



UNIVERSIDADE FEDERAL DE GOIÁS
ESCOLA DE AGRONOMIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM AGRONOMIA
ÁREA DE CONCENTRAÇÃO: SOLO E ÁGUA

FEIÇÕES REDOXIMÓRFICAS, MICROMORFOLOGIA E ENDURECIMENTO
DA PLINTITA EM SOLOS DA PLANÍCIE DO RIO ARAGUAIA, BRASIL

DJAVAN PINHEIRO SANTOS

Orientador:

Prof. Dr. Glenio Guimarães Santos

GOIÂNIA
Julho – 2020



UFG

UNIVERSIDADE FEDERAL DE GOIÁS
ESCOLA DE AGRONOMIA

TERMO DE CIÊNCIA E DE AUTORIZAÇÃO (TECA) PARA DISPONIBILIZAR VERSÕES ELETRÔNICAS DE TESES

E DISSERTAÇÕES NA BIBLIOTECA DIGITAL DA UFG

Na qualidade de titular dos direitos de autor, autorizo a Universidade Federal de Goiás (UFG) a disponibilizar, gratuitamente, por meio da Biblioteca Digital de Teses e Dissertações (BDTD/UFG), regulamentada pela Resolução CEPEC nº 832/2007, sem ressarcimento dos direitos autorais, de acordo com a [Lei 9.610/98](#), o documento conforme permissões assinaladas abaixo, para fins de leitura, impressão e/ou download, a título de divulgação da produção científica brasileira, a partir desta data.

O conteúdo das Teses e Dissertações disponibilizado na BDTD/UFG é de responsabilidade exclusiva do autor. Ao encaminhar o produto final, o autor(a) e o(a) orientador(a) firmam o compromisso de que o trabalho não contém nenhuma violação de quaisquer direitos autorais ou outro direito de terceiros.

1. Identificação do material bibliográfico

☐ Dissertação ☒ Tese

2. Nome completo do autor

Djavan Pinheiro Santos

3. Título do trabalho

Feições redoximórficas, micromorfologia e endurecimento da plintita em solos da planície do rio Araguaia, Brasil

4. Informações de acesso ao documento (este campo deve ser preenchido pelo orientador)

Concorda com a liberação total do documento ☒ SIM ☐ NÃO¹

[1] Neste caso o documento será embargado por até um ano a partir da data de defesa. Após esse período, a possível disponibilização ocorrerá apenas mediante:

- a) consulta ao(à) autor(a) e ao(à) orientador(a);
b) novo Termo de Ciência e de Autorização (TECA) assinado e inserido no arquivo da tese ou dissertação.

O documento não será disponibilizado durante o período de embargo.

Casos de embargo:

- Solicitação de registro de patente;
- Submissão de artigo em revista científica;
- Publicação como capítulo de livro;
- Publicação da dissertação/tese em livro.

Obs. Este termo deverá ser assinado no SEI pelo orientador e pelo autor.



Documento assinado eletronicamente por **DJAVAN PINHEIRO SANTOS, Discente**, em 27/01/2022, às 11:02, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no § 3º do art. 4º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Glenio Guimarães Santos, Professor do Magistério Superior**, em 27/01/2022, às 18:21, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no § 3º do art. 4º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site https://sei.ufg.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0, informando o código verificador **2652014** e o código CRC **8F407D9C**.

DJAVAN PINHEIRO SANTOS

**FEIÇÕES REDOXIMÓRFICAS, MICROMORFOLOGIA E ENDURECIMENTO
DA PLINTITA EM SOLOS DA PLANÍCIE DO RIO ARAGUAIA, BRASIL**

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Agronomia, da Universidade Federal de Goiás, como requisito parcial à obtenção do título de Doutor em Agronomia.

Área de concentração: Solo e Água

Orientador:

Prof. Dr. Glenio Guimarães Santos

Co-orientador:

Dr. Virlei Álvaro de Oliveira

Goiânia, GO – Brasil

2020

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor, através do Programa de Geração Automática do Sistema de Bibliotecas da UFG.

