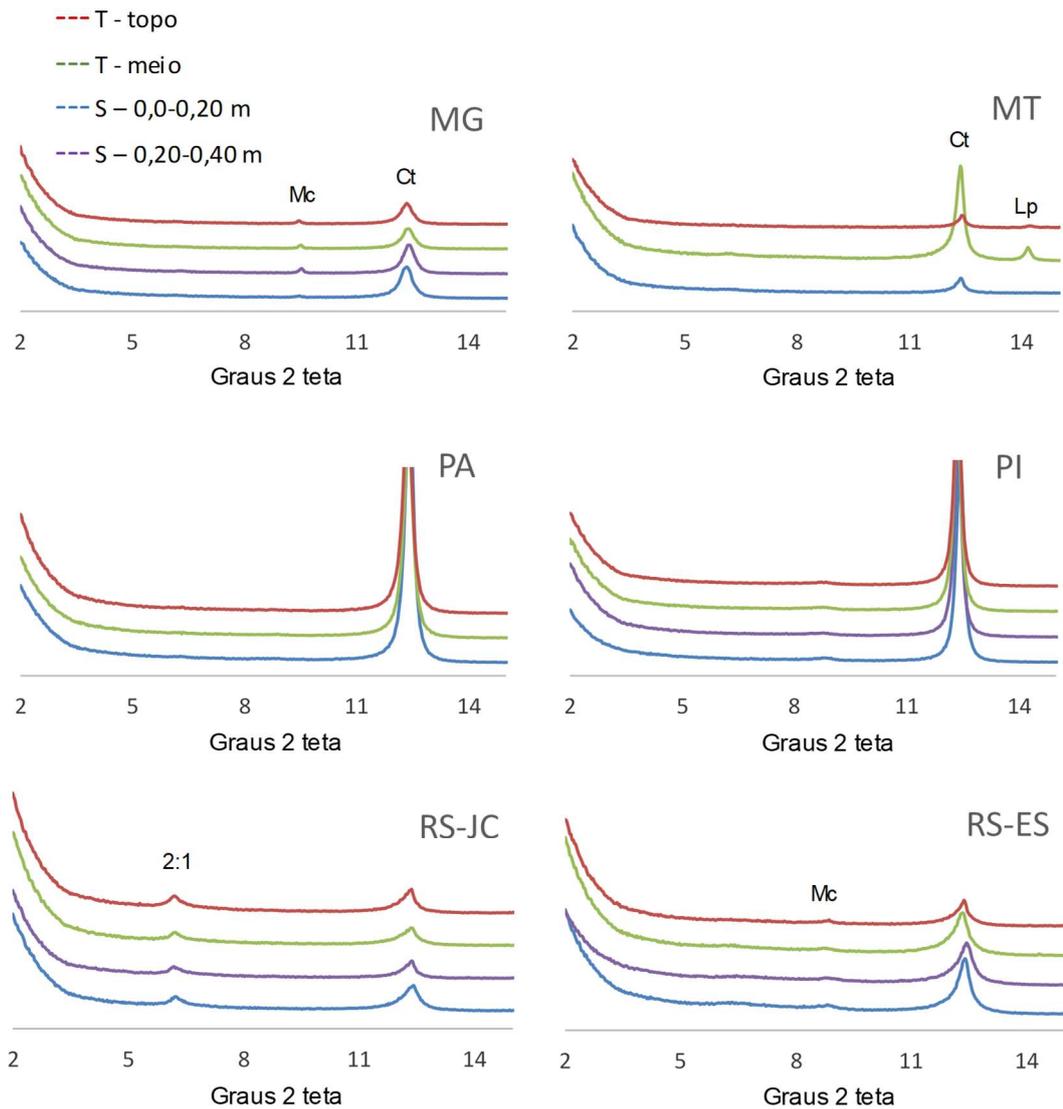
intensidade da reflexão da caulinita e o surgimento de uma reflexão do óxido de ferro lepidocrocita; e a pequena redução da intensidade da reflexão da caulinita nos materiais do topo dos termiteiros nos ambientes MG e RS-ES.



**Figura 32.** Difratogramas de raios x da fração argila total ( $< 2 \mu\text{m}$ ) dos solos e dos termiteiros nos ambientes Minas Gerais (MG), Mato grosso (MT), Pará (PA), Piauí (PI), Rio Grande do Sul: Júlio de Castilhos (RS-JC) e Eldorado do Sul (RS-ES). T: termiteiro; S: solo; Ct: caulinita; Gb: gibbsita; Qz: quartzo; Hm: hematita; Gt: goethita; Lp: lepidocrocita.



**Figura 33.** Difratogramas de raios x da fração argila fina ( $< 0,2 \mu\text{m}$ ) dos solos e dos termiteiros nos ambientes Minas Gerais (MG), Mato grosso (MT), Pará (PA), Piauí (PI), Rio Grande do Sul: Júlio de Castilhos (RS-JC) e Eldorado do Sul (RS-ES). T: termiteiro; S: solo; Mc: mica; Ct: caulinita.



**Figura 34.** Difratoigramas de raios x da fração argila grossa (2 a 0,2  $\mu\text{m}$ ) dos solos e dos termiteiros nos ambientes Minas Gerais (MG), Mato grosso (MT), Pará (PA), Piauí (PI), Rio Grande do Sul: Júlio de Castilhos (RS-JC) e Eldorado do Sul (RS-ES). T: termiteiro; S: solo; Mc: mica; Ct: caulinita; Lp: lepidocrocita; 2:1: argilominerais 2:1.

**Tabela 9.** Área das reflexões dos argilominerais 2:1 (2:1) e da caulinita (Ct) nos difratogramas de raios x das frações argila fina (AF) e argila grossa (AG).

Amostra	Área da reflexão (AF)			Área da reflexão (AG)		
	2:1	Ct	2:1/ (2:1+Ct)	2:1	Ct	2:1/ (2:1+Ct)
<b>MG 0-0,20</b>	3,19	0,07	0,98	0,04	2,68	0,01
<b>MG 0,20-0,40</b>	0,81	0,07	0,92	0,12	2,37	0,05
<b>MG meio</b>	0,31	0,05	0,86	0,07	1,58	0,04
<b>MG topo</b>	0,36	0,19	0,66	0,07	1,55	0,04
<b>MT 0-0,20</b>	1,82	0,07	0,96	0,00	0,66	0,00
<b>MT meio</b>	1,63	0,11	0,94	0,06	4,52	0,01
<b>MT topo</b>	0,21	0,14	0,60	0,00	0,48	0,00
<b>PA 0-0,20</b>	0,44	0,25	0,64	0,00	16,13	0,00
<b>PA meio</b>	2,70	0,65	0,81	0,00	13,43	0,00
<b>PA topo</b>	2,55	0,92	0,73	0,00	13,78	0,00
<b>PI 0-0,20</b>	0,03	0,18	0,16	0,16	10,60	0,01
<b>PI 0,20-0,40</b>	0,58	0,54	0,52	0,09	10,41	0,01
<b>PI meio</b>	1,74	0,42	0,81	0,09	10,77	0,01
<b>PI topo</b>	2,85	0,50	0,85	0,11	10,18	0,01
<b>RS-JC 0-0,20</b>	0,51	0,00	1,00	0,43	2,03	0,17
<b>RS-JC 0,20-0,40</b>	2,43	0,19	0,93	0,38	0,99	0,28
<b>RS-JC meio</b>	0,29	0,49	0,37	0,34	1,30	0,21
<b>RS-JC topo</b>	0,80	0,47	0,63	0,54	1,55	0,26
<b>RS-ES 0-0,20</b>	0,98	0,00	1,00	0,17	4,22	0,04
<b>RS-ES 0,20-0,40</b>	3,44	0,00	1,00	0,11	3,62	0,03
<b>RS-ES meio</b>	0,75	0,00	1,00	0,09	3,57	0,02
<b>RS-ES topo</b>	1,35	0,09	0,94	0,10	1,76	0,05

Nos difratogramas das frações argila grossa e argila total foram observadas assimetrias para ângulos menores nas reflexões hkl 001 da caulinita (Figuras 34 e 32). Essas feições têm sido relacionadas com a presença de minerais interestratificados, como caulinita-vermiculita, caulinita-esmectita ou caulinita-mica (Jouquet et al., 2007; Silva et al., 2019; Korchagin et al., 2019). Além da importância dos minerais interestratificados na dinâmica de elementos no solo, eles se destacam como importantes indicadores de processos pedoambientais (Resende et al., 2005), os quais são objetos desse estudo.

Utilizado a ferramenta de deconvolução da reflexão principal da caulinita (hkl 001 e  $d=0,715$  nm), se buscou investigar a contribuição de um possível mineral em  $d \cong 0,730$  nm, correspondente a minerais interestratificado

(Wiewiora, 1971; Herbillon, A. J.; Frankart, R.; Vielvoye, L., 1981; Bortoluzzi, E. C.; Pernes, M.; Tessier, D., 2007). Utilizando essa metodologia, Bortoluzzi, E. C.; Pernes, M.; Tessier, D., (2007) encontraram interestratificado caulinita-esmectita em um Argissolo desenvolvido de arenito no Sul do Brasil. A interestratificação caulinita-esmectita se trata de uma fase intermediária na transformação do argilomineral 2:1 em caulinita, devido a progressiva aluminização das intercamadas do mineral expansivo (Melo e Wypych, 2009).

Os dados dos parâmetros que compuseram a deconvolução da reflexão hkl 001 da caulinita são apresentados na tabela 10. Os coeficientes de determinação obtidos pelas correlações entre as curvas experimentais e as curvas geradas pela deconvolução foram iguais ou superiores a 0,97. A deconvolução mostrou que nos materiais de solo e termiteiro da maioria dos ambientes, a proporção de caulinita foi superior a proporção do argilomineral 2:1, exceção feita aos materiais de solo e do topo do termiteiro no ambiente RS-JC e do meio do termiteiro de MG. Esses resultados de maior proporção da caulinita são semelhantes aos determinados na fração argila grossa de Latossolos e Nitossolos do sul do Brasil (Testoni et al., 2017).

Já a proporção de caulinita e argilomineral 2:1 nos materiais dos termiteiros em relação aos solos mostrou comportamentos distintos entre os ambientes (Tabela 9). Esses resultados também podem ser observados nas curvas relativas à caulinita e aos argilominerais 2:1 nos gráficos da deconvolução das reflexões hkl 001 da caulinita nos difratogramas dos materiais de cada ambiente (Figuras 35 a 40). No ambiente MG, em relação aos materiais do solo, a proporção de caulinita diminuiu em todo o termiteiro, enquanto a de argilominerais 2:1 aumentou. O mesmo comportamento foi verificado nas porções de topo dos termiteiros nos ambientes PI e RS-ES, com as posições do meio apresentando materiais com proporções semelhantes a dos solos.

Comportamento inverso foi verificado nos materiais das porções do topo do termiteiro MT e do meio do termiteiro RS-JC, onde a proporção de caulinita aumentou e a de argilominerais 2:1 diminuiu em relação aos solos, com as demais porções de cada termiteiro (meio do MT e topo do RS-JC) mantendo as proporções verificadas nos solos. Já no termiteiro do ambiente PA foram

constatados os dois comportamentos, onde na porção do meio a proporção de caulinita aumentou e a de argilominerais 2:1 diminuiu em relação ao solo, com o inverso ocorrendo na posição de topo.

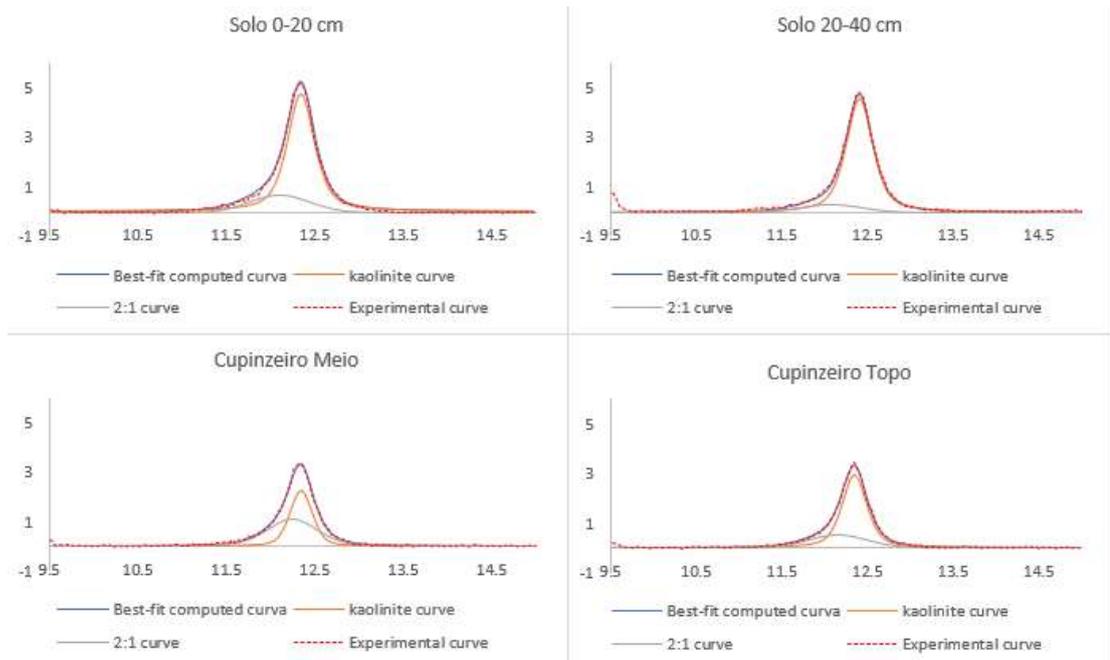
Esse comportamento irregular verificado entre os ambientes pode ter várias razões: (i) a seletividade dos organismos térmitas por minerais de menor tamanho, ou mesmo por minerais que contenham elementos nutricionais, conforme observado pela concentração de Ca, Mg, K e P nos termiteiros desse e de outros estudos (Jouquet et al., 2007; Kaschuk, 2006); (ii) a variabilidade da cristalinidade dos argilominerais (ordenamento cristalino, o tamanho e a morfologia dos cristais) entre os diferentes ambientes (Varajão et al., 2001; Corrêa et al., 2008; Melo e Wypych, 2009; Hanke et al., 2015; Paul et al., 2017), expressa no presente estudo pela largura a meia altura das reflexões (Tabela 10); (iii) o hábito alimentar dos organismos térmitas, apresentado no próximo item desse estudo, e as possíveis alterações mineralógicas durante a passagem dos minerais pelo trato digestivo dos mesmos.

Os resultados obtidos, ao mesmo tempo que mostram a importância dos organismos térmitas como fatores de formação de solos, indicam a necessidade de estudos que avancem na compreensão sobre a atuação desses organismos na pedogênese em ambientes distintos.

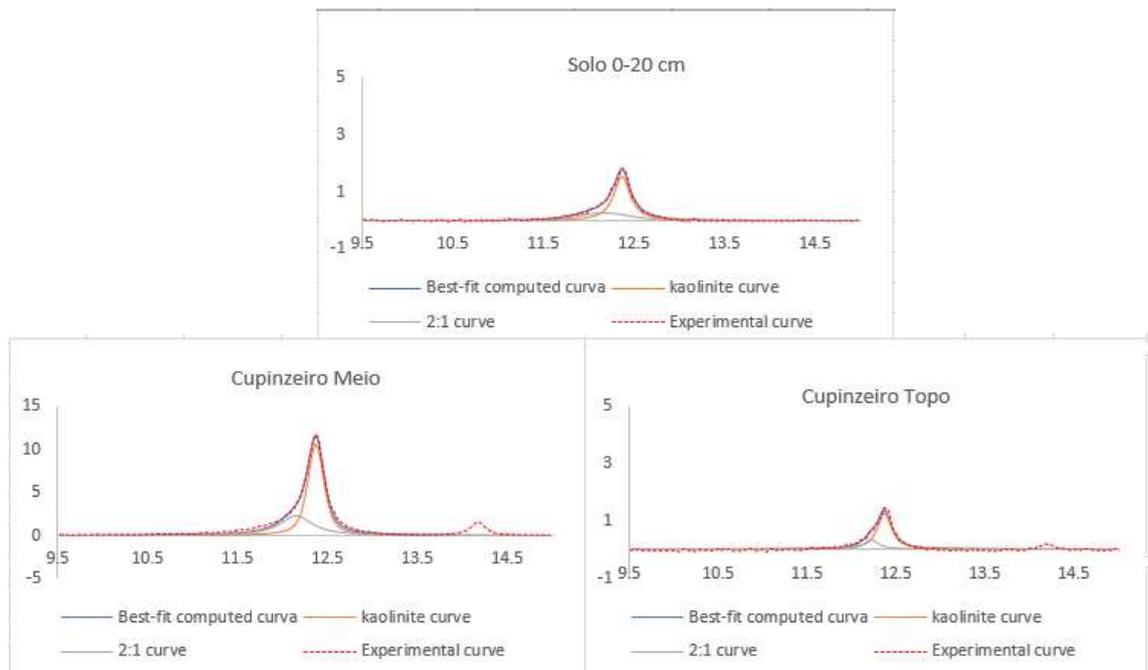
Tabela 10. Parâmetros da deconvolução da reflexão hkl 001 da caulinita.