Santos, Djavan Pinheiro

FEIÇÕES REDOXIMÓRFICAS, MICROMORFOLOGIA E
ENDURECIMENTO DA PLINTITA EM SOLOS DA PLANÍCIE DO RIO
ARAGUAIA, BRASIL. [manuscrito] / Djavan Pinheiro Santos. - 2020.
153 f.: il.

Orientador: Prof. Dr. Glenio Guimarães Santos; co-orientador Dr.
Virlei Álvaro de Oliveira.

Tese (Doutorado) - Universidade Federal de Goiás, Escola de
Agronomia (EA), Programa de Pós-Graduação em Agronomia, Goiânia,
2020.

Bibliografia.

Inclui mapas, fotografias, gráfico, tabelas, lista de figuras, lista de
tabelas.

1. Hematita. 2. Goethita. 3. Planície de inundação. 4. Óxidos de ferro.
I. Guimarães Santos, Glenio, orient. II. Título.

CDU 631/635



UNIVERSIDADE FEDERAL DE GOIÁS

ESCOLA DE AGRONOMIA

ATA DE DEFESA DE TESE

Ata Nº 138/2020 da sessão de Defesa de Tese de **Djavan Pinheiro Santos** que confere o título de Doutor em **AGRONOMIA**, na área de concentração em Solo e Água.

Aos dezessete dias do mês de julho do ano de dois mil e vinte, a partir das catorze horas, por meio de videoconferência, realizou-se a sessão pública de Defesa de Tese intitulada “**Constituição elementar de feições redoximórficas, morfologia e prováveis causas do endurecimento da plintita em Plintossolos da planície do Rio Araguaia, Brasil**”. Os trabalhos foram instalados pelo Orientador, **Prof. Glenio Guimarães Santos - EA/UFG** com a participação dos demais membros da Banca Examinadora: **Prof. Leonardo Santos Collier - EA/UFG**, membro titular interno; **Prof. Virlei Álvaro de Oliveira - IBGE**, membro titular externo; **Prof. Marcos Gervásio Pereira - UFRRJ/RJ**, membro titular externo; **Prof. Valdomiro Severino de Souza Júnior - UFRPE/PE**, membro titular externo. Durante a arguição os membros da banca fizeram sugestão de alteração do título do trabalho. A Banca Examinadora reuniu-se em sessão secreta a fim de concluir o julgamento da Tese tendo sido o candidato **aprovado** pelos seus membros. Proclamados os resultados pelo **Prof. Glenio Guimarães Santos**, Presidente da Banca Examinadora, foram encerrados os trabalhos e, para constar, lavrou-se a presente ata que é assinada pelos Membros da Banca Examinadora, aos dezessete dias do mês de julho do ano de dois mil e vinte.

TÍTULO SUGERIDO PELA BANCA

Feições redoximórficas, micromorfologia e endurecimento da plintita em solos da planície do rio Araguaia, Brasil.



Documento assinado eletronicamente por **Glenio Guimarães Santos, Professor do Magistério Superior**, em 01/02/2022, às 09:54, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no § 3º do art. 4º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Rilner Alves Flores, Vice-Coordenador**, em 02/02/2022, às 14:58, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no § 3º do art. 4º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Leonardo Santos Collier, Professor do Magistério Superior**, em 03/02/2022, às 15:56, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no § 3º do art. 4º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site https://sei.ufg.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0, informando o código verificador 2662533 e o código CRC CAE1ABB2.

Referência: Processo nº 23070.031729/2020-51

SEI nº 2662533

Aos meus pais Djalma de Sousa Santos (*In memorian*) e Maria do Socorro Pinheiro Santos