AMOSTRA	Mineral	AMP	ANG	d (nm)	LMH	GL	%	R <sup>2</sup>
MG 0-0,20 m	Ct	4,68	12,34	0,720	0,36	0,42	80,28	0,99
	2:1	0,65	12,10	0,734	0,80	1,00	19,72	
MG 0,20-0,40 m	Ct	4,54	12,40	0,716	0,37	0,43	89,23	0,99
	2:1	0,29	12,07	0,736	0,85	1,00	10,77	
MG meio	Ct	2,26	12,35	0,720	0,30	0,70	47,88	0,99
	2:1	1,13	12,25	0,726	0,66	0,71	52,12	
MG topo	Ct	2,91	12,35	0,720	0,34	0,52	75,74	0,99
	2:1	0,50	12,15	0,731	0,79	1,00	24,26	
MT 0-0,20 m	Ct	1,55	12,37	0,719	0,22	0,06	70,18	0,99
	2:1	0,29	12,17	0,733	0,69	0,95	29,82	
MT meio	Ct	10,52	12,37	0,719	0,21	0,43	67,86	0,99
	2:1	2,20	12,15	0,731	0,44	0,00	32,14	
MT topo	Ct	1,29	12,37	0,719	0,19	0,07	78,86	0,97
	2:1	0,33	12,22	0,730	0,19	0,00	21,14	
PA 0-0,20 m	Ct	35,93	12,35	0,720	0,27	0,40	78,35	0,99
	2:1	6,08	12,20	0,731	0,54	0,90	21,65	
PA meio	Ct	32,72	12,50	0,714	0,28	0,38	87,65	0,99
	2:1	2,00	12,22	0,730	0,82	1,00	12,35	
PA topo	Ct	26,30	12,35	0,720	0,24	0,67	53,84	0,99
	2:1	9,72	12,28	0,726	0,54	0,56	46,16	
PI 0-0,20 cm	Ct	29,84	12,37	0,719	0,23	0,53	80,60	0,99
	2:1	3,31	12,30	0,725	0,59	1,00	19,40	
PI 0,20-0,40 m	Ct	28,63	12,37	0,719	0,18	0,19	71,64	0,99
	2:1	10,03	12,26	0,728	0,22	0,31	28,36	
PI meio	Ct	32,02	12,37	0,719	0,19	0,36	74,21	0,99
	2:1	7,83	12,25	0,728	0,24	0,01	25,79	
PI topo	Ct	25,39	12,37	0,719	0,18	0,49	56,31	0,99
	2:1	9,39	12,33	0,723	0,39	0,58	43,69	
RS-JC 0-0,20 m	Ct	2,00	12,37	0,719	0,31	0,62	36,41	0,99
	2:1	1,52	12,13	0,735	0,60	0,00	63,59	
RS-JC 0,20-0,40 m	Ct	2,00	12,37	0,719	0,16	0,00	48,64	0,97
	2:1	0,79	12,15	0,731	0,42	0,06	51,36	
RS-JC meio	Ct	2,00	12,37	0,719	0,28	0,00	61,84	0,98
	2:1	0,73	12,03	0,741	0,50	0,08	38,16	
RS-JC topo	Ct	2,00	12,37	0,719	0,18	0,16	32,72	0,98
	2:1	1,59	12,17	0,733	0,45	0,00	67,28	
RS-ES 0-0,20 m	Ct	6,42	12,35	0,720	0,32	0,11	68,23	0,99
	2:1	1,31	12,07	0,736	0,98	0,95	31,77	
RS-ES 0,20-0,40 m	Ct	4,54	12,37	0,719	0,36	0,17	61,12	0,99
	2:1	1,32	12,08	0,738	0,96	0,71	38,88	
RS-ES meio	Ct	4,63	12,34	0,720	0,34	0,09	60,31	0,99
	2:1	1,38	12,08	0,738	0,98	0,81	39,69	
RS-ES topo	Ct	2,78	12,37	0,719	0,21	0,44	55,40	0,99
	2:1	0,95	12,11	0,734	0,71	0,56	44,60	

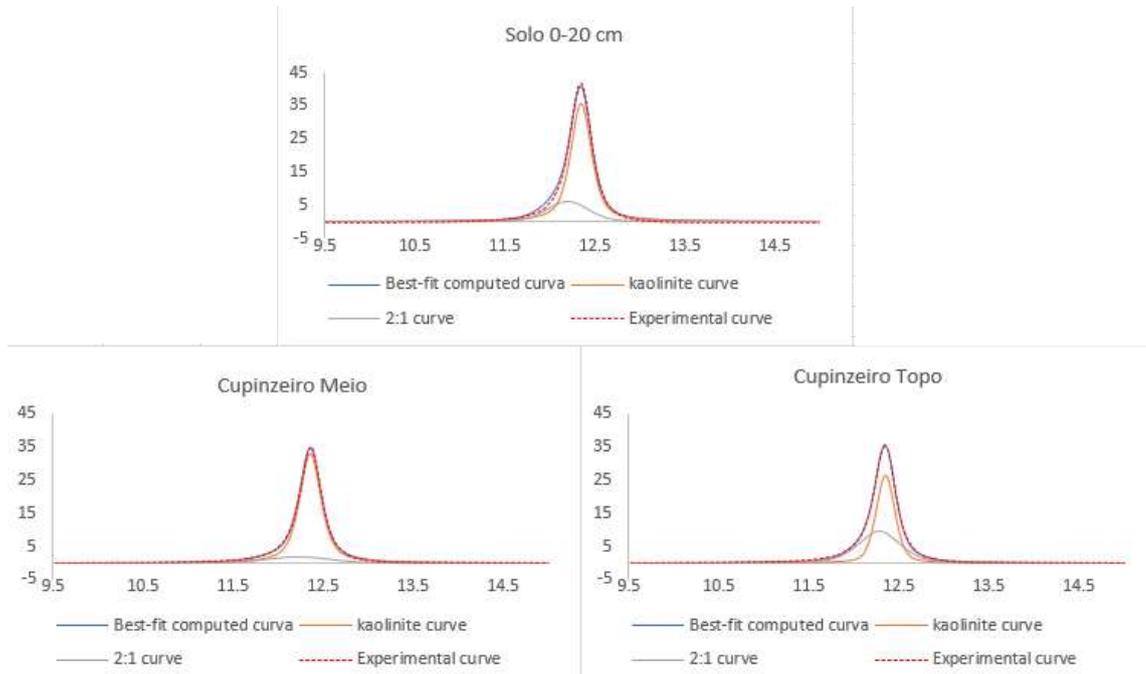
Ct= caulinita; 2:1= argilomineral 2:1; AMP= amplitude; ANG= ângulo de ocorrência em °2 $\theta$ ; d=espaçamento entre camadas em nm; LMH= largura na meia altura; %= porcentagem da contribuição das reflexões; GL= proporção das equações: 1= G - Gaussiana e 0= L – Lorentziana; R<sup>2</sup> = R quadrado das curvas.



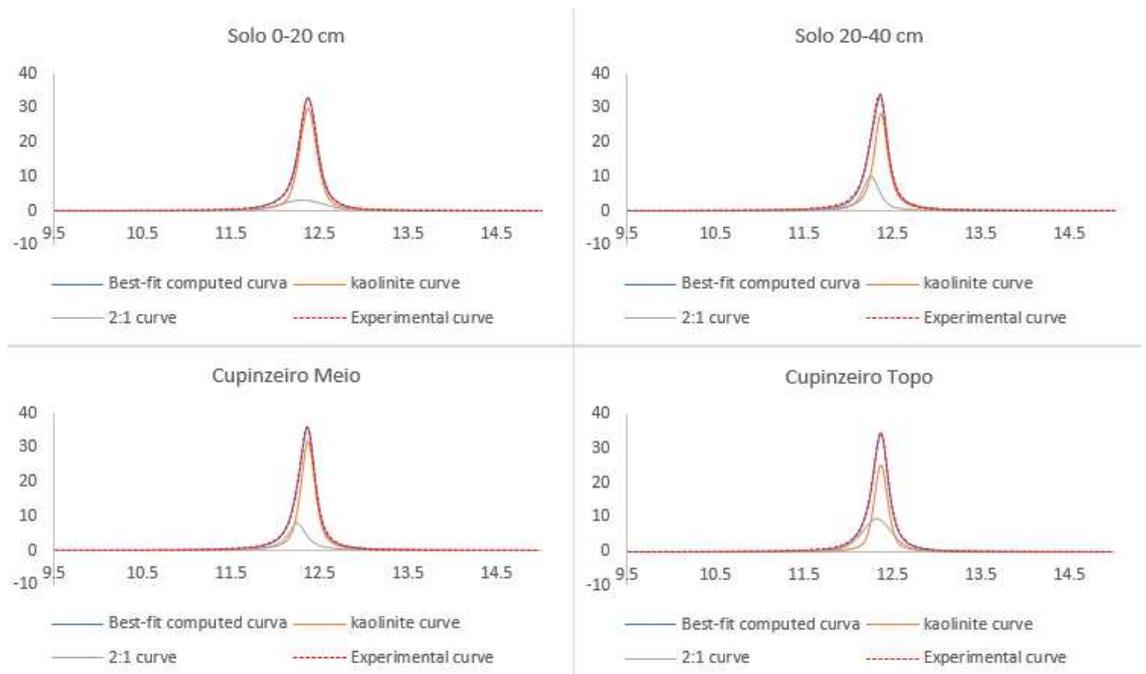
**Figura 35.** Gráficos da deconvolução das reflexões hkl 001 da caulinita nos difratogramas da fração argila grossa dos materiais solo e termiteiro do ambiente MG.



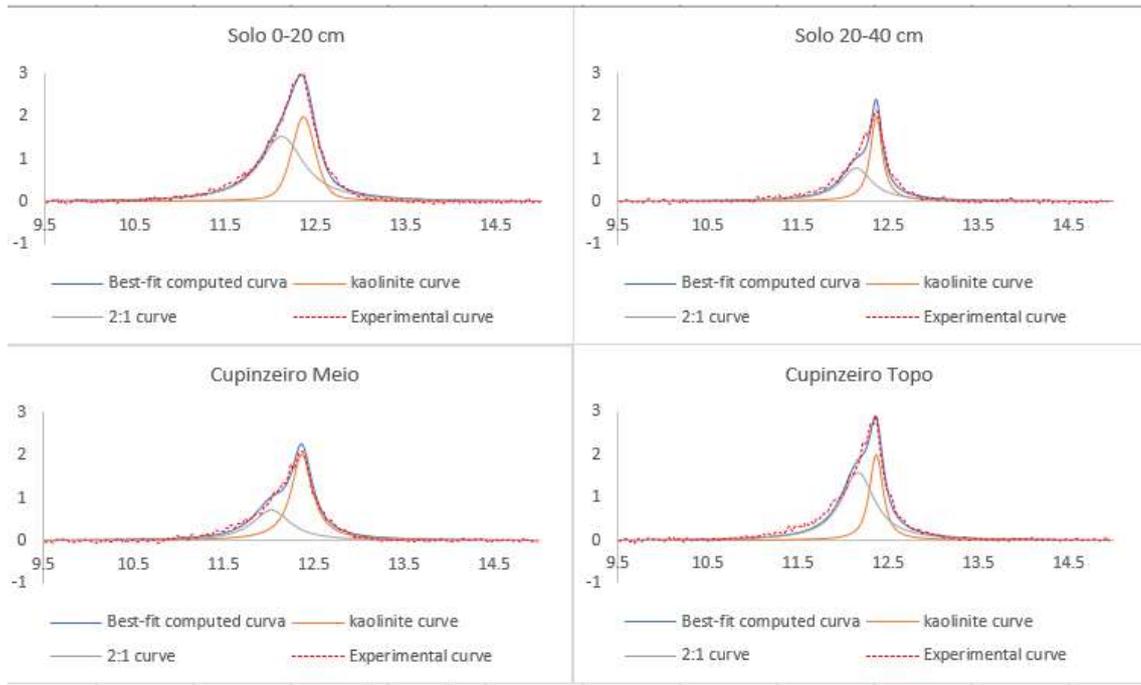
**Figura 36.** Gráficos da deconvolução das reflexões hkl 001 da caulinita nos difratogramas da fração argila grossa dos materiais solo e termiteiro do ambiente MT.



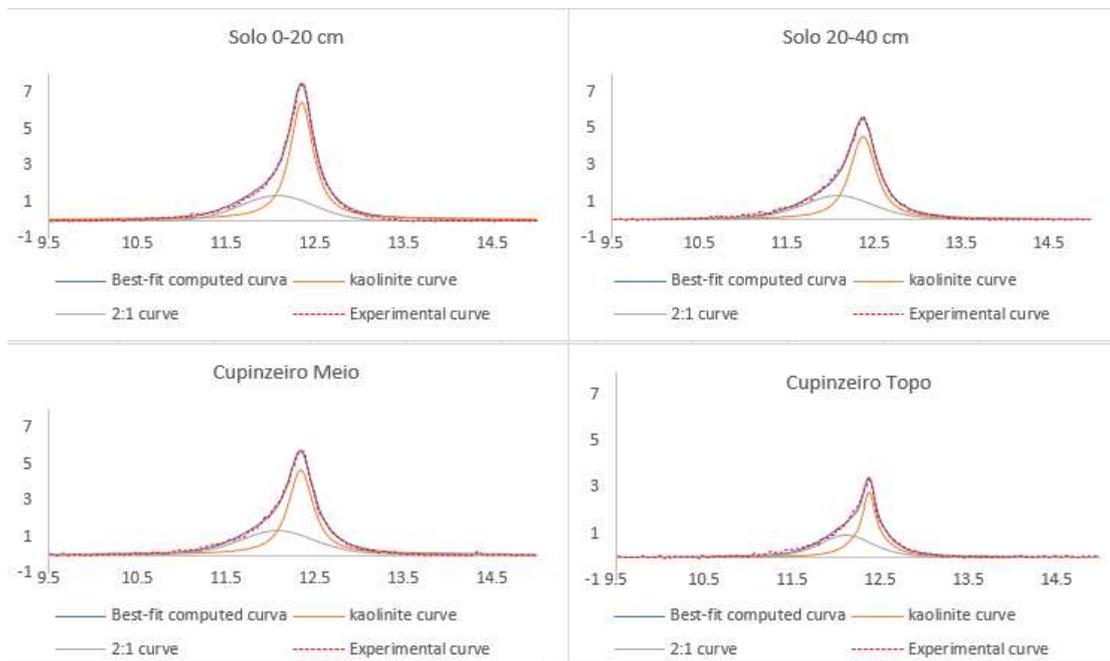
**Figura 37.** Gráficos da deconvolução das reflexões hkl 001 da caulinita nos difratogramas da fração argila grossa dos materiais solo e termiteiro do ambiente PA.



**Figura 38.** Gráficos da deconvolução das reflexões hkl 001 da caulinita nos difratogramas da fração argila grossa dos materiais solo e termiteiro do ambiente PI.



**Figura 39.** Gráficos da deconvolução das reflexões hkl 001 da caulinita nos difratogramas da fração argila grossa dos materiais solo e termiteiro do ambiente RS-JC.



**Figura 40.** Gráficos da deconvolução das reflexões hkl 001 da caulinita nos difratogramas da fração argila grossa dos materiais solo e termiteiro do ambiente RS-ES.

#### 4.6. Considerações finais

A composição química dos termiteiros se mostrou mais rica em nutrientes evidenciando a biociclagem, com o incremento de cátions básicos além do aumento dos elementos de pouca solubilidade, os quais formam os minerais pedogênicos do tamanho argila (gibbsita, caulinita, óxidos de ferro e titânio). Por outro lado, o silício componente principal do quartzo reduziu sua expressão nos termiteiro, comprovando novamente a seletividade destes organismos por partículas de menor tamanho.

A fração argila total não mostrou diferenças entre solos e termiteiros, os minerais pedogênicos predominantes foram representativos de solos altamente intemperizados de regiões tropicais e subtropicais, a exceção dos ambientes PA e PI onde foram encontrados minerais 2:1.

Na fração argila fina foram encontrados minerais 2:1 em todos os ambientes em predominância sobre o mineral caulinita. Já na fração argila grossa o contrário foi encontrado. A fração argila grossa apresentou o mesmo comportamento da argila total sem diferenças entre solos e termiteiros, porém mostraram assimetrias na reflexão principal da caulinita sugerindo a ocorrência de minerais interestratificado 2:1-Caulinita.

A análise de deconvolução permitiu identificar variações entre a proporção de minerais interestratificados 2:1 e caulinita em todos os ambientes entre solo e termiteiro, sugerindo mais estudos sobre o comportamento, mas fortalecendo a hipótese de que os térmitas são capazes de alterar o equilíbrio dinâmico dos minerais por ação do uso do solo como base alimentar e construção de seus ninhos. Podem, assim, ser consideradas como agentes aceleradores de alteração de argila em ecossistemas.

## **5. CAPÍTULO V: ALTERAÇÕES MINERALÓGICAS, QUÍMICAS E FÍSICAS RECENTES EM LATOSSOLO VERMELHO DO SUL DO BRASIL SOB USOS DISTINTOS**

### **5.1. Introdução**

O Rio Grande do Sul (RS) é o estado mais meridional do Brasil e se caracteriza por sua importante diversidade agropecuária, particularmente pela histórica produção de grãos e carne, e mais recentemente pela expansão das áreas de florestas plantadas. A conversão de solos sob vegetação nativa em diversos outros usos e manejos como lavouras, pastagens melhoradas, florestas plantadas, altera o comportamento dos solos e tem implicações em suas características químicas, físicas e mineralógicas (Silva Neto et al., 2008; Bortoluzzi et al., 2012; Inda et al., 2013; Fink et al., 2014; Mazurana et al., 2017; Bertolazi et al., 2017).

Em regiões tropicais e subtropicais do Brasil a composição mineralógica dos solos é formada predominantemente por diferentes proporções de argilominerais 1:1 (caulinita), óxidos de alumínio (gibbsita), óxidos de ferro (hematita, goethita, magnetita) e argilominerais 2:1 com hidróxi-Al entrecamadas (2:1 HE) (Kämpf e Curi, 2003; Nitzsche et al., 2008; Schaefer et al., 2008). Os minerais do grupo dos óxidos de ferro são tidos como importantes indicadores pedoambientais e de processos pedogenéticos (Kämpf e Curi, 2000; Bigham et al., 2002). Em ambientes aeróbios, os óxidos de ferro são estáveis e podem alcançar concentrações expressivas dependendo do teor de Fe no material de origem. Entretanto, mudanças nas condições pedoambientais de origem podem determinar alterações pretéritas e atuais desses minerais via transformações no

estado sólido ou processos dissolutivos por reações redutivas, complexativas ou protônicas (Schwertmann, 1991).

Da mesma forma que os óxidos de ferro, os argilominerais 2:1 também registram e informam sobre a pedogênese e seus processos (Kämpf e Curi, 2003). Uma sequência usual de alteração mineralógica pelo intemperismo pode ser descrita pela sequência mica litogênica  $\Rightarrow$  interestratificados mica-argilominerais 2:1 secundários (vermiculita ou esmectita) ou mica-caulinita  $\Rightarrow$  argilominerais 2:1 com hidróxi-Al entrecamadas (VHE e EHE)  $\Rightarrow$  interestratificados argilominerais 2:1-caulinita  $\Rightarrow$  caulinita (Barnhisel e Bertsch, 1989; Kämpf e Curi, 2003; Meunier, 2007). Essa sequência pode ser acelerada, reduzida ou mesmo invertida por mudanças no uso dos solos, conforme constatado em diversos estudos (Officer et al., 2006; Inda et al., 2010; Fink et al., 2014; Bertolazzi et al., 2017).

Segundo Kämpf, N.; Curi, N.; Marques, J. J. (2009), as alterações mineralógicas (transformações no estado sólido ou dissoluções-neoformações) variam conforme as condições pedoambientais, com destaque para a quantidade de água disponível para lixiviação, pH da solução, concentração de elementos em solução, concentração de ligantes orgânicos; e conforme a estabilidade dos minerais, determinada pelo arranjo estrutural, cristalinidade, composição química, solubilidade dos elementos e área superficial específica.

No caso da conversão de áreas de campo ou mata nativa em lavouras ou florestas plantadas, as condições pedoambientais são mudadas, por exemplo, pela aplicação de fertilizantes, corretivos de pH, revolvimento do solo e manejos de colheita. Dessa forma, surgem novas condições de umidade e temperatura do solo, do teor de matéria orgânica, de nutrientes na solução do solo e do pH, da atividade microbológica. Chaer e Tótola (2007), constataram através de indicadores químicos, físicos e microbiológicos, uma redução da qualidade do solo após 5,5 anos da substituição da mata nativa por plantios de eucalipto com diferentes métodos de manejo. Em adição, eucalipto pode extrair quantidades expressivas de nutrientes e de água do solo, além de causar acidificação, que pode gerar dissolução de alguns minerais do solo (Korchagin et al., 2019).

Por outro lado, o eucalipto pode apresentar uma capacidade de conservação de nutrientes imobilizados na sua biomassa e uma eficiente ciclagem, que resulta em maior produtividade com menores requerimentos nutricionais (Gama Rodrigues e Barros, 2002; Fernandes et al., 2013). Em relação a culturas agrícolas anuais, estudos indicam que o cultivo de espécies florestais causa melhorias na estrutura e na fertilidade do solo, principalmente da camada superficial, como consequência do maior acúmulo de matéria orgânica, devido aos ciclos serem maiores (Montagnini e Sancho, 1994; Fernandes et al., 2013).

Para Miklós (2012), as plantas por meio de suas raízes alteram os minerais do solo e também os minerais primários das rochas. O ambiente rizosférico é complexo, devido o aporte de células, mucilagens, exsudados, os quais contêm aminoácidos, enzimas, proteínas, açúcares, carboidratos complexos, álcoois, vitaminas e hormônios (Kluepfel, 1993).

O efeito rizosférico não é causado somente pela ação dos exsudatos radiculares, mas também devido aos efeitos físicos das raízes na porosidade e aeração do solo (Susarla et al., 2002). Além disso, a produção de mucilagens na rizosfera favorece a agregação e a estabilidade dos agregados (Moreira e Siqueira, 2006).

Estudos do solo rizosférico de eucalipto mostra as alterações importantes no que diz respeito às suas propriedades químicas, devido principalmente à reação de acidificação, causado pelo elevado teor de H<sup>+</sup>Al (Bortoluzzi et al. 2015). Mudanças no pH do solo são capazes de provocar reações modificando o comportamento eletroquímico dos colóides, a atividade microbiana, o crescimento vegetal, os quais podem promover um novo ciclo de transformações.

O pH na rizosfera também é modificado pela excreção de ácidos orgânicos derivados da atividade da raiz e de microorganismos. Estes ácidos orgânicos ocorrem naturalmente na rizosfera e na ação de microorganismos do solo, porém a capacidade de sua exsudação pode variar de acordo com a espécie. Segundo Guppy et al. (2005), alguns resultados têm mostrado que a concentração de ácidos orgânicos é dois terços menor em áreas cultivadas quando comparadas a áreas de florestas.

Os ácidos orgânicos ocorrem na rizosfera das plantas e microorganismos do solo, porém a capacidade de sua exsudação varia de acordo com as espécies de plantas. O ácido cítrico e o oxálico tem sido utilizados em estudos de cinética de liberação de K em solos. Esses ácidos orgânicos podem facilitar a intemperização dos minerais com a formação de complexos organo-metálicos (Castilhos e Meurer, 2001). Em Yong-Guan e Jia-Xian (1993) comparando-se os dois ácidos, verificou-se que o ácido oxálico extraiu maior quantidade de K do solo do que o ácido cítrico. Resultados semelhantes foram observados em um trabalho de Mehta, B. K.; Shiozawa, S.; Nakano, M. (1995) em quatro solos da Índia onde o ácido oxálico também extraiu maior quantidade de K do que o ácido cítrico e, até mesmo, que o ácido nítrico. Essa diferença foi atribuída as diferentes quantidades de íons  $H^+$  e a diferença na capacidade de complexação dos ligantes. Os íons  $H^+$  podem deslocar os íons  $K^+$  e desestabilizar a estrutura dos minerais quando oxigênios apicais são incorporados na lâmina tetraedral, reduzindo assim a carga da camada (Castilhos e Meurer, 2001).

Segundo Castilhos e Meurer (2001), a quantidade de K não trocável extraído pelo ácido oxálico na fração silte e na areia foram maiores do que a quantidade extraída pelo ácido nítrico, demonstrando que, possivelmente, há liberação de K estrutural, o que pode significar alterações na mineralogia dessas frações.

Nesse contexto, o papel do fator biológico é fundamental para a formação e alteração do solo, neste sentido buscar compreender a ação dos organismos plantas em adição aos distintos recentes usos do solo na alteração, principalmente da sua mineralogia, será analisada neste estudo.

## 5.2. Hipótese

A substituição do uso de um Latossolo Vermelho com campo nativo pelo uso com lavouras anuais e com florestamento de Eucalipto (*Eucalyptus* spp.) gera mudanças nas condições pedoambientais e determina alterações na mineralogia e no comportamento químico e físico do solo.

### 5.3. Objetivos

**Objetivo geral:** Avaliar o impacto nas características químicas, físicas e mineralógicas de um Latossolo Vermelho após 30 anos de uso com lavouras anuais e florestamento de Eucalipto (*Eucalyptus* spp.) em substituição ao campo nativo.

**Objetivos específicos:** (i) Caracterizar a composição química do complexo sortivo e mineralógica do solo sob campo nativo, lavoura anual e florestamento de Eucalipto; (ii) Determinar características físicas e micromorfológicas do solo sob campo nativo, lavoura anual e florestamento de Eucalipto; (iii) Definir as assinaturas espectrais e as variáveis de cor no solo sob campo nativo, lavoura anual e florestamento de Eucalipto.

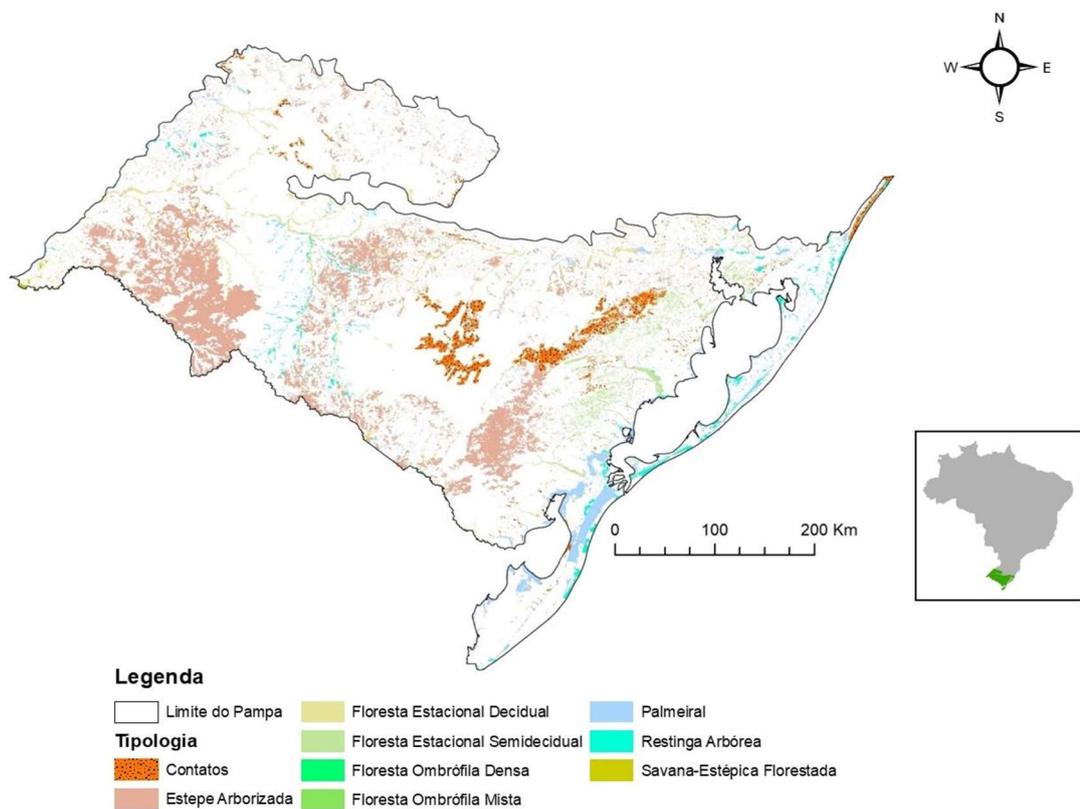
### 5.4. Metodologia

#### 5.4.1. Descrição do local de coleta e preparo de amostras

O estudo foi realizado em uma área particular no município de Júlio de Castilhos na região do Planalto do Rio Grande do Sul, Brasil (Figura 41). O clima da região é classificado como temperado úmido com chuvas bem distribuídas ao longo de todo o ano. A temperatura média anual é de 18°C e a precipitação média anual é de 1575 mm (Maluf, 2000). O município está situado em uma altitude de 450 m, em área pertencente ao bioma pampa (Figura 42), também conhecido como Campos Sulinos. Possui uma área de aproximadamente 178 mil km<sup>2</sup>, com 63% do território sendo constituído principalmente por vegetação campestre (gramíneas, herbáceas e algumas árvores arbustivas) (CSR/IBAMA, 2020).



**Figura 41.** Mapa com a localização do estudo no município de Júlio de Castilhos – RS / Brasil.

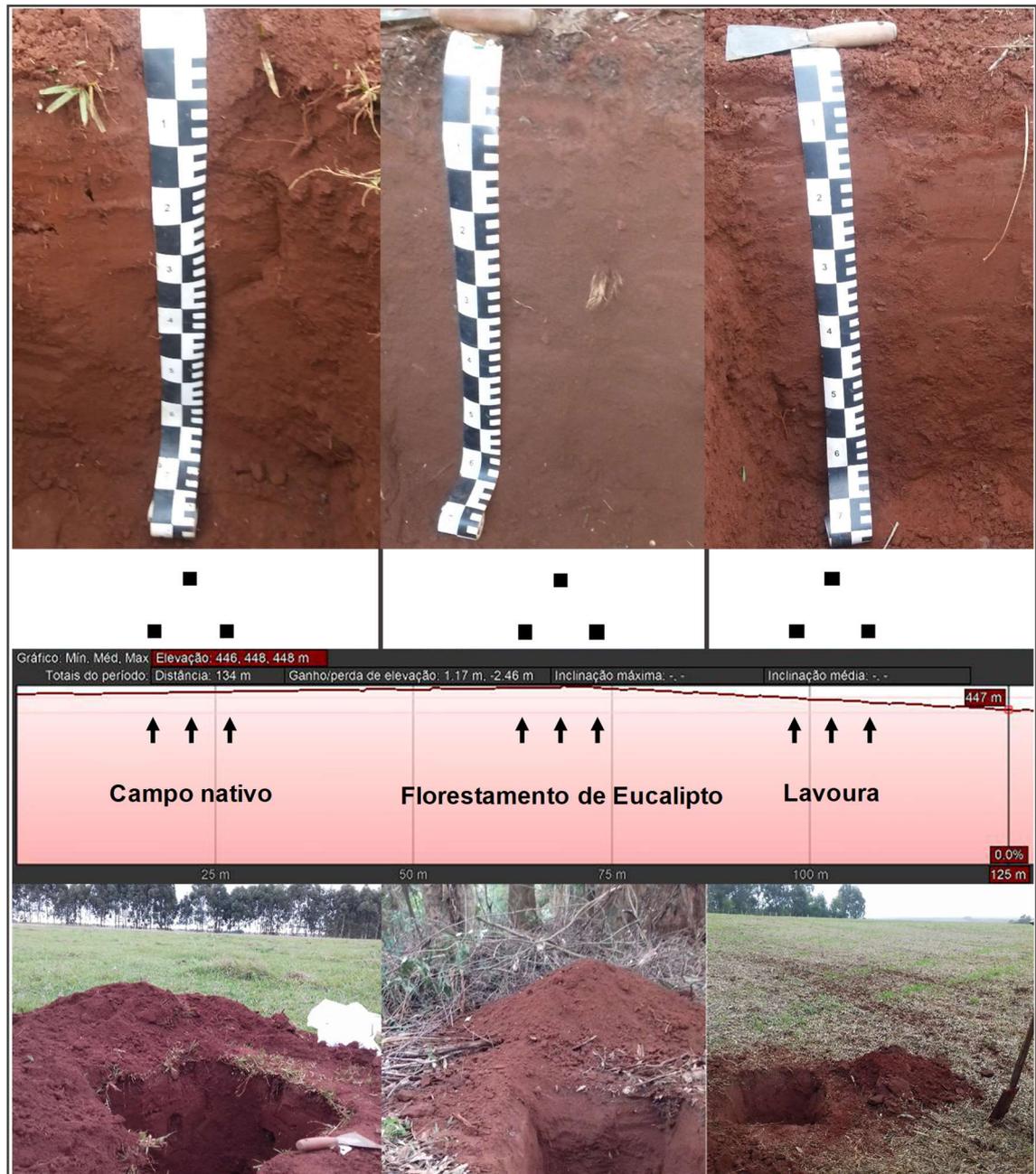


**Figura 42.** Mapa do Bioma Pampa no Rio Grande do Sul, Brasil. Fonte: Serviço Florestal Brasileiro (SFB), <http://snif.florestal.gov.br/pt-br/os-biomas-e-suas-florestas>

A geologia é formada por derrames basálticos da Serra Geral sobre o remanescente da Formação Botucatu. Segundo Kaul (1990), a Formação Botucatu é constituída por arenitos de granulação fina a média, de coloração vermelha, rósea ou amarelo-clara, bem selecionados maduros, apenas localmente feldspáticos, resultante de um ambiente de deposição por ação eólica (desértico), com idade referente ao Jurássico. Já a Serra Geral é constituída por espessos e extensos derrames basálticos originados em tempos juracretácicos.

O solo no local do experimento foi classificado como Latossolo Vermelho Distrófico segundo o Sistema Brasileiro de Classificação de Solos (Santos et al., 2013). Foram selecionadas três áreas contiguas sob distintos usos e manejos do solo: Campo nativo (CN); Lavoura com cultivos anuais de soja no verão em sistema de plantio direto e pastagem de aveia-azevém no inverno (LAV); e Florestamento de eucalipto (EUC), cultivo este que não sofre cortes para fins comerciais e nem adubações e correções com calagem. As áreas com LAV e EUC foram implantadas à trinta (30) anos. Em cada tratamento (uso do solo) foram abertas três trincheiras com o solo sendo amostrado em triplicata nas camadas 0-0,05, 0,05-0,10, 0,10-0,20, 0,20-0,40 e 0,40-0,60 m de profundidade. As amostras deformadas foram secas ao ar, destorroadas e passadas em peneiras com malha de 2 mm para obtenção da fração terra fina seca ao ar (TFSA). Também foram coletadas amostras com estrutura preservada em saboneteiras nas camadas 0-0,10 e 0,20-0,40 m para análise micromorfológica.

A coleta da fração argila foi realizada por sedimentação, segundo a Lei de Stokes. As amostras coletadas foram floculadas com solução de HCl 1 mol L<sup>-1</sup>, com posterior lavagem com solução de etanol:água (1:1) e secagem em estufa a 50 °C.



**Figura 43.** Perfil de elevação da área do experimento com a localização das trincheiras (■) em cada tratamento.

#### 5.4.2. Análise granulométrica

A análise granulométrica foi realizada pelo método da pipeta (Donagema et al., 2011) após dispersão química das partículas com hidróxido de sódio  $1 \text{ mol L}^{-1}$  e mecânica por agitação de 12 horas em agitador mecânico.

### 5.4.3. Área superficial específica (ASE)

A área superficial específica (ASE) da fração TFSA foi estimada pelo método da adsorção de água (Quirk, 1955). Amostras com aproximadamente 1,0 g foram colocadas em recipientes pesa filtros de vidro previamente pesados, submetidas a uma atmosfera com UR=0 % por 12 dias em dessecadores contendo pentóxido de fósforo, sendo então novamente pesadas. As amostras foram então submetidas a uma atmosfera com UR=20 % por doze dias em dessecadores contendo uma solução saturada de acetato potássico e novamente pesadas. Considerando que uma molécula de água cobre uma área de 0,108 nm<sup>2</sup>, a ASE foi calculada conforme a seguinte equação:

$$\text{ASE (m}^2 \text{ g}^{-1}) = (6,02214 \times 10^{23} \text{ moléculas de H}_2\text{O} / 18 \text{ g de H}_2\text{O}) \times (0,108 \times 10^{-18} \text{ m}^2/\text{molécula de H}_2\text{O}) \times (\text{g H}_2\text{O/g de amostra})$$

### 5.4.4. Suscetibilidade magnética

Para a estimativa da concentração de óxidos de ferro magnéticos (magnetita e maghemita) presentes nas frações TFSA ( $[\text{óx.Femag}] = (\chi_{\text{FD}}/0,12)/(800 \times 10^{-6} \text{ m}^3 \text{ kg}^{-1})$ ), a susceptibilidade magnética foi determinada em magnetômetro Bartington com sensor de frequência dual (Sistema MS2). A susceptibilidade magnética de frequência dependente ( $\chi_{\text{FD}} = \chi_{\text{LF}} - \chi_{\text{HF}}$ ) através da diferença entre a susceptibilidade magnética específica em baixa ( $\chi_{\text{LF}}$ ) e alta ( $\chi_{\text{HF}}$ ) frequência segundo Torrent et al. (2006).

### 5.4.5. Carbono orgânico total (COT)

A determinação do carbono orgânico total (COT) do solo foi realizada em amostras de aproximadamente 1,0 g de TFSA moída em gral de ágata por combustão seca em analisador de carbono SHIMADZU VCSH.

#### **5.4.6. Complexo sortivo**

As análises químicas foram realizadas na fração TFSA, segundo métodos constantes em Donagema et al. (2011), para os seguintes componentes: pH em H<sub>2</sub>O e KCl, Ca, Mg, K, Na, Al, H+Al e acidez potencial. A partir destes dados foram calculados: capacidade de troca de cátions (CTCpH7), soma de bases (S) e saturação por alumínio (Al%).

#### **5.4.7. Dissoluções seletivas dos óxidos de ferro**

A quantificação dos teores de Fe extraídos seletivamente nos solos foi realizada na fração TFSA. O teor de Fe relativo aos óxidos de ferro pedogênicos (Fed) foi extraído com ditionito-citrato-bicarbonato de sódio a 80° C em duas extrações sucessivas (Mehra e Jackson, 1960). O teor de Fe referente aos óxidos de ferro de baixa cristalinidade (Feo) foi extraído por oxalato de amônio 0,2 mol L<sup>-1</sup> a pH 3, no escuro (Schwertmann, 1964). Na posse destes dados foram calculados a razão Feo/Fed, indicadora do grau de cristalinidade dos óxidos de ferro pedogênicos.

#### **5.4.8. Fluorescência de raios x (FRX)**

A quantificação multi-elementar da fração TFSA foi realizada por análises de Fluorescência de Raios x (FRX) em espectrômetro modelo Shimadzu EDX-720. Os elementos que foram analisados compreendem deste o sódio (Na) até o elemento urânio (U) da tabela periódica de elementos químicos. Antes da análise, amostras com 0,5 g foram preparadas na forma de pastilhas utilizando-se uma prensa com pressão de 5 Mg cm<sup>-2</sup> durante 2 minutos.

#### **5.4.9. Concentração da fração óxidos de ferro**

A concentração dos óxidos de ferro na fração argila foi obtida pelo tratamento da fração argila com NaOH 5 mol L<sup>-1</sup> segundo Kämpf e Schwertmann (1982).

#### **5.4.10. Difractometria de raios x (DRX)**

A identificação e caracterização dos minerais que constituem as frações argila e óxidos de ferro concentrada foram realizadas por análises de DRX em equipamento Bruker-D2Phaser. As referidas frações foram analisadas em lâminas confeccionadas com material em pó (sem orientação).

#### **5.4.11. Espectroscopia de refletância difusa**

A razão hematita/(hematita+goethita) (Hm/(Hm+Gt)) foi estimada por refletância difusa, por meio das intensidades relativas das bandas compreendidas entre  $\pm 410$  e  $445$  nm (IGt) e entre  $\pm 530$  e  $580$  nm (IHm) do espectro correspondente a segunda derivada da função Kubelka-Munk. Em amostras selecionadas, os espectros da fração TFSA moída foram registrados em intervalos de  $0,5$  nm no intervalo de comprimento de onda de  $380$  a  $800$  nm em um espectrofotômetro UV-Visible CARY Cary 5000, com uma esfera integradora acoplada de  $110$  mm de diâmetro. Um máximo de refletância (100 % T) obtido com PTFE Polytetrafluoroethylen (Teflón) e um mínimo de refletância (0 % T) com a colocação de uma tarja preta na entrada do feixe de luz (Barrón, V.; Mello, J.; Torrent, J., 2000).

O espectrofotômetro MIR equipado com um hemisfério de reflexão de Pike EasiDi foi usado para varrer a faixa de onda de  $4000$  a  $600$  cm<sup>-1</sup> ( $2500$  a  $16.666$  nm) a intervalos de  $8$  a  $1,64$  vezes por segundo, Tensor 27 MIR (Bruker Optics). O Brometo de potássio (KBr) foi usado como referência espectral para a faixa MIR.

#### **5.4.12. Confeção de lâminas delgadas**

Amostras com estrutura preservada de solo foram impregnadas com a resina Araldite GY 279 e endurecedor Aradur HY 951 no Laboratório de Geociências da UFRGS. Após o endurecimento procedeu-se o corte do material, polimento e colagem na lâmina de vidro, onde foi desbastado até atingir a espessura ideal para observação em microscópio. A descrição e interpretação das lâminas foi realizada segundo Stoops (2003).