Aos meus irmãos Danilo Pinheiro Santos e Darlan Pinheiro Santos

A minha esposa Bárbara Soares Ferreira

A minha filha Ísis Kauanne Soares Santos

A todos da minha família que me apoiaram

DEDICO

Aos que depositaram confiança em mim

Ao Prof. Dr. Glenio Guimarães Santos

A todos que colaboraram para o sucesso deste trabalho

OFEREÇO

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus, por ter me concedido força e sabedoria, por iluminar o meu caminho durante esta longa caminhada; a toda minha família, em especial minha mãe Maria do Socorro Pinheiro Santos, meu pai Djalma de Sousa Santos (*in memorian*) e meus irmãos, Danilo Pinheiro Santos e Darlan Pinheiro Santos, a minha filha Ísis Kauanne Soares Santos, exemplos de vida, determinação, perseverança e companheirismo em todos os momentos difíceis da minha vida; ao padrinho João Luiz pelo apoio e incentivo para continuar batalhando; aos orientadores Drs. Glenio Guimarães Santos e Virlei Álvaro de Oliveira, pelos valiosos ensinamentos, contribuindo para o meu crescimento profissional; a Universidade Federal de Goiás (UFG), Campus Samambaia, a Universidade Estadual de Santa Catarina, Universidade do Estado de São Paulo (USP), a Universidade Federal Rural de Pernambuco e Embrapa Solos, por disponibilizar laboratórios e desenvolvimento de análises e a todos os docentes e discentes que contribuíram para minha formação e conhecimentos compartilhados; ao ICMBio e Projeto Luís Alves pelo apoio no projeto de campo e a todos os colegas de pesquisa que me ajudaram nos trabalhos práticos e científicos, Gustavo Cassiano da Silva, Lucas Pergentino Brandão e Rafael Almeida Ferreira, pelo companheirismo de batalha para obtenção de dados para a realização da Tese e a todos os demais alunos e companheiros de Pós-Graduação pelos momentos e convivência durante todo o curso que sempre se mostraram unidos e torcendo para que tudo desse certo para todos; a todas as pessoas que de alguma forma colaboraram para a realização deste trabalho e para mais uma conquista.

Muito obrigado a todos.

SUMÁRIO

LISTA DE TABELAS.....	13
LISTA DE FIGURAS.....	14
RESUMO GERAL.....	18
GENERAL ABSTRACT.....	19
1 INTRODUÇÃO GERAL.....	20
2 REVISÃO DE LITERATURA.....	24
2.1 BACIAS HIDROGRÁFICAS DO ARAGUAIA E DO JOÃO LEITE	24
2.2 GEOLOGIA DA BACIA HIDROGRÁFICA DO ARAGUAIA	26
2.3 GEOMORFOLOGIA DA BACIA HIDROGRÁFICA DO ARAGUAIA.....	40
2.4 PAISAGEM DO VALE DO ARAGUAIA E DA PLANÍCIE DO JOÃO LEITE.....	44
2.5 FEIÇÕES REDOXIMÓRFICAS.....	46
2.5.1 Mosqueado.....	47
2.5.2 Plintita.....	48
2.5.3 Petroplintita.....	49
2.5.4 Condições de transporte e enriquecimento/acumulação de sesquióxidos nas feições redoximórficas.....	49
2.6 REFERÊNCIAS.....	50
3 CONSTITUIÇÃO QUÍMICA E MINERALÓGICA DE FEIÇÕES REDOXIMÓRFICAS, DINÂMICA DO ELEMENTO FERRO E MECANISMO DE FORMAÇÃO DE PLINTOSSOLOS DA PLANÍCIE DO RIO ARAGUAIA.....	58
3.1 INTRODUÇÃO.....	60
3.2 MATERIAL E MÉTODOS.....	62
3.2.1 Localização da área de estudo.....	62
3.2.2 Seleção de posições de coletas nos perfis, amostragens e preparação das feições redoximórficas para análises.....	64
3.2.3 Análise de espectrometria de fluorescência de raios-X.....	65
3.2.4 Análise por ataque ácido sulfúrico.....	66