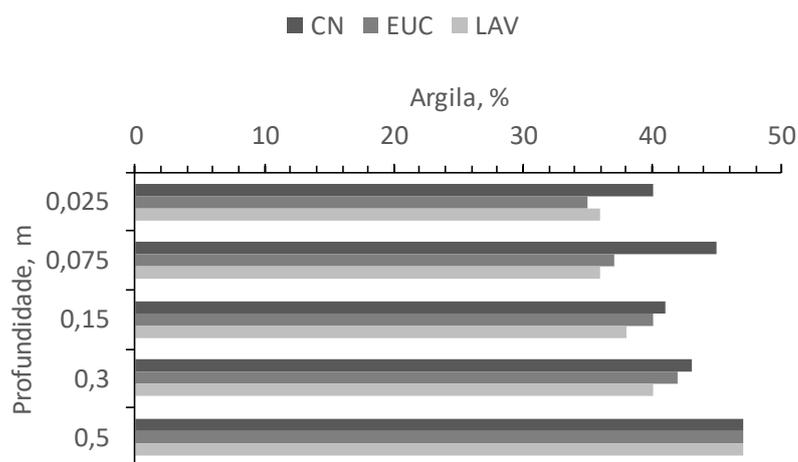
As lâminas delgadas foram analisadas e descritas em microscópio petrográfico e neste foram tiradas micrografias em dois formatos: PPL (Luz polarizada planar) e XPL (Luz polarizada cruzada). Em PPL a luz transmitida após passar pelo polarizador vibra apenas em uma direção ou plano. A luz é decomposta em dois raios, sendo que o primeiro feixe de luz fica a 90° ortogonal ao incidente. Já em XPL é inserido um analisador (polaróide) no caminho ótico do microscópio, assim ao girar a amostra, um grão birrefringente muda de cor, mas entra se extingue a cada 90°. A depender do ângulo com a clivagem, pode ser paralela ou direta, inclina ou oblíqua, cruzada ou simétrica, ou nenhuma (quartzo). A matéria orgânica, poros, cristais isométricos e argila não-orientada (grãos atravessados ortogonalmente ao seu eixo ótico) estarão sempre em extinção.

#### **5.4.13. Análise dos dados**

Correlações entre os parâmetros avaliados foram determinadas utilizando o software SigmaPlot 14.0. Além disto, foram comparadas médias pelo teste de Tukey ao nível de 5% de significância ( $p < 0,05$ ) com o programa Past 3. As análises foram compostas pelos dados amostrais da coletada feita em triplicata em cada tratamento.

## 5.5. Resultados e discussão

A descrição dos resultados e a discussão sobre os mesmos considerou o uso do solo campo nativo (CN) como condição de referência. O solo do experimento se enquadra na classe textural argila, por possuir teor de argila entre 40 e 60 % e teor de areia inferior a 45 %. Os altos teores de argila derivam da litologia basáltica, enquanto a ocorrência da fração areia representa a influência do arenito Botucatu nos solos da área. Embora a proximidade dos pontos de coleta nos três tratamentos e a topografia praticamente plana da área do experimento, na camada de 0-0,10 m de profundidade, os solos sob EUC e LAV apresentaram teores médios de argila menores em relação ao CN. A partir dessa profundidade os teores foram semelhantes nos três tratamentos (Figura 44).

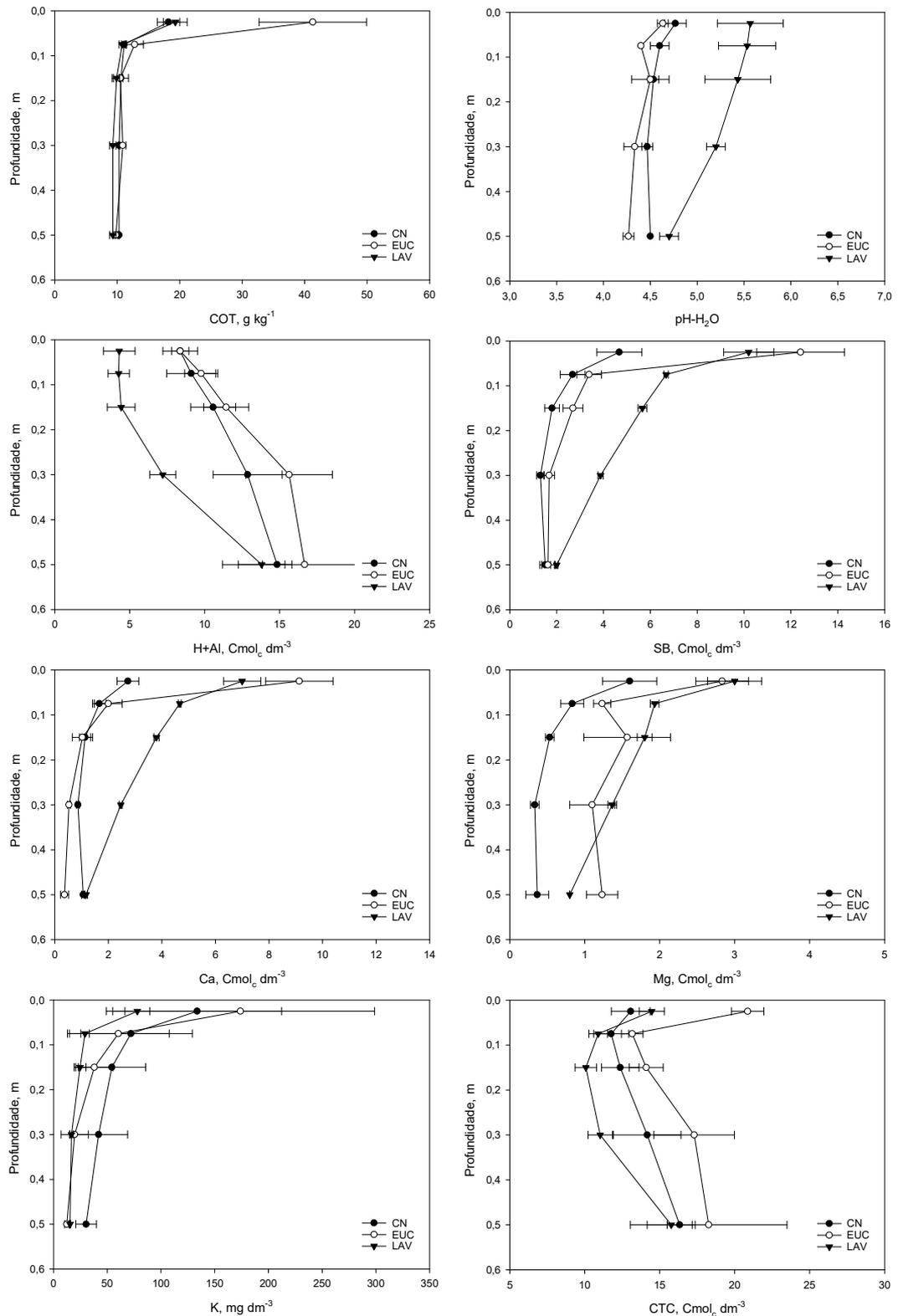


**Figura 44.** Teores médios de argila ao longo das camadas do solo sob os usos campo nativo (CN), florestamento com Eucalipto (EUC) e lavoura (LAV). Média de duas repetições.

O uso EUC incrementou significativamente o teor de carbono orgânico total (COT) na camada 0-0,05 m em relação ao CN (Figura 45), possivelmente devido a espessa serapilheira produzida na superfície do solo sob esse uso. O uso LAV manteve os mesmos teores de COT que o CN, sugerindo um

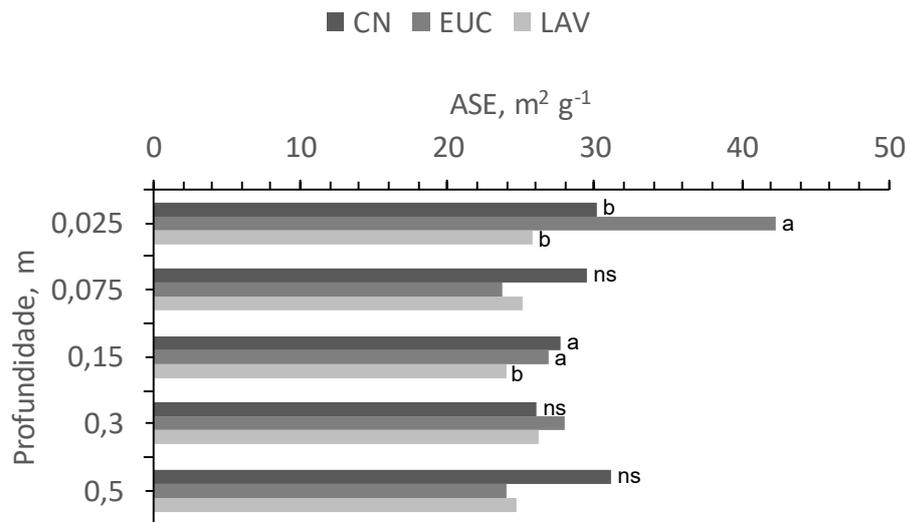
estabelecimento adequado do sistema de plantio direto quanto a manutenção da matéria orgânica do solo.

A análise química do complexo sortivo do solo, mostrou que o uso LAV aumentou o pH do solo e diminuiu os teores de H+Al como consequência das correções da acidez do solo com calagem durante os anos de cultivo. Por outro lado, o uso EUC não diferiu ou apresentou reações mais ácidas em relação ao CN (Figura 45). Os usos EUC, na camada 0-0,20 m, e LAV, na camada 0-0,40 m, aumentaram a soma de bases, principalmente devido aos cátions Ca e Mg, enquanto os valores de K não foram alterados. Esses resultados são efeito da adubação e calagem realizada na LAV e da biociclagem pelas plantas de eucaliptos, pois este sistema não recebeu nenhuma correção e nem adubação durante os 30 anos de cultivo. Quanto a capacidade de troca de cátions, o resultado mais expressivo foi seu aumento na camada 0-0,05 m do solo sob uso EUC, determinado pelo incremento de matéria orgânica em superfície nesse tratamento. Esses resultados indicam uma manutenção da qualidade química desse solo mesmo após trinta anos do reflorestamento com Eucalipto e de cultivo de soja sob plantio direto.



**Figura 45.** Carbono orgânico total (COT) e atributos do complexo sortivo do solo sob os usos campo nativo (CN), florestamento de Eucalipto e lavoura (LAV). As barras são referentes aos desvios padrão.

Os valores da área superficial específica (ASE) do solo também foram semelhantes entre os tratamentos, exceto na camada de 0-0,05 m do EUC, onde a ASE aumentou em relação ao CN (Figura 46). Esse resultado também está relacionado ao incremento de COT verificado na camada 0-0,05 m do EUC, e corrobora com o efeito positivo da matéria orgânica sobre os valores de ASE do solo obtidos por adsorção de água (Tomazi et al., 2012).



**Figura 46.** Área superficial específica (ASE) dos usos campo nativo (CN), florestamento de Eucalipto e lavoura (LAV) nas profundidades de 0 a 0,6 m.

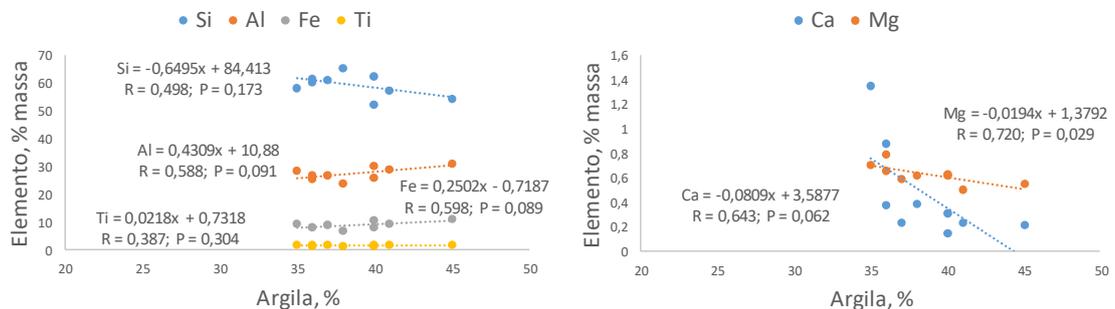
Os valores da porcentagem de massa dos elementos químicos determinados por fluorescência de raios x nas camadas de 0-0,20 m do solo sob os diferentes usos são apresentados na tabela 11. Em geral, as diferenças entre camadas de um mesmo tratamento não foram significativas. Os elementos Si, de baixa a média mobilidade relativa, e Ca e Mg, considerados de alta mobilidade, apresentaram porcentagens de massa maiores no solo sob EUC e LAV. Por outro lado, a massa dos elementos de muito baixa mobilidade, como Al, Fe e Ti, foi menor no solo sob esses usos em relação ao CN. Esses resultados estão relacionados em parte com os maiores teores de argila verificados nas camadas mais superficiais do solo sob CN. A fração argila reúne minerais com maior grau de intemperização, ou seja, com menores concentrações de

elementos mais solúveis como o Si e os cátions básicos, e maiores teores de elementos de muito baixa mobilidade. Nesse estudo, essa relação mostrou ser significativa para os elementos Al, Fe, Ca e Mg, bem como mostrou uma tendência em relação ao elemento Si (Figura 47).

**Tabela 11.** Porcentagem da massa da composição mineral obtida por Fluorescência de raios x.

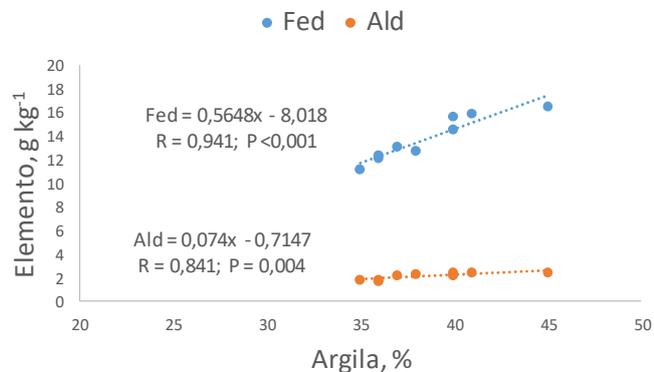
Uso do solo	Prof. cm	Mg	Al	Si	K	Ca	Ti	Mn	Fe
		% Massa							
Campo	0-5	0.63 a	30.08 ab	52.16 b	0.81 <sup>ns</sup>	0.31 <sup>ns</sup>	1.74 <sup>ns</sup>	0.09 <sup>ns</sup>	10.67 a
	5-10	0.55 b	31.01 a	54.57 b	0.78	0.21	1.75	0.07	11.00 a
	10-20	0.50 b	29.15 b	57.55 a	0.76	0.23	1.71	0.07	9.51 b
Eucalipto	0-5	0.71 a	28.60 <sup>ns</sup>	58.30 <sup>ns</sup>	0.81 a	1.35 a	1.58 <sup>ns</sup>	0.19 a	9.42 <sup>ns</sup>
	5-10	0.59 b	26.75	61.25	0.74 ab	0.23 b	1.69	0.07 b	8.89
	10-20	0.62 ab	26.12	62.45	0.66 b	0.15 b	1.44	0.06 b	8.05
Lavoura	0-5	0.79 <sup>ns</sup>	25.65 <sup>ns</sup>	60.21 <sup>ns</sup>	0.68 <sup>ns</sup>	0.88 <sup>ns</sup>	1.50 a	0.10 <sup>ns</sup>	8.04 <sup>ns</sup>
	5-10	0.66	26.68	61.72	0.67	0.38	1.56 a	0.08	8.00
	10-20	0.62	23.82	65.50	0.63	0.39	1.20 b	0.06	7.01

Médias seguidas pela mesma letra não diferem entre si pelo teste de Tukey, ao nível de 5% de probabilidade. <sup>ns</sup> = não há diferenças significativas entre as profundidades do tratamento.



**Figura 47.** Relação entre a porcentagem de massa dos elementos químicos determinados por fluorescência de raios x e o teor de argila do solo sob os diferentes usos.

Assim como as porcentagens de massa dos elementos Fe e Al, os teores de Fe e Al relativos à estrutura dos óxidos de ferro pedogênicos (Fed e Ald) também foram menores na camada de 0-0,20 m do solo sob os usos EUC e LAV em relação ao CN (Tabela 12). A concentração desses elementos na estrutura dos óxidos de ferro mostrou expressiva relação com o teor de argila nas camadas de 0-0,20 m do solo sob os diferentes usos (Figura 48). Os baixos valores da razão Feo/Fed indicaram uma predominância de óxidos de ferro cristalinos (hematita, goethita e maghemita) associados a menores proporções de óxidos de ferro de baixa cristalinidade como a ferrihidrita (Kämpf e Curi, 2000; Curi e Kämpf, 2012). Em adição, os valores da razão Ald/(Ald+Fed) indicam que a substituição do Fe pelo Al na estrutura dos óxidos de ferro foi semelhante em todos os tratamentos, sugerindo que os cristais foram formados sob as mesmas condições pedoambientais e não foram afetados pelas mudanças no uso do solo.



**Figura 48.** Relação entre os teores de ferro e alumínio na estrutura dos óxidos de ferro pedogênicos e os teores de argila do solo sob os diferentes usos.

**Tabela 12.** Teores de ferro e alumínio extraídos com ditionito citrato bicarbonato de sódio e oxalato de amônio.

prof. (m)	Fe <sub>d</sub>			Fe <sub>o</sub>			Fe <sub>o</sub> /Fe <sub>d</sub>		
	(g/kg)								
	CN	EUC	LAV	CN	EUC	LAV	CN	EUC	LAV
0-0,05	15.68	11.21	12.43	1.13	0.93	1.87	0.07	0.08	0.15
0,05-0,10	16.57	13.18	12.14	0.87	0.67	1.10	0.05	0.05	0.09
0,10-0,20	15.86	14.57	12.76	0.97	0.67	0.75	0.06	0.05	0.06

prof. (cm)	Al <sub>d</sub>			Al <sub>o</sub>			Al <sub>d</sub> /Al <sub>d</sub> + Fe <sub>d</sub>		
	(g/kg)								
	CN	EUC	LAV	CN	EUC	LAV	CN	EUC	LAV
0-0,05	2.24	1.81	1.81	1.10	0.88	0.81	0.12	0.14	0.13
0,05-0,10	2.42	2.15	1.77	1.13	0.88	0.82	0.13	0.14	0.13
0,10-0,20	2.44	2.40	2.28	1.31	1.02	0.91	0.13	0.14	0.15

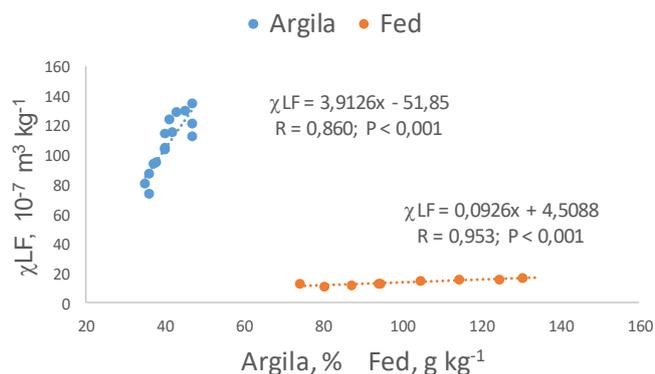
<sub>d</sub> = Extraído com ditionito, citrato e bicarbonato de sódio (DCB); <sub>o</sub> = Extraído com oxalato de amônio. Usos: CN = Campo; EUC = Eucalipto; LAV = Lavoura

A suscetibilidade magnética em baixa frequência ( $\chi_{LF}$ ) foi maior no solo sob CN em relação ao solo sob EUC e LAV (Tabela 13). A  $\chi_{LF}$  mostrou expressiva relações com os teores de argila e de óxidos de ferro no solo (Figura 49). Essa análise indica a ocorrência de óxidos de ferro magnéticos (maghemita e magnetita). Entretanto, os valores da porcentagem da susceptibilidade magnética de frequência dependente ( $\chi_{FD}$ ) foram próximos 15, indicando uma predominância da maghemita em relação a magnetita (Dearing, 1999).

**Tabela 13.** Porcentagem de argila e dados de suscetibilidade magnética da fração terra fina seca ao ar dos três usos.

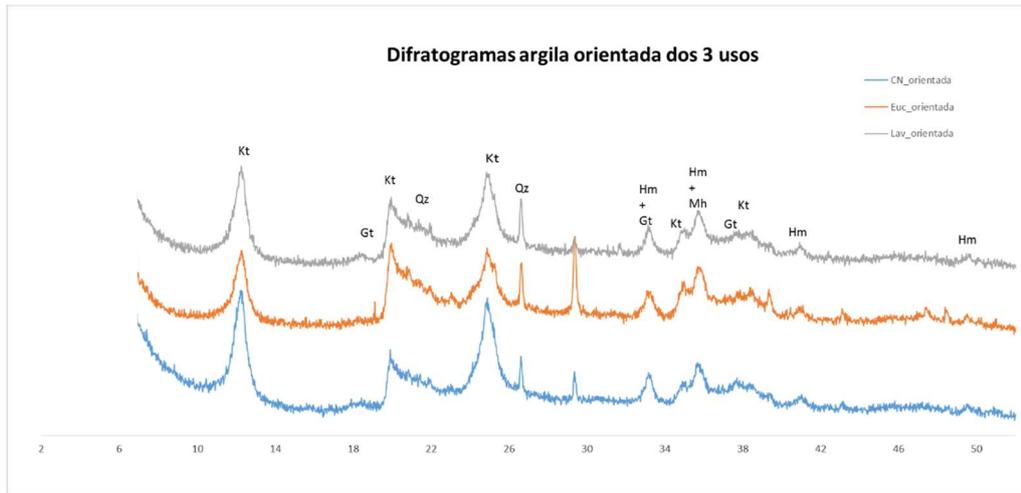
Prof.	CN		EUC		LAV	
	$\chi_{LF}$	$\chi_{FD}$	$\chi_{LF}$	$\chi_{FD}$	$\chi_{LF}$	$\chi_{FD}$
0,025	114,6	15,23	80,3	15,58	74,1	16,78
0,075	130,5	14,43	94,1	15,89	87,4	16,52
0,15	124,8	14,29	104,8	14,69	94,8	15,64
0,3	129,6	14,53	115,4	14,93	104,3	15,60
0,5	134,9	14,25	121,8	15,83	113,2	17,33

Teor de argila (%);  $\chi_{LF}$  = Suscetibilidade Magnética em frequência baixa ( $10^{-7} \text{ m}^3 \text{ kg}^{-1}$ );  $\chi_{FD}$  = Porcentagem de frequência dependente (%).

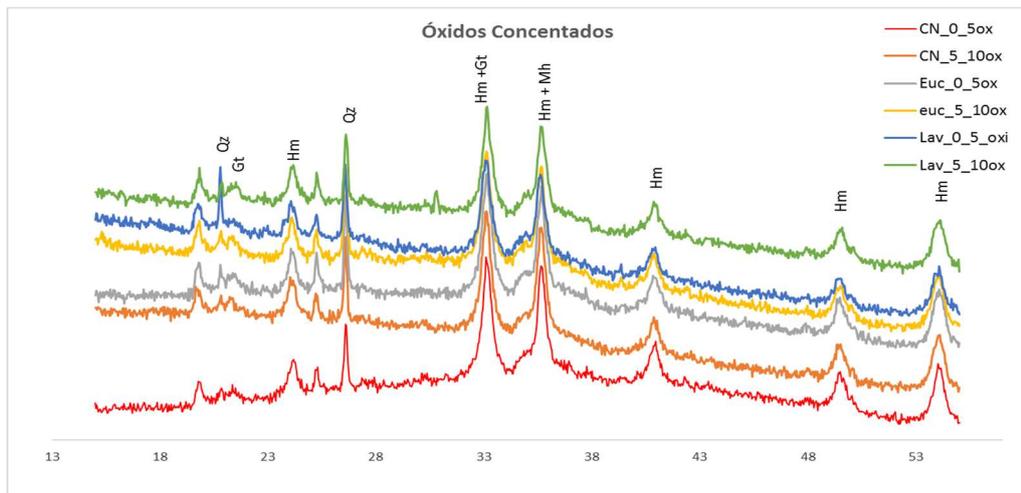


**Figura 49.** Relação entre os valores de susceptibilidade magnética em baixa frequência ( $\chi_{LF}$ ) e os teores de argila e Fe relativo aos óxidos de ferro pedogênicos (Fed) do solo sob os diferentes usos.

A análise por difratometria de raios x na fração argila total orientada (Figura 50) indicou a presença de minerais pedogênicos representativos de um solo altamente intemperizado, compatível com solos de região subtropical (Kämpf e Curi, 2003). A composição mineralógica foi formada por caulinita e óxidos de ferro (hematita, goethita) e de silício (quartzo), não sendo constatada a presença de argilominerais do tipo 2:1. Não foram verificadas diferenças consideráveis entre os difratogramas da argila total orientada do solo sob os diferentes usos que sugeriram alterações mineralógicas devido a conversão do CN pelos usos com EUC e LAV. Já a análise por DRX da fração óxidos de ferro concentrada indicou um predomínio da hematita sobre a goethita com base na intensidade das reflexões (Figura 51). No entanto, da mesma forma que na análise da argila orientada, não foram constatadas diferenças importantes na mineralogia dos óxidos de ferro no solo sob os diferentes usos.



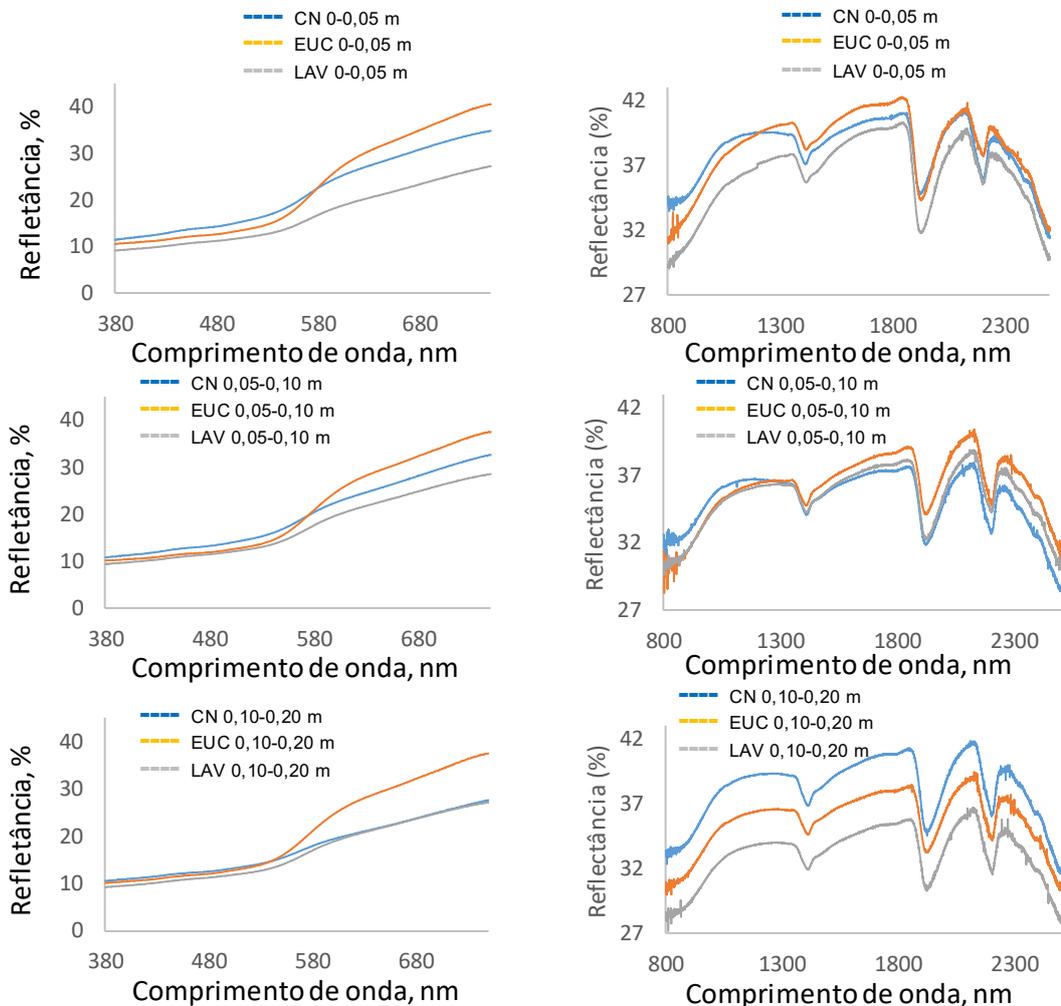
**Figura 50.** Difratomogramas de raios x da fração argila orientada da camada 0-0,10 m do solo sob campo nativo (CN), florestamento de Eucalipto (EUC) e lavoura (LAV).



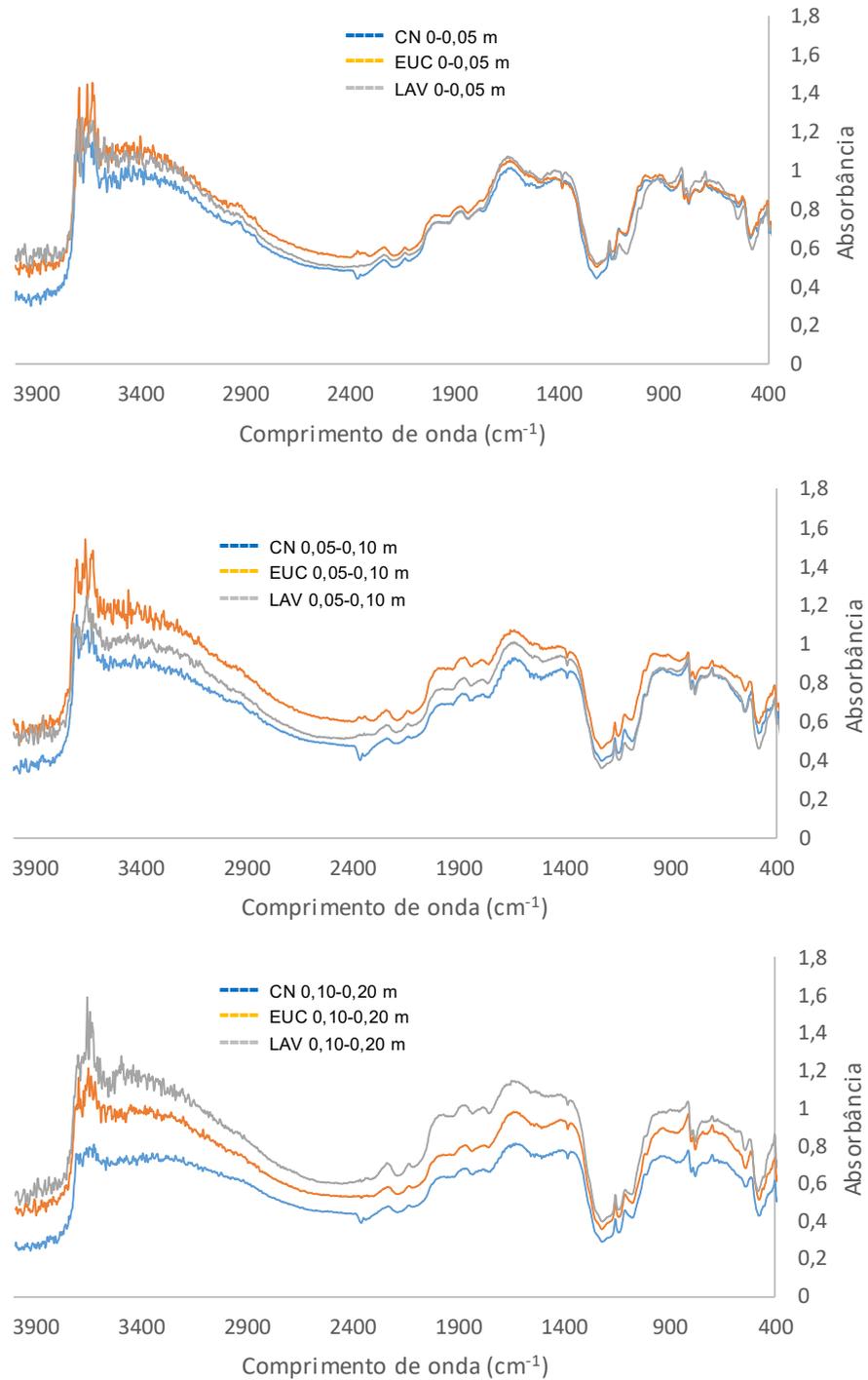
**Figura 51.** Difratomogramas de raios x da fração óxidos de ferro concentrada das camadas 0-0,05 e 0,05-0,10 m do solo sob campo nativo (CN), florestamento de Eucalipto (EUC) e lavoura (LAV).

Nas figuras 52 e 53 são mostrados os espectros das faixas do visível (VIS), infravermelho próximo (NIR) e infravermelho médio (MIR) do solo sob os diferentes usos. Uma análise utilizada para expressar diferenças ou similaridades entre os espectros ou assinaturas espectrais é a correlação entre os dados dos espectros obtidos nas três faixas analisadas (VIS, NIR e MIR). Na tabela 14 são apresentados os valores dos coeficientes de determinação para

as correlações entre o solo sob CN em relação aos usos EUC e LAV. Os espectros obtidos para a faixa do VIS indicaram expressiva similaridade entre o solo nos três tratamentos, com valores de  $R^2 \geq 0,99$ . Em geral, os valores de  $R^2$  das correlações entre o CN e os demais usos, obtidos na faixa do NIR e MIR, também foram elevados ( $R^2 \geq 0,87$ ), sugerindo semelhança entre o solo sob os distintos usos. Embora visualmente as assinaturas espectrais tenham sido semelhantes, as correlações entre CN e os usos EUC e LAV na camada 0,05-0,10 m mostraram valores de  $R^2$  inferiores as demais (0,64 e 0,81, respectivamente).



**Figura 52.** Espectros da faixa do Visível (lado esquerdo) e Infravermelho próximo (lado direito) do solo sob os usos campo nativo (CN), florestamento de Eucalipto (EUC) e lavoura (LAV) nas camadas 0-,05, 0,05-0,10 e 0,10-0,20 m.



**Figura 53.** Espectros da faixa do infravermelho médio do solo sob os usos campo nativo (CN), florestamento de Eucalipto (EUC) e lavoura (LAV) nas camadas 0-0,05, 0,05-0,10 e 0,10-0,20 m.

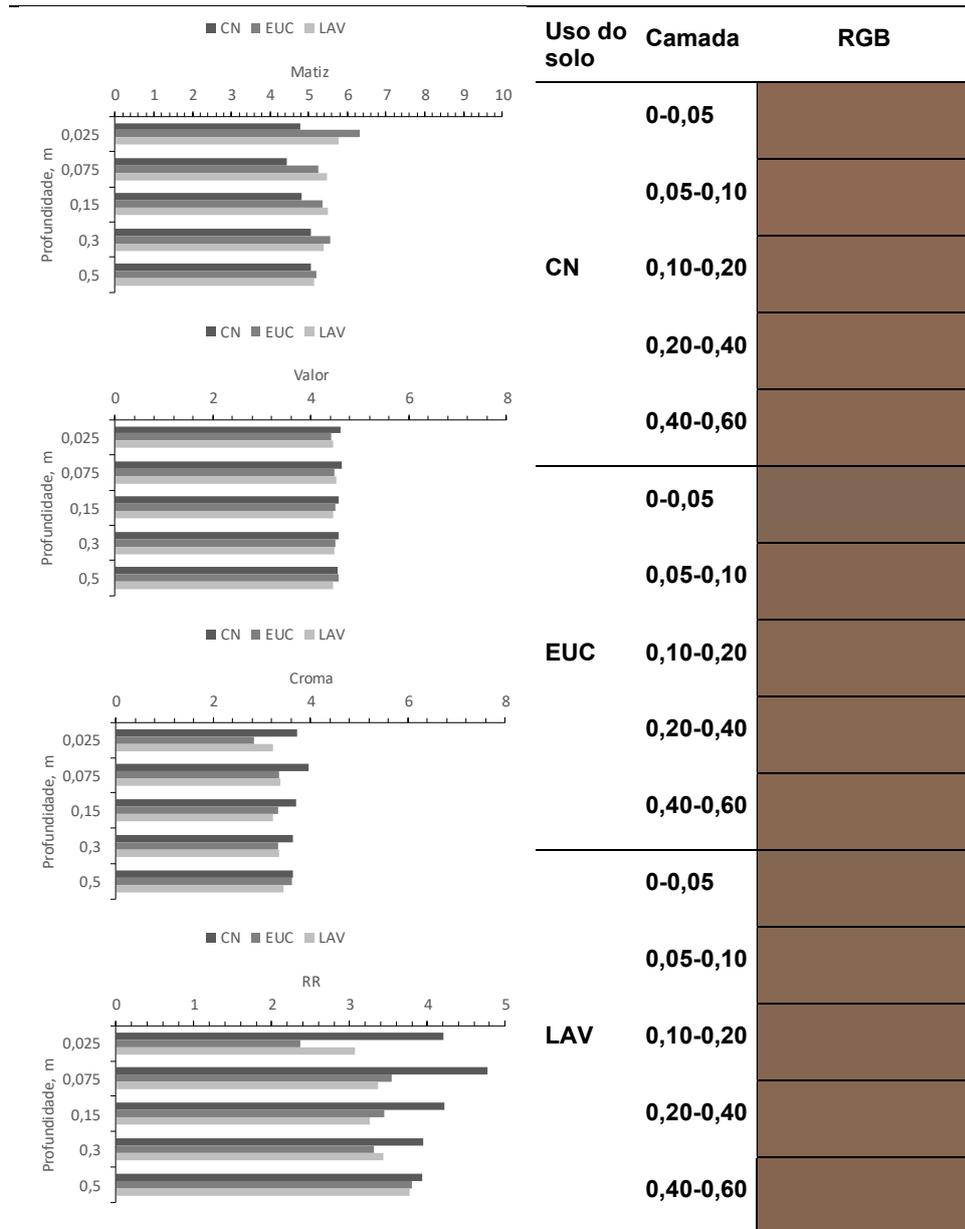
**Tabela 14.** Coeficientes de determinação ( $R^2$ ) relativo as correlações entre os dados dos espectros do solo sob campo nativo (CN) em relação aos usos florestamento de Eucalipto (EUC) e lavoura (LAV).

Camada, m	Correlação	VIS $R^2$	NIR $R^2$	MIR $R^2$
0-0,05	CN X EUC	0,99	0,90	0,93
	CN X LAV	0,99	0,88	0,90
0,05-0,10	CN X EUC	0,99	0,64	0,89
	CN X LAV	0,99	0,81	0,92
0,10-0,20	CN X EUC	0,99	0,97	0,91
	CN X LAV	0,99	0,97	0,87

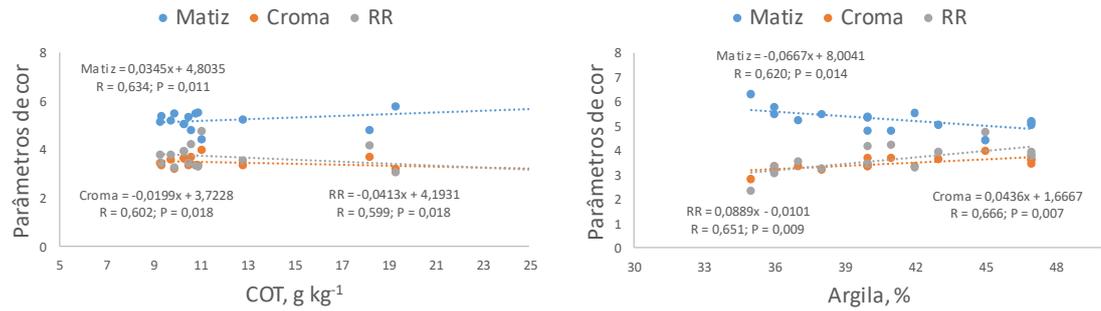
Faixa do Visível (VIS) de 380-750 nm; Infravermelho próximo (NIR) de 810-2400 nm; Infravermelho médio (MIR) de 4000-700  $\text{cm}^{-1}$ .