3.2.5	Análise para extração de ferro: ditionito-citrato-bicarbonato de sódio e oxalato ácido de amônio.....	66
3.2.6	Análise por difração de raios-X.....	66
3.2.7	Estatística.....	67
3.3	RESULTADOS.....	67
3.3.1	Constituição química das diferentes feições redoximórficas e formas de ferro presentes.....	67
3.3.2	Teores médios de ferro determinados por diferentes métodos nas feições redoximórficas.....	69
3.3.3	Identificação por DRX dos minerais presentes na fração argila das diferentes feições redoximórficas.....	70
3.3.4	Distribuição dos teores dos principais elementos químicos obtidos por ataque ácido sulfúrico e valores de Ki e Kr nas diferentes feições e posições amostradas em cada perfil de solo.....	72
3.3.5	Dinâmica do elemento ferro nas feições matriz do solo e plintita em diferentes posições nos perfis.....	74
3.4	DISCUSSÃO.....	76
3.4.1	Constituição química e quantitativos de ferro das diferentes feições redoximórficas.....	76
3.4.2	Formas de ferro presentes nas diversas feições.....	78
3.4.3	Identificação dos minerais presentes nas diferentes feições.....	80
3.4.4	Dinâmica do elemento ferro na feição plintita em diferentes posições dos perfis de solo.....	81
3.4.5	Mecanismos de formação das feições redoximórficas	83
3.5	CONCLUSOES.....	86
3.6	REFERÊNCIAS.....	86
4	PROVÁVEIS CAUSAS DO ENDURECIMENTO DE FEIÇÕES REDOXIMÓRFICAS EM PLINTOSSOLOS DA REGIÃO CENTRAL DO BRASIL.....	93
4.1	INTRODUÇÃO.....	95
4.2	MATERIAL E MÉTODOS.....	96
4.2.1	Localização da área de estudo.....	96

4.2.2	Seleção de locais, amostragens e preparação das feições redoximórficas para análises.....	99
4.2.3	Análise de espectrometria de fluorescência de raios-X.....	100
4.2.4	Análise por ataque ácido sulfúrico.....	100
4.2.5	Análise para extração de ferro (fed e feo) e alumínio (ald e alo): ditionito-citrato-bicarbonato de sódio e oxalato ácido de amônio...	101
4.2.6	Análise por difração de raios-X.....	101
4.2.7	Análise estatística.....	102
4.3	RESULTADOS.....	102
4.3.1	Difratogramas de raios-X (DRX) obtidos em amostras naturais das feições redoximórficas.....	102
4.3.2	Teores e formas de ferro detectados nas feições redoximórficas em função da força de compressão aplicada e dos tratamentos de umedecimento e secagem.....	104
4.4	DISCUSSÃO.....	108
4.4.1	Prováveis causas do endurecimento de algumas feições redoximórficas	108
4.4.2	Influência da presença em quantidade e formas de ferro no processo de endurecimento das feições redoximórficas.....	110
4.4.3	Influência do grau de cristalinidade dos componentes oxídicos no endurecimento ou na estabilidade das feições redoximórficas.....	113
4.4.4	Causas do endurecimento das plintitas.....	114
4.5	CONCLUSOES.....	115
4.6	REFERÊNCIAS.....	116
5	MICROMORFOLOGIA, CONSTITUIÇÃO QUÍMICA E FORMAÇÃO DE PLINTITAS EM PLINTOSSOLOS DA PLANÍCIE DO RIO ARAGUAIA.....	120
5.1	INTRODUÇÃO.....	121
5.2	MATERIAL E MÉTODOS.....	122
5.2.1	Os solos.....	122
5.2.2	Micromorfologia do solo.....	123
5.2.3	Constituição química e mineralógica das feições redoximórficas...	125

5.2.3.1	Amostragem.....	125
5.2.3.2	Testes de força de compressão.....	127
5.2.3.3	Análise por ataque ácido sulfúrico (Fes)	127
5.2.3.4	Análise por ditionito-citrato-bicarbonato de sódio (Fed) e oxalato ácido de amônio (Feo)	127
5.2.3.5	Análise por difração de raios-X.....	127
5.2.4	Análise estatística.....	128
5.3	RESULTADOS.....	128
5.3.1	Análise granulométrica.....	128
5.3.2	Micromorfologia de feições redoximórficas.....	129
5.3.3	Determinações analíticas das formas de ferro.....	134
5.3.4	Identificação dos minerais presentes nas diferentes feições.....	138
5.4	DISCUSSÃO.....	140
5.4.1	Disposição macromorfológica das feições redoximórficas nos perfis.....	140
5.4.2	Micromorfologia das feições redoximórficas nos perfis.....	142
5.4.3	Formas de ferro presentes nas diversas feições.....	145
5.4.4	Identificação dos minerais presentes nas diferentes feições.....	145
5.4.5	Teores do elemento ferro na feição plintita em diferentes posições dos perfis.....	146
5.4.6	Relações micromorfologia <i>versus</i> constituição química e condição atual da feição plintita.....	147
5.5	CONCLUSOES.....	149
5.6	REFERÊNCIAS.....	149
6	CONCLUSOES GERAIS.....	153