Em relação a cor do solo sob os diferentes usos, classificada utilizando-se o programa Munsell Conversion, versão 6.4, os resultados são apresentados na tabela 15. As mais intensas diferenças entre os parâmetros de cor [matiz (M), valor (V), croma (C), índice de avermelhamento (RR) e a combinação RGB] foram verificadas entre o CN e os usos EUC e LAV. As mudanças no uso do solo para EUC e LAV aumentaram o matiz do solo, com maior intensidade em direção a superfície. Por outro lado, o valor e o croma, este último de forma mais intensa, diminuíram no solo sob EUC e LAV. Exceto pelo valor, os parâmetros matiz, croma e índice de avermelhamento foram influenciados pelos teores de COT e argila do solo (Figura 54). O aumento de COT no solo se relacionou positivamente com o matiz do solo, e reduziu os valores do croma e do índice de avermelhamento. Por outro lado, o aumento do teor de argila do solo, com predominância de hematita, reduziu o matiz e aumentou o croma e o avermelhamento do solo.

**Tabela 15.** Parâmetros de cor do solo sob campo nativo (CN), florestamento de Eucalipto (EUC) e lavoura (LAV).

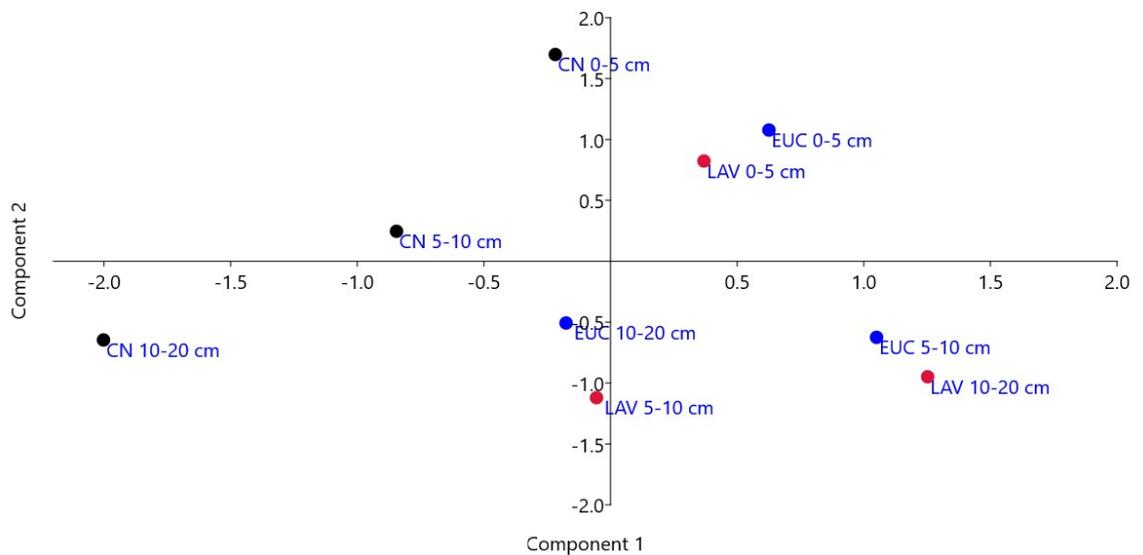


RR=f(hm): Redness rating



**Figura 54.** Correlações entre os parâmetros de cor e os teores de carbono orgânico total (COT) e argila do solo sob os diferentes usos do solo.

A análise dos componentes principais (PCA) forneceu uma síntese dos resultados obtidos (Figura 55). O distanciamento dos pontos relativos ao CN em relação aos usos EUC e LAV, indicam alterações das características do solo após 30 anos da substituição do campo nativo pela exploração agrícola continuada.



**Figura 55.** PCA 1= 85%, PCA 2 = 8%, dos três usos do solo usando os espectros da faixa do MIR nas camadas 0-5, 5-10 e 10-20 cm. Círculos em preto: campo; Azul: eucalipto e vermelho: Lavoura.

Para entender melhor visivelmente as diferenças entre estes 3 usos, também se coletou amostras indeformadas para confecção de lâminas delgadas. A fim de conhecer e entender como a microestrutura do solo pode estar influenciando na concentração e estabilidade dos minerais. A seguir são apresentadas na tabela 16 as descrições micromorfológicas dos solos.

**Tabela 16.** Descrição micromorfológica da lâmina delgada das amostras de campo nativo (CN), Lavoura (LAV), Eucalipto (EUC).

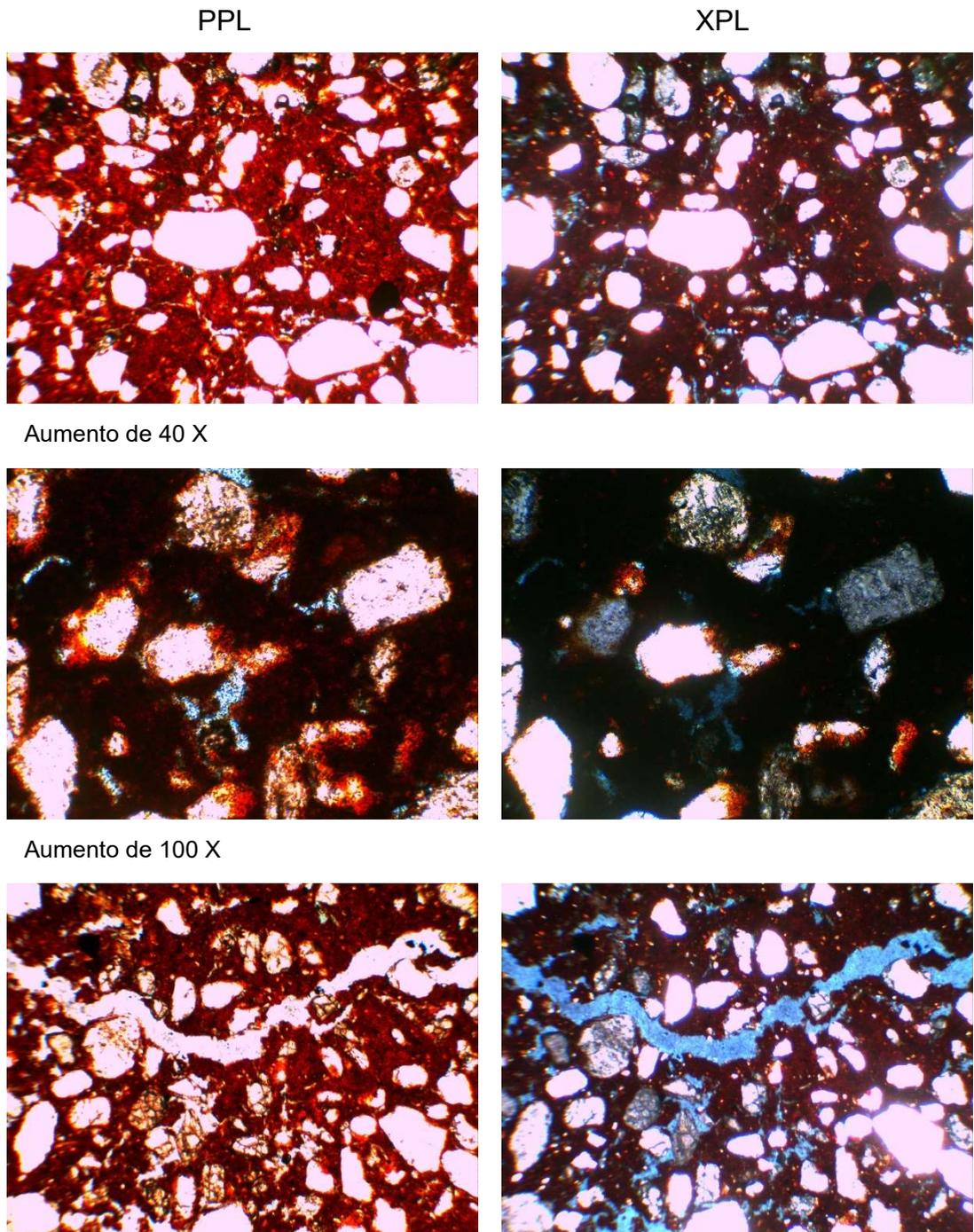
Amostra	Elementos de trama		Fundo matricial				Feições pedológicas
	PDR	Microestrutura	Poros	CMG	CMF	CO	
CN	Porfírica fechada	Maciça	Poros planares, fissurais.	Quartzo subarredondado a subangular. Moderadamente selecionados.	Micromassa avermelhada, alaranjada. Não-diferenciado a birrefringente.	Presença de restos vegetais (raízes).	Poucos excrementos
LAV	Porfírica fechada, e enáulica espaço fechado igual	Granular e blocos subangulares	Poros de empacotamento complexo e poros planares	Quartzo subarredondado a subangular. Moderadamente selecionados	Micromassa avermelhada, alaranjada. Não-diferenciado a birrefringente	Presença de restos vegetais (raízes).	Presença de excrementos
EUC	Porfírica fechada, e enáulica espaço fechado igual	Maciça em desagregação formando pequenos grânulos e blocos, grãos soltos	Poros de empacotamento sendo formados e cavitários	Quartzo subarredondado a subangular. Moderadamente selecionados	Micromassa avermelhada, alaranjada. Não-diferenciado a birrefringente	Presença de restos vegetais (raízes).	Muito excremento, muita atividade biológica

PDR: padrão de distribuição relativa. CMG: Componentes minerais grosseiros; CMF: componentes minerais finos; CO: componentes orgânicos

O campo nativo é considerado aqui como a condição inicial desse solo. Sua microestrutura entre faces de pedrs, com poucos excrementos indicando pouca atividade da fauna. Os grãos de quartzos têm formato de característica de arenito, moderadamente selecionados com grãos grandes e pequenos (Figura 56).

No solo sob lavoura (Figura 57), o cultivo mecanizado alterou a microestrutura, que resultou na formação de blocos e pequenos grânulos. Os microagregados estão separados por poros planares nítidos, as faces dos microagregados estão bem acomodadas, com grânulos separados dentro de um pacote poroso, e não ajustados entre si (arredondados), o que mostra que o sistema plantio direto está reestruturando o solo, considerando as características de microestrutura maciça encontrada no campo nativo

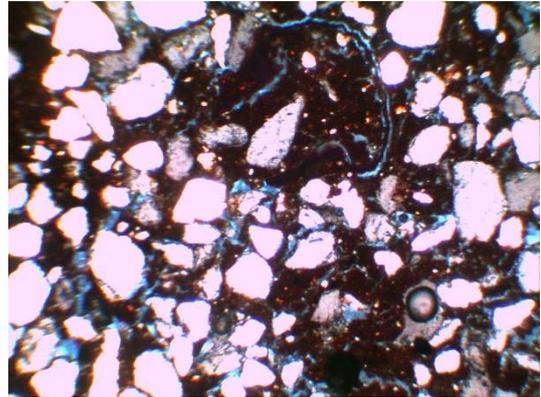
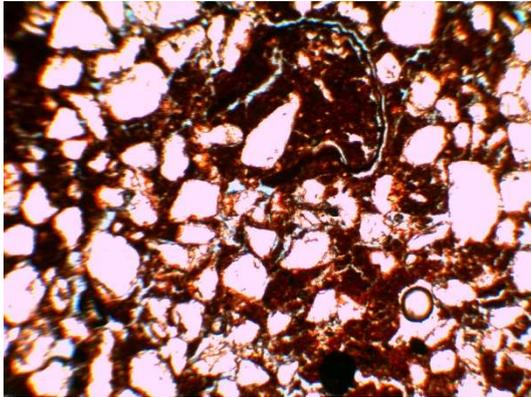
No eucalipto a microestrutura maciça sofreu desagregação, assim como no plantio direto. Formou-se poros de empilhamento até grãos soltos. A atividade biológica desse solo é forte com muitos excrementos entre as partículas. A ação das raízes do eucalipto com a fauna do solo tem ajudado no processo de reestruturação do mesmo e aumentando os teores de matéria orgânica (Figura 58).



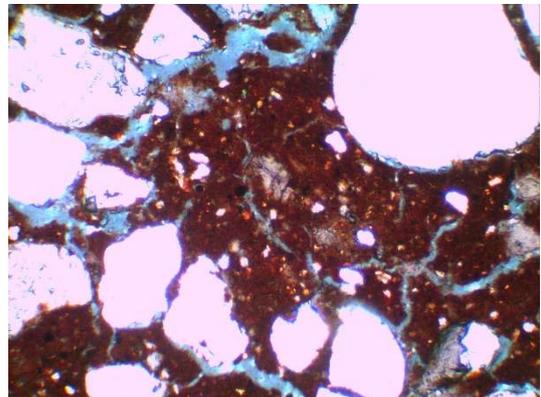
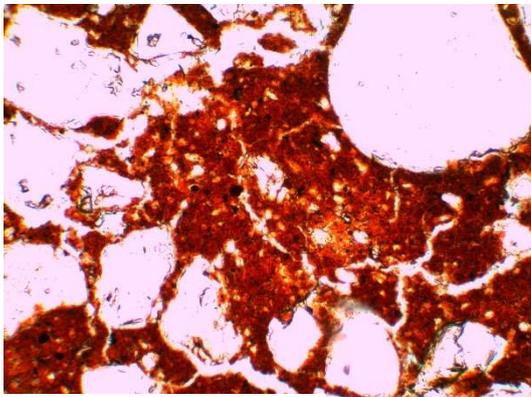
**Figura 56.** Micrografias em PPL e XPL da amostra do Campo Nativo

PPL

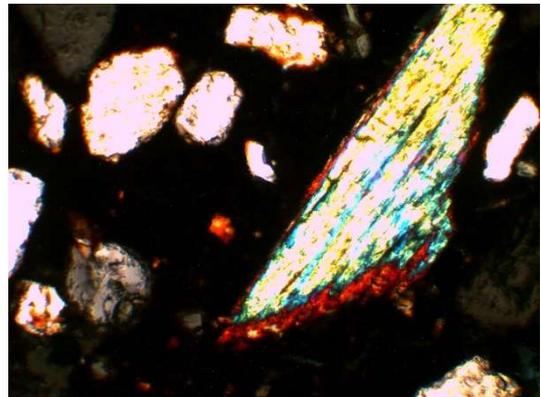
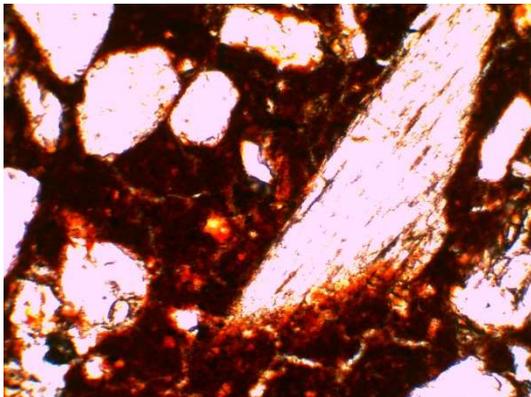
XPL



Aumento de 40 X



Aumento de 100 X

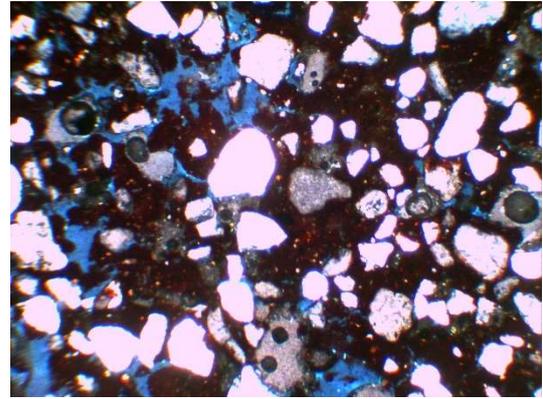
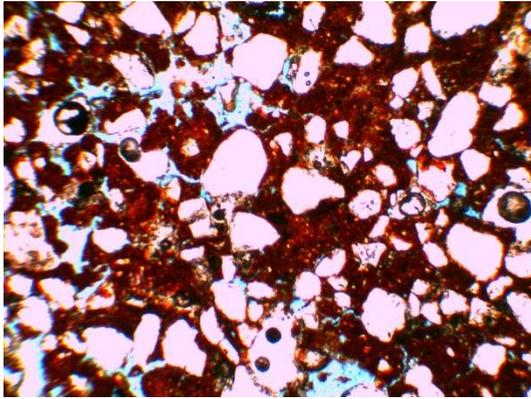


Aumento de 100 X. Piroxênio ou anfíbólio se intemperizando.

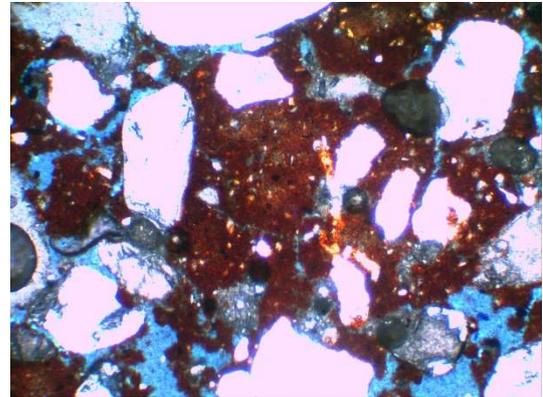
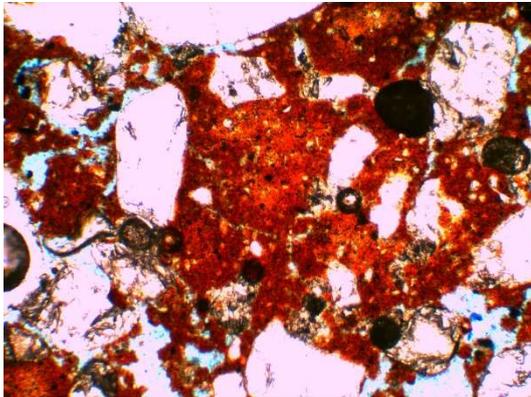
**Figura 57.** Micrografias em PPL e XPL da amostra da Lavoura

PPL

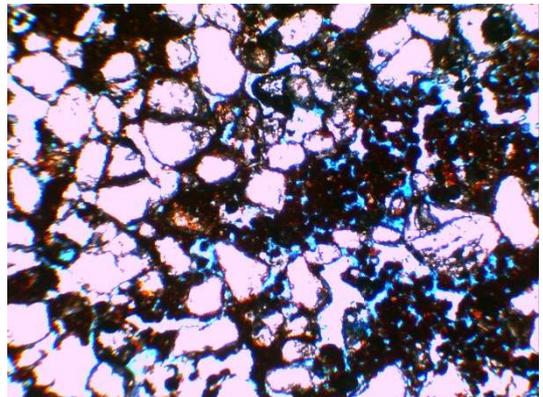
XPL



Aumento de 40 X



Aumento de 100 X



Aumento de 40 X. Muitos excrementos, evidenciando alta atividade biológica

**Figura 58.** Micrografias em PPL e XPL da amostra do Cultivo de Eucalipto

## 5.6. Considerações finais

O teor de argila dos usos do solo com eucalipto e lavoura foi menor nas camadas de 0-0,10 m em relação ao campo nativo. Já o carbono orgânico do EUC foi superior na camada de 0-0,05 m devido a acúmulos de serapilheira, enquanto o CN e LAV permaneceram com os valores semelhantes sugerindo que o sistema plantio direto não está causando danos ao sistema em termos de matéria orgânica.

Os resultados também indicam uma manutenção da qualidade química do Latossolo Vermelho após trinta anos de reflorestamento com eucalipto (biociclagem) e de cultivo sob plantio direto, considerando a química do complexo sortivo.

O menor teor de argila no EUC e LAV possivelmente interferiu na porcentagem dos elementos totais Ca, Mg, Si, Al, Fe e Ti; assim como nos teores de Fed e Ald, e conseqüentemente na suscetibilidade magnética.

Os parâmetros de cor estiveram atrelados ao conteúdo de COT e também ao teor de argila, com evidências para maiores diferenças entre o CN para o EUC e LAV.

A mineralogia composta por minerais altamente intemperizados não apresentou modificações entre os tratamentos, com predominância de hematita sobre goethita em termos de óxidos de ferro.

Na análise micromorfológica foi possível observar o efeito da nova estruturação do solo frente as mudanças pedoambientais recentes na superfície de um Latossolo Vermelho do Sul do Brasil, determinadas por 30 anos com florestamento de eucalipto (*Eucalyptus* spp.) e cultivos anuais. Com a presença de mais microporos nesses dois ambientes possivelmente favoreceu a percolação de partículas mais finas pelo perfil e concentração de maior teor de silício na superfície do solo.

## 6. CAPÍTULO VI: CONCLUSÃO GERAL

O estudo dos térmitas tanto do capítulo 3 quanto do 4, serve para entender melhor a dinâmica de comportamento destes indivíduos na ação sobre as propriedades do solo. A característica de seletividade de determinadas partículas finas e consequente enriquecimento de seus ninhos foi possível observar nos resultados deste estudo. Algumas diferenças obtidas nos resultados referentes ao local de coleta do ninho (meio e topo), sugere que um estudo mais detalhado seja interessante, pois talvez sua composição seja mais heterogênea e por isso não encontramos tendências para as duas posições de coleta do ninho. A variação na concentração de minerais interestratificados 2:1-caulinita nos ninhos e demais características químicas mostram a importância destes organismos em enriquecer um ambiente que posteriormente, quando esse local for abandonado servirá de nutrientes para as plantas que ali habitarão. O que fortalece a importância destes insetos no ambiente solo como essenciais colaboradores na formação e transformação do solo.

No capítulo 5 foi possível compreender melhor as transformações, que um ambiente de campo nativo sobre Latossolo Vermelho no sul do Brasil pode apresentar após longos 30 anos de perturbação antrópica, com lavoura de cultivos anuais e reflorestamento de eucaliptos. De modo geral, este ambiente altamente intemperizado não demonstrou perdas na sua qualidade química e física, também sem transformação em sua mineralogia original, indicando ainda que estes ambientes quando bem manejados podem se reestruturar melhorando a sua organização, como foi observado pela análise micromorfológica. Então, nestas condições estudadas, onde reflete o manejo adotado nas áreas com forte influência sobre a produção agrícola do sul do Brasil, o uso intensivo da agricultura sob plantio direto e florestamento de eucalipto por longos período de cultivo, não prejudicam a qualidade do solo.

## REFERÊNCIAS

ACKREMAN, L. *et al.* The impact of mound- building termites on surface soil properties in a secondary forest of Central Amazonia. **Applied Soil Ecology**, Amsterdam, v. 37, p. 267-276, 2007.

AGAFONOFF, V. Sur quelques sols rouges et Bienhoa de l'Indochine. **Revue de Botanique Appliquée et d'Agriculture Coloniale**, Paris, v. 9, p. 89–90, 1929.

AGAFONOFF, V. Soils types de Tunisie. **Annales du Service Botanique et Agronomique de Tunisie**, Tunis, v. 12/13, p. 43–413, 1935/1936.

AGEFLOR - ASSOCIAÇÃO GAÚCHA DE EMPRESAS FLORESTAIS. **Distribuição de floresta plantada por município no RS**. Porto Alegre, 2017. Disponível em: <http://www.ageflor.com.br/>. Acesso em: 10 out. 2019.

ALMEIDA, J. S. **Manutenção de temperatura e umidade e seletividade de partículas do solo em ninhos de Cornitermes (Isoptera: Termitidae) de uma floresta de terra firme da Amazônia Central**. 2006. Disponível em: <http://pdbff.inpa.gov.br/cursos/efa/livro/2006/pdfs/pfjuliana.pdf>. Acesso em: 15 fev. 2017.

ASHTON, L. A. *et al.* [Termites mitigate the effects of drought in tropical rainforest](#). **Science**, Washington, DC, v. 363, n. 6423, p. 174-177, 2019.

AZEVEDO, A. C. *et al.* Filossilicatos 2:1 com hidróxi entre camadas em solos: estado atual do conhecimento e das perspectivas de pesquisa. **Revista de Ciências Agrárias**, Belém, v. 55, n. 3, p. 236-243, 2012.

BARATTO, J.; WOLLMANN, C. A. Precipitação histórica do mês de outubro para a bacia hidrográfica do Alto Jacuí/RS. **Ciência e Natura**, Santa Maria, v. 39, p. 41– 57, 2017. Edição Especial PROCAD/CAPES.

BARNHISEL, R. I.; BERTSCH, P. M. Chlorites and hydroxy interlayered vermiculite and smectite. *In*: DIXON, J. M.; WEED, S B. (ed.). **Minerals in soil environments**. 2nd ed. Madison: Soil Science Society of America, 1989. p. 729–788.

BARRÓN, V.; MELLO, J.; TORRENT, J. Caracterização de óxidos de ferro em solos por espectroscopia de reflectância difusa. *In*: NOVAIS, R. F.; ALVAREZ V. V. H.; SCHAEFER, C. E. G. R. (ed.). **Tópicos em ciência do solo**. Viçosa, MG: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2000. v. 1, p.139-162.

BARRÓN, V.; TORRENT, J. Use of the Kubelka–Munk theory to study the influence of iron oxides on soil colour. **Journal of Soil Science**, Oxford, v. 37, n. 4, p. 499–510, 1986.

BERTI FILHO, E. **Manual de pragas em florestas**. Piracicaba: IPEF-SIF, 1993. v. 3, 56 p.

BERTOLAZI, V. T. *et al.* Impact of an integrated no-till soybean-beef cattle production system on Oxisol mineralogy in southern Brazil. **Applied Clay Science**, Amsterdam, v. 149, p. 67-74, 2017.

BECKHOFF, B. *et al.* (ed.). **Handbook of practical x-ray fluorescence analysis**. Berlin: Springer, 2006.

BIGHAM, J. M.; FITZPATRICK, R. W.; SCHULZE, D. Iron oxides. *In*: DIXON, J. B.; SCHULZE, D. G. **Soil mineralogy with environmental applications**. Madison: Soil Science Society of America, 2002. p. 323-366.

BOTTINELLI, N. *et al.* Why is the influence of soil macrofauna on soil structure only considered by soil ecologists? **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v. 146, pt. A, p. 118–124, 2015.

BORTOLUZZI, E. C. *et al.* Mineralogical changes caused by grape production in a regosol from subtropical Brazilian climate. **Journal of Soils and Sediments**, Landsberg, v. 12, p. 854-862, 2012.

BORTOLUZZI, E. C. *et al.* Occurrence of iron and aluminum sesquioxides and their implications for the P sorption in subtropical soils. **Applied Clay Science**, Amsterdam, v. 104, p. 196-204, 2015.

BORTOLUZZI, E. C.; PERNES, M.; TESSIER, D. Interestratificado caulinita-esmectita em um Argissolo desenvolvido a partir de rocha sedimentar do sul do Brasil. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, MG, v. 31, p. 1291-1300, 2007.

BRUCE-OKINE, E.; LAL, R. Soil erodibility as determined by raindrop technique. **Journal of Soil Science**, Oxford, v. 119, p. 149-156, 1973.

CALLOT, G. *et al.* Mise en évidence de kaolinite et de silice dans les structures cellulaires de l'épiderme et du cortex des racines de palmier, en Forêt d'Amazonie. **Bulletin de la Société Botanique de France. Actualités Botaniques**, Paris, v. 139, p. 7-14, 1992.

CASTILHOS, R. M. V.; MEURER, E. Cinética de liberação de potássio em Planossolo do Estado do Rio Grande do Sul. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 31, p. 979–983, 2001.

CHAER, G. M.; TÓTOLA, M. R. Impacto do manejo de resíduos orgânicos durante a reforma de plantios de eucalipto sobre indicadores de qualidade do

solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, MG, v. 31, p.1381-1396, 2007.

CHAVES, E. **Liberação de potássio e alteração mineralogia em Argissolos subtropicais**. 2014. 51 f. Dissertação (Mestrado)- Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo, Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2014.

COLONIA SURICHAQUI, R. C. **Síntesis y caracterización de nanopartículas de ZnO<sub>2</sub> y su actividad antimicrobiana**. 2013. Tese (Doutorado) - Escuela Profesional de Ingeniería Física, Facultad de Ciencias, Universidad Nacional de Ingeniería, Lima, Perú, 2013.

CORNEL, R. M.; SCHWERTMANN, U. **The iron oxides: structure, properties, reaction, occurrences and uses**. 2nd ed. Weinheim: Wiley, 2003. 705 p.

COSENZA, G. W.; CARVALHO, M. M. Controle e nível de dano do cupim de montículo em pastagens. **Revista da Sociedade Brasileira de Zootecnia**, Viçosa, MG, v. 3, n. 1, p. 1- 12, 1974.

CONSTANTINO, R. Catalog of the termites of the New World (Insecta: Isoptera). **Arquivos de Zoologia**, São Paulo, v. 35, n. 2, p. 135-231, 1998.

CONSTANTINO, R. Chave ilustrada para identificação dos gêneros de cupins (Insecta: Isoptera) que ocorrem no Brasil. **Papéis Avulsos de Zoologia**, São Paulo, v. 40, n. 25, p. 347- 448, 1999.

CONSTANTINO, R. Padrões de diversidade e endemismo de térmitas no bioma Cerrado. *In*: SCARIOT, A. O. *et al.* (ed.). **Biodiversidade, ecologia, e conservação do cerrado**. Brasília, DF: Ministério do Meio Ambiente, 2005. p. 319 - 333.

CORREIA, M. E. F. **Relações entre a diversidade da fauna do solo e o processo de decomposição e seus reflexos sobre a estabilidade dos ecossistemas**. Seropédica: Embrapa Agrobiologia, 2002. (Embrapa Agrobiologia. Documentos, 156).

CORRÊIA, M. M. *et al.* Propriedades cristalográficas de caulinitas de solos do ambiente tabuleiros costeiros, Amazônia e Recôncavo Baiano. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, MG, v. 32, n. 5, p.1857-1872, 2008.

COSTA, A. C. S.; BIGHAM, J. M. Óxidos de ferro. *In*: MELO, V. F.; ALLEONI, L. R. F. **Química e mineralogia do solo. Parte I**. Viçosa, MG: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2009. p. 505-572.

CSR/IBAMA - CENTRO DE SENSORIAMENTO REMOTO/IBAMA. **Projeto de Monitoramento do desmatamento dos biomas brasileiros por satélite - PMDBBS**. Brasília, DF, 2020. Disponível em:

siscom.ibama.gov.br/monitora\_biomass/PMDBBS%20-%20PAMPA.html.  
Acesso em: 6 jan. 2020.

CUNHA, H. F. Distribuição espacial de cupinzeiros epígeos de pastagem no município de Iporá-GO, Brasil. **EntomoBrasilis**, Vassouras, RJ, v. 4, p. 45-48, 2011.

CUNHA, H. F.; MORAIS, P. P. A. M. Relação espécie-área em cupinzeiros de pastagem, Goiânia-GO, Brasil. **EntomoBrasilis**, Vassouras, RJ, v. 3, p. 60-63, 2010.

CUNHA, H. F. **Cupins (Isoptera) bioindicadores para conservação do Cerrado em Goiás**. 2006. 74 f. Tese (Doutorado) – Universidade Federal de Goiás, Goiânia, 2006.

CURI, N.; KÄMPF, N. Caracterização do solo. *In*: KER, J. C. *et al.* (org). **Pedologia: fundamentos**. Viçosa, MG: Sociedade Brasileira de Ciências do Solo, 2012. v. 1, p. 147-170.

CZEPAK, C.; ARAÚJO, E. G.; FERNANDES, P. M. Ocorrência de espécies de cupins de montículo em pastagens no Estado de Goiás. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, DF, v. 33, p. 35- 38, 2003.

DAANE, L. L. *et al.* Isolation and characterization of polycyclic aromatic hydrocarbon-degrading bacteria associated with the rhizosphere of salt marsh plants. **Applied and Environmental Microbiology**, Washington, DC, v. 67, n. 6, p. 2683-2691, 2001.

DEARING, J. **Environmental magnetic susceptibility: using the bartington MS2 system**. 2nd ed. Kenilworth: Chi Publishing, 1999. 54 p.

DELAGE, A.; LAGATU, H. Sur la constitution de la terre arable. **Comptes Rendus de l'Academie des Sciences**, Paris, v. 109, p. 1043–1044, 1904.

DONAGEMA, G. K. *et al.* **Manual de métodos de análise de solos**. 2. ed. Rio de Janeiro: EMBRAPA Solos, 2011.

DONOVAN, S. E.; EGGLETON, P.; BIGNELL, D. E. Gut content analysis and a new feeding group classification of termites. **Ecological Entomology**, Oxford, v. 26, p. 356–366, 2001a.

DONOVAN, S. E. *et al.* The effect of a soil feeding termite, *Cubitermes fungifaber* (Isoptera: Termitidae) on soil properties: termites may be an important source of soil microhabitat heterogeneity in tropical forests. **Pedobiologia**, Jena, v. 45, n. 1, p. 1-11, 2001b.

EGGLETON, P. *et al.* Termite diversity across an anthropogenic disturbance gradient in the humid forest zone of West Africa. **Agriculture, Ecosystems & Environment**, Amsterdam, v. 90, n. 2, p. 189-202, 2002.

- EGGLETON, P. *et al.* The diversity, abundance and biomass of termites under differing levels of disturbance in the Mbalmayo Forest Reserve, southern Cameroon. **Philosophical Transactions of the Royal Society of London**, London, v. 351, n. 1335, p. 51- 68, 1996.
- ERENS, H. *et al.* The origin and implications of variations in soil-related properties within *Macrotermes falciger* mounds. **Geoderma**, Amsterdam, v. 249/250, p. 40–50, 2015.
- EVANS, T. A. *et al.* Ants and termites increase crop yield in a dry climate. **Nature Communications**, London, n. 2, [art.] 262, 2011.
- FERNANDES, J. S. *et al.* Avaliação da qualidade de solo sob cultivo de *Eucalyptus* em diferentes ciclos. **Enciclopédia Biosfera**, Goiânia, v. 9, n. 17, p. 352-361, 2013.
- FERNANDES, P. M.; CZEPAK, C.; VELOSO, V.R.S. Cupins de montículos em pastagens: prejuízo real ou praga estética? *In*: FONTES, L. R.; BERTI-FILHO, E. (ed.). **Cupins: o desafio do conhecimento**. Piracicaba: Fealq, 1998. p. 187-210.
- FINK, J. R. *et al.* Chemical and mineralogical changes in a Brazilian Rhodic Paleudult under different land use and managements. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, MG, v. 38, p. 1304-1314, 2014.
- FINK, J. R. *et al.* Mineralogy and phosphorus adsorption in soils of south and central-west Brazil under conventional and no-tillage systems. **Acta Scientiarum. Agronomy**, Maringá, v. 36, p. 379–387, 2014.
- GEOLOGIA. Santa Maria, 2018. Disponível em: <http://coralx.ufsm.br/ifcrs/geologia.htm>. Acesso em: 24 jul. 2018.
- FORTI, L. C.; ANDRADE, M. L. Populações de cupins. *In*: BERTI FILHO, E.; FONTES, L. R. (ed.). **Alguns aspectos atuais da biologia e controle de cupins**. Piracicaba: Fealq, 1995.
- FURQUIM, S. A. C. *et al.* Mineralogy and genesis of smectites in an alkaline-saline environment of pantanal wetland, Brazil. **Clays and Clay Minerals**, Long Island City, v. 56, n. 5, p. 579-595, 2008.
- GAMA-RODRIGUES, A. C.; BARROS, N. F. Ciclagem de nutrientes em floresta natural e em plantios de eucalipto e de dandá no sudeste da Bahia, Brasil. **Revista Árvore**, Viçosa, MG, v. 26, n. 2, p. 193-207, 2002.
- GUPPY, C. N. *et al.* Competitive sorption reactions between phosphorus and organic matter in soil: a review. **Australian Journal of Soil Research**, Melbourne, v. 43, p. 189-202, 2005.

HANKE, D. *et al.* Influência da matéria orgânica no diâmetro médio de minerais da fração argila de solos desenvolvidos de basalto no sul do Brasil. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, MG, v. 39, p. 1611-1622, 2015.

HARIT, A. *et al.* Termites can have greater influence on soil properties through the construction of soil sheetings than the production of above-ground mounds. **Insectes Sociaux**, Paris, v. 64, p. 247-253, 2017.

HERBILLON, A. J.; FRANKART, R.; VIELVOYE, L. An occurrence of interstratified kaolinite-smectite minerals in a Red-Black soil toposequence. **Clay Minerals**, London, v. 16, p. 195-201, 1981.

HOLT, J. A.; COVENTRY, R. J.; SINCLAIR, D. F. Some aspects of the biology and pedological significance of mound-building termites in a red and yellow earth landscape near Charters Towers, north Queensland. **Australian Journal of Soil Research**, Melbourne, v. 18, p. 97-109, 1980.

HOLT A. J.; LEPAGE, M. Termites and soil properties. *In*: ABE, T.; BIGNELL, D. E.; HIGASHI, M. (ed.). **Termites: evolution, sociality, symbioses, ecology**. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers, 2000. v. 18, p. 389-407.

HUGHES, R. E.; MOORE, D. M.; GLASS, H. D. Qualitative and quantitative analysis of clay minerals in soils. *In*: QUANTITATIVE METHODS IN SOIL MINERALOGY, 1990, San Antonio, Texas. **Proceedings** [...]. [S.l.]: Soil Science Society of America, 1994. p. 330-359.

IBGE - INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Censo agropecuário**. Rio de Janeiro, 2019. Disponível em: <http://www.ibge.gov.br/>. Acesso em: 19 out. 2019.

IMENSON, A. C.; VIS, M. Assessing soil aggregate stability by water drop impact and ultrasonic dispersion. **Geoderma**, Amsterdam, v. 34, p. 185-200, 1984.

INDA, A. V. *et al.* Composição da fase sólida mineral do solo. *In*: MEURER, E. J. (ed.). **Fundamentos de química do solo**. Porto Alegre: Evangraf, 2006. p. 31-61.

INDA, A. V. *et al.* Aluminum hydroxy-interlayered minerals and chemical properties of a subtropical Brazilian Oxisol under no-tillage and conventional tillage. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, MG, v. 34, p. 33-41, 2010.

JANIK, L. J.; MERRY, R. H.; SKJEMSTAD, O. Can mid infra-red diffuse reflectance analysis replace soil extractions? **Australian Journal of Experimental Agriculture**, East Melbourne, v. 38, n. 7, p. 681- 696, 1998.

JENNY, H. **Factors of soil formation: a system of quantitative pedology**. New York: Dover, 1941. 281 p.

JONES, C. G.; LAWTON, J. H.; SHACHAK, M. Organisms as ecosystem engineers. **Oikos**, Copenhagen, v. 69, p. 373–386, 1994.

JOUQUET, P. *et al.* Influence of termites on ecosystem functioning. Ecosystem services provided by termites. **European Journal of Soil Biology**, Paris, v. 47, p. 215–222, 2011.

JOUQUET, P. *et al.* Termites: the neglected soil engineers of tropical soils. **Soil Science**, Brunswick, v. 181, n. 3/4, p. 157–165, 2016.

JOUQUET, P. *et al.* Role of the fungusgrowing termite *Pseudacanthotermes spiniger* (Isoptera, Macrotermitinae) in the dynamic of clay and soil organic matter content. An experimental analysis. **Geoderma**, Amsterdam, v. 139, n. 1/2, p. 127–133, 2007.

JOUQUET, P. *et al.* Effect of termites on clay minerals in tropical soils: fungusgrowing termites as weathering agents. **European Journal of Soil Science**, Oxford, v. 53, p. 521–527, 2002.

JOUQUET, P.; LEPAGE, M.; VELDE, B. Termite soil preferences and particle selections: strategies related to ecological requirements. **Insectes Sociaux**, Paris, v. 49, p. 1-7, 2002.

JOUQUET, P. *et al.* Soil invertebrates as ecosystem engineers: intended and accidental effects on soil and feedback loops. **Applied Soil Ecology**, Amsterdam, v. 32, n. 2, p. 153–164, 2006.

JOUQUET, P.; CHAUDHARY, E.; KUMAR, A. R. V. Sustainable use of termite activity in agro-ecosystems with reference to earthworms. A review. **Agronomy for Sustainable Development**, Paris, v. 38, [art.] 3, p. 2-3, 2018.

JUERGENS, N. The biological underpinnings of namib desert fairy circles. **Science**, Washington, DC, v. 339, p. 1618-1621, 2013.

KÄMPF, N.; CURI, N.; MARQUES, J. J. Conceitos básicos em mineralogia. *In*: MELO, V.F.; ALLEONI, L. R. F. (org). **Química e mineralogia do solo – Parte I – Conceitos básicos**. Viçosa, MG: Sociedade Brasileira de Ciências do Solo, 2009. v. 1, cap. 5, p. 335-380.

KÄMPF, N.; CURI, N. Argilominerais em solos brasileiros. *In*: CURI, N. *et al.* (ed.). **Tópicos em ciência do solo**. Viçosa, MG: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2003. v. 3, p.1-54.

KÄMPF, N.; CURI, N. Óxidos de ferro: indicadores de ambientes pedogênicos. *In*: NOVAIS, R. F.; ALVAREZ, V. H.; SCHAEFER, C. E. G. R. **Tópicos em ciência do solo**. Viçosa, MG, Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2000. v. 1, p. 107-138.

KÄMPF, N.; SCHWERTMANN, U. The 5 M-NaOH concentration treatment for iron oxides in soils. **Clays and Clay Minerals**, Oxford, v. 30, n. 6, p. 401-408, 1982.

KASCHUK, G. *et al.* Termite activity in relation to natural grassland soil attributes. **Scientia Agricola**, Piracicaba, v. 63, n. 6, p. 583-588, 2006.

KAUL, P. F. I. Geologia. *In*: IBGE. **Geografia do Brasil: região sul**. Rio de Janeiro: IBGE, 1990.

KLUEPFEL, D. A. The behavior and tracking of bacteria in the rhizosphere. **Annual Review of Phytopathology**, Palo Alto, v. 31, p. 441-472, 1993.

KOCH, C. B. *et al.* Clay mineralogy of two Ultisols from Central Kalimantan, Indonesia. **Soil Science**, Brunswick, v. 154, p. 158–167, 1992.

KORCHAGIN, J. *et al.* Evidences of soil geochemistry and mineralogy changes caused by eucalyptus rhizosphere. **Catena**, Cremlingen, v. 175, p. 132–143, 2019.

KUBIENA, W. L. **Micromorphological features in soil geography**. Brunswick: Rutgers University Press, 1970.

LA CRUZ, M. N. S. *et al.* Terpenos em cupins do gênero *Nasutitermes* (Isoptera, Termitidae, Nasutitermitinae). **Química Nova**, São Paulo, v. 37, n. 1, p. 95-103, 2014.

LANSON, B. Decomposition of experimental X-ray diffraction patterns (profile fitting): a convenient way to study clay minerals. **Clays & Clay Minerals**, Long Island City, v. 45, p. 132–146, 1998.

LAWTON, J. The role of species in ecosystems: aspects of ecological complexity and biological diversity. *In*: ABE, T. *et al.* (ed.). **Biodiversity: an ecological perspective**. New York: Springer, 1997. p. 325-228.

LEE, K. E.; WOOD, T. G. **Termites and soils**. London: Academic Press of London, 1971.

LEPSCH, I. F. **19 lições de pedologia**. São Paulo: Oficina de textos, 2011. p. 456.

LIMA, S. S. **Pastagens no cerrado e a relação com os térmitas construtores de ninhos epígeos**. 2012. 90 f. Tese (Doutorado) – Pós-Graduação em Agronomia, Instituto de Agronomia, Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, Seropédica, 2012.

LIMA, S. S. *et al.* Relação entre a presença de cupinzeiros e a degradação de pastagens. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, DF, v. 46, p. 1699-1706, 2011.

LIMA, J. T.; COSTA, A. M. Recursos alimentares explorados pelos cupins (Insecta: Isoptera). **Biota Neotropica**, Campinas, v. 7, n. 2, p. 243-250, 2007.

LUCAS, Y. *et al.* The relation between biological activity of the rain forest and mineral composition of soils. **Science**, Washington, DC, v. 260, p. 521-523, 1993.

MALUF, J. R. T. Nova classificação climática do Estado do Rio Grande do Sul. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, Santa Maria, v. 8, n. 1, p. 141-150, 2000.

MAZURANA, M. *et al.* Soil susceptibility to compaction under use conditions in southern Brazil. **Ciência e Agrotecnologia**, Lavras, v. 41, p. 60-71, 2017.

MEHTA, B. K.; SHIOZAWA, S.; NAKANO, M. Measurement of molecular diffusion of salt in unsaturated soils. **Soil Science**, Brunswick, v. 159, p. 115-121, 1995.

MEHRA, O. P.; JACKSON, M. L. Iron oxide removal from soils and clays by a dithionite-citrate system buffered with sodium bicarbonate. **Clays & Clay Mineral**, Long Island City, v. 7, n. 1, p. 317-327, 1960.

MELLO, F. V. *et al.* A importância da mesa e macrofauna do solo na fertilidade e como bioindicadores. **Boletim informativo da SBCS**, Campinas, p. 38-43, jan./abr. 2009. Disponível em: <https://ppbio.inpa.gov.br/sites/default/files/aimportanciadamesoemacrofaunadosolo.pdf>. Acesso em: 15 fev. 2017

MELO, L. A. S.; SILVA, J. R. **Método de isca para avaliação populacional de cupins subterrâneos como indicadores de impactos ambientais**. Jaguariúna, SP: Embrapa Meio Ambiente, dez. 2008. (Comunicado técnico, 48).

MELO, V. F.; MATTOS, J. M. S. M.; LIMA, V. C. Métodos de concentração de minerais 2:1 secundários na fração argila visando sua identificação por difratometria de raios x. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, MG, v. 33, n. 3, p. 527-539, 2009.

MELO, V. F.; WYPYCH, F. VII - Caulinita e haloisita. *In*: MELO, V. F.; ALLEONI, L. R. F. (org). **Química e mineralogia do solo – Parte I – Conceitos básicos**. Viçosa – MG: Sociedade Brasileira de Ciências do Solo, 2009. v. 1, cap. 7, p. 427-504.

MEUNIER, A. Soil hydroxy-interlayered minerals: a re-interpretation of their crystallo chemical properties. **Clays & Clay Mineral**, Long Island City, v. 55, p. 380–388, 2007.

MEUNIER, A.; VELDE, B. **Illite**: origins, evolution and metamorphism. Berlin: Springer, 2004. 286 p.

MIKLÓS, A. A. W. Biogênese do solo. **Revista do Departamento de Geografia – USP**, São Paulo, p. 190-229, 2012. Volume especial: 30 anos.

MIURA, T.; MATSUMOTO, T. Open-air litter foraging in the nasute térmita *Longipeditermes longipes* (Isoptera: Termitidae). **Journal of Insect Behavior**, New York, v. 11, n. 2, p. 179-189, 1997.

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

MOE, S. R.; MOBÆK, R.; NARMO, A. K. Mound building térmites contribute to savanna vegetation heterogeneity. **Plant Ecology**, Dordrecht, v. 202, p. 31–40, 2009.

MONTAGNINI, F.; SANCHO, F. Nutrient budgets of young plantations with native trees: strategies for sustained management. *In*: BENTTLEY, W.; GOWEN, M. (ed.). **Forest resources and wood-based biomass energy as rural development assets**. New Delli: Winrock International; Oxford: IBH Publishing, 1994. p. 213-233.

MOREIRA, F. M. S.; SIQUEIRA, J. O. **Microbiologia e bioquímica do solo**. 2. ed. Lavras: UFLA, 2006. 729 p.

NAHON, D. B. **Introduction to the petrology of soils and chemical weathering**. New York: John Wiley, 1991. 313 p.

NITZSCHE, R. P. *et al.* X-ray diffraction and infrared characterization of Oxisols from central and southeastern Brazil. **Clay Minerals**, Oxford, v. 43, n. 4, p. 549–560, 2008.

OFFICER, S. J. *et al.* Variability of clay mineralogy in two New Zealand steep-landtopsoils under pasture. **Geoderma**, Amsterdam, v. 132, n. 3/4, p. 427–440, 2006.

OLIVEIRA F. S. *et al.* The role of biological agents in the microstructural and mineralogical transformations in aluminium lateritic deposit in Central Brazil. **Geoderma**, Amsterdam, v. 226, p. 250-259, 2014.

PARREIRA, P. S. **Metodologia de EDXRF e aplicações com um sistema portátil**. Londrina: UEL/LFNATEC, 2006.

PAUL, R. *et al.* X-ray crystallinity of different soil nanoclays in relation to phosphatase adsorption. **Applied Clay Science**, Amsterdam, v. 114, p. 19-25, 2017.

QUIRK, J. P. Significance of surface areas calculated from water vapour sorption isotherms by use of the BET equation. **Soil Science**, Brunswick, v. 80, n. 6, p. 423-430, 1955.

RAMOS, P. V. **Atributos dos solos do rio grande do sul estimados por espectroscopia de refletância difusa e suscetibilidade magnética**. 2019. 74 f. Tese (Doutorado em Ciência do Solo) - Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo, Faculdade de Agronomia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2019.

REDFORD, K. H. The termitaria of *Cornitermes cumulans* (Isoptera, Termitidae) and their role in determining a potential keystone species. **Biotropica**, Washington, DC, v.16, n. 2, p.112-119, 1984.

RESENDE, P. B. **Hábitos alimentares de cupins sul-americanos da família Termitidae (Insecta: Isoptera)**. 2012. 54 f. Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-Graduação em Biologia Animal, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 2012.

RESENDE, M. *et al.* **Mineralogia de solos brasileiros: interpretação e aplicações**. Lavras: UFLA, 2005. 192 p.

RICH, C. I. Hydroxy interlayers in expansible layer silicates. **Clays and Clay Minerals**, Long Island City, v. 16, p.15–30, 1968.

ROSENBERG, D. M.; DANKS, H. V.; LEHMKUHL, D. M. Importance of insects in environmental impact assessment. **Environmental Management**, New York, v. 10, n. 6, p. 773-783, 1986.

RÜCKAMP, D. *et al.* Soil genesis and heterogeneity of phosphorus forms and carbon below mounds inhabited by primary and secondary termites. **Geoderma**, Amsterdam, v. 170, p. 239–250, 2012.

SANTOS, D. M. S. O potencial de aplicação da espectroscopia Raman na criminalística. **Actas de Ciências & Saúde**, Taguatinga Sul, v. 2, n. 5, p. 1-12, 2016.

SANTOS, H. G. *et al.* **Sistema brasileiro de classificação de solos**. 3. ed. Rio de Janeiro: EMBRAPA Solos, 2013.

SCHAEFER, C. E. G. R.; FABRIS, J. D.; KER, J. C. Minerals in the clay fraction of Brazilian Latosols (Oxisols): a review. **Clay Minerals**, London, v. 43, n. 1, p. 137–154, 2008.

SCHWERTMANN, U. Solubility and dissolution of iron oxides. **Plant Soil**, The Hague, v. 130, p. 1-25, 1991.

SCHWERTMANN, U. Differenzierung der Eisenoxide des Bodens durch Extraktion mit Ammoniumoxalat-Lösung. **Zeitschrift für Pflanzenernährung und Bodenkunde**, Weinheim, v. 105, n. 3, p. 194-202, 1964.

SFB - SERVIÇO FLORESTAL BRASILEIRO. **Florestas naturais**. Brasília, DF, 2020. Disponível em: <http://snif.florestal.gov.br/pt-br/os-biomas-e-suas-florestas>. Acesso em: 6 jan. 2020.

SILVA NETO, L. F. *et al.* Óxidos de ferro em latossolos tropicais e subtropicais brasileiros em plantio direto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, MG, v. 32, n. 5, p. 1873-1881, 2008.

SILVA, L. F. *et al.* Genesis, morphology and mineralogy of Planosols developed from different parent materials in southern Brazil. **Geoderma**, Amsterdam, v. 341, p. 46–58, 2019.

SOUZA, O.; BROWN, W. L. Effects of habitat fragmentation on Amazonian termite communities. **Journal of Tropical Ecology**, Cambridge, v. 10, n. 2, p. 197-206, 1994.

SPARKS, D. L. **Potassium dynamic in soils**. New York: Springer-Verlag, 1987. 63 p.

STEFFEN, G. P. K. Importância ecológica e ambiental das minhocas. **Revista de Ciências Agrárias**, Belém, v. 36, n. 2, p. 137-147, 2013.

STOOPS, G. **Guidelines for analysis and description of soil and regolith thin sections**. Madison: Soil Science Society of America, 2003. 184 p.

STOOPS, G.; MARCELINO, V.; MEES, F. **Interpretation of micromorphological features of soils and regoliths**. Amsterdam: Elsevier, 2010. 720 p.

STORK, N. E.; EGGLETON, P. Invertebrates as determinants and indicators of soil quality. **American Journal of Alternative Agriculture**, Greenbelt, v. 7, n. 1/2, p. 38-47, 1992.

SUSARLA, S.; MEDINA, V. F.; MCCUTCHEON, S. C. Phytoremediation: an ecological solution to organic chemical contamination. **Ecological Engineering**, Amsterdam, v. 18, n. 5, p. 647-658, 2002.

TEDESCO, M. J. *et al.* **Análise de solo, plantas e outros materiais**. 2. ed. Porto Alegre: Departamento de Solos/UFRGS, 1995. 174 p.

TESTONI, S. A. *et al.* Clay mineralogy of brazilian oxisols with shrinkage properties. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, MG, v. 41, [art.] e0160487, 2017.

THOMANZINI, M. J.; THOMANZINI, A. P. B. W. **Levantamento de insetos e análise entomofaunística em floresta, capoeira e pastagem no sudeste Acreano**. Rio Branco: Embrapa Acre, 2002. (Circular Técnica, v. 35).

TOMASI, C. A. *et al.* Atributos químicos e área superficial específica em Latossolo subtropical de altitude sob usos e manejos distintos. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 42, p. 2172-2179, 2012.

TORRENT, J.; BARRÓN, V. Diffuse reflectance spectroscopy. *In*: ULERY, A. L.; DREES, L. R. (ed.). **Methods of soil analysis. Part 5. Mineralogical methods**. Madison: Soil Science Society of America, 2008. p. 367-385.

TORRENT, J. *et al.* Magnetic enhancement is linked to and precedes hematite formation in aerobic soil. **Geophysical Research Letters**, Washington, DC, v. 33, [art.] L02401, 2006.

TORRENT, J.; V. BARRÓN. Laboratory measurement of soil color: theory and practice. *In*: BIGHAM, J. M.; CIOLKOSZ, E. J. (ed.) **Soil color**. Madison: Soil Science Society of America, 1993. v. 31, p. 21–33.

TORRENT, J. *et al.* Iron oxide mineralogy of some soils of two river terrace sequences in Spain. **Geoderma**, Amsterdam, v. 23, p. 191–208, 1980.

TRAORÉ, S. *et al.* Long-term effects of macrotermes termites, herbivores and annual early fire on woody undergrowth community in Sudanian woodland, Burkina Faso. **Flora - Morphology, Distribution, Functional Ecology of Plants**, Jena, v. 211, p. 40–50, 2015.

TRAOR, S. *et al.* Macrotermes mounds as sites for tree regeneration in a Sudanian woodland (Burkina Faso). **Plant Ecology**, Dordrecht, v. 198, p. 285–295, 2008.

TYE, A. M.; KEMPA, S. J.; POULTONB, P. R. Responses of soil clay mineralogy in the Rothamsted classical experiments in relation to management practice and changing land use. **Geoderma**, Amsterdam, v. 153, n. 1/2, p. 136–146, 2009.

VALÉRIO, J. R. **Cupins-de-montículo em pastagens**. Campo Grande, MS: Embrapa Gado de Corte, 2006.

VALÉRIO, J. R. Ocorrência, danos e controle de cupins de montículo em pastagens. *In*: REUNIÃO SUL-BRASILEIRA DE INSETOS DE SOLO, 5., 1995, Dourados. **Ata e resumos**. Dourados: Embrapa-CPAO, 1995. p. 33-36.

VARAJÃO, A. F. D. *et al.* The relationships between kaolinite crystal properties and the origin of materials for a brazilian kaolin deposit. **Clays and Clay Minerals**, Long Island City, v. 49, p. 44-59, 2001.

VASCONCELLOS, A. *et al.* Térmitas construtores de ninhos conspícuos em duas áreas de mata atlântica com diferentes níveis de perturbação antrópica. **Neotropical Entomology**, Londrina, v. 37, n. 1, p. 15-19, 2008.

VASCONCELOS, Y. Como é a vida num cupinzeiro. **Superinteressante**, São Paulo, 2011. Disponível em: <https://megaarquivo.wordpress.com/2014/03/04/9883-o-cupinzeiro/>. Acesso em: 5 fev. 2017.

VISCARRA ROSSEL *et al.* Visible, near infrared, mid infrared or combined diffuse reflectance spectroscopy for simultaneous assessment of various soil properties. **Geoderma**, Amsterdam, v. 131, p. 59–75, 2006.

VISCARRA ROSSEL, R. A. *et al.* Proximal sensing of soil pH and lime requirement by mid infrared diffuse reflectance spectroscopy. *In: EUROPEAN CONFERENCE ON PRECISION AGRICULTURE – ECPA*, 3., 2001, Montpellier, França. **Proceedings** [...]. Montpellier: Ecole Nationale Supérieure Agronomique de Montpellier, 2001. v. 1, p. 497–502.

WIEWIORA, A. A mixed layer kaolinite-smectite from Lower Silesia, Poland. **Clays and Clay Minerals**, Long Island City, v. 19, p. 415-416, 1971.

WILKE, B. M. *et al.* Clay mineralogy of a soil sequence in slope deposits derived from Hauptdolomit (dolomite) in the Bavarian Alps. **Geoderma**, Amsterdam, v. 32, p. 103–116, 1984.

WINK, C. *et al.* Insetos edáficos como indicadores da qualidade ambiental. **Revista de Ciências Agroveterinárias**, Lages, v. 4, n. 1, p. 60-71, 2005.

YONG-GUAN, Z.; JIA-XIAN, L. Release of soil nonexchangeable K by organic acids. **Pedosphere**, Beijing, v. 3, n. 3, p. 269-273, 1993.