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1.	Representatividade das Unidades Geológicas ⁽¹⁾ do segmento da bacia hidrográfica Alto Araguaia, com respectivos tempos geológicos e Províncias Geológicas.....	28
Tabela 2.2.	Representatividade das Unidades Geológicas ⁽¹⁾ do segmento da bacia hidrográfica Médio Araguaia, com respectivos tempos geológicos e Províncias Geológicas.....	33
Tabela 2.3.	Representatividade das Unidades Geológicas ⁽¹⁾ do segmento da bacia hidrográfica Baixo Araguaia, com respectivos tempos geológicos e Províncias Geológicas.....	37
Tabela 2.4.	Representatividade das Unidades Geológicas ⁽¹⁾ da bacia hidrográfica João Leite, com respectivos tempos geológicos e Províncias Geológicas.....	40
Tabela 3.1.	Constituição química total das feições redoximórficas, determinada por fluorescência de raios-X (FRX).....	68
Tabela 3.2.	Caracterização dos principais elementos químicos das feições redoximórficas determinados por ataque ácido sulfúrico.....	68
Tabela 3.3.	Teores médios de ferro ⁽¹⁾ da feições redoximórficas determinados por ataque ácido sulfúrico (Fes) ditionito-citrato-bicarbonato de sódio (Fed) e oxalato ácido de amônio (Feo) e suas relações (Feo/Fed).....	69
Tabela 4.1.	Teores médios de ferro obtidos em conjuntos de amostras de feições redoximórficas em condições naturais por diferentes métodos de análises.....	105
Tabela 5.1.	Distribuição granulométrica e classe textural dos solos.....	129
Tabela 5.2.	Descrição micromorfológica de amostras de horizontes representativos que apresentam feições redoximórficas de Plintossolos da planície do Rio Araguaia.....	129
Tabela 5.3.	Teores médios de ferro da feições redoximórficas determinados por ditionito-citrato-bicarbonato de sódio (Fed) e oxalato ácido de amônio (Feo) e suas relações.....	134
Tabela 5.4.	Teores de ferro ⁽¹⁾ obtidos em conjuntos de amostras de plintita após separadas por dureza medida por testes de compressão (CS) nas diferentes posições de cada perfil de solo.....	136

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1.	Bacia hidrográfica do Araguaia segmentada em: Alto Araguaia, Médio Araguaia e Baixo Araguaia. Fonte do banco de dados de bacias hidrográficas: ANA (2016). Software usado para confecção dos mapas: QGIS 3.22.0 (2021).....	25
Figura 2.2.	Bacia hidrográfica do João Leite. Fonte do banco de dados de bacias hidrográficas: SIEG (2021). Software usado para confecção dos mapas: QGIS 3.22.0 (2021).....	26
Figura 2.3.	Geologia do segmento da bacia hidrográfica do Alto Araguaia. Fonte do banco de dados: de bacias hidrográficas (ANA, 2016); de geologia (IBGE, 2021). Software usado para confecção dos mapas: QGIS 3.22.0 (2021).....	27
Figura 2.4.	Geologia do segmento da bacia hidrográfica do Médio Araguaia. Fonte do banco de dados: de bacias hidrográficas (ANA, 2016); de geologia (IBGE, 2021). Software usado para confecção dos mapas: QGIS 3.22.0 (2021).....	32
Figura 2.5.	Geologia do segmento da bacia hidrográfica do Baixo Araguaia. Fonte do banco de dados: de bacias hidrográficas (ANA, 2016); de geologia (IBGE, 2021). Software usado para confecção dos mapas: QGIS 3.22.0 (2021).....	36
Figura 2.6.	Geologia da bacia hidrográfica do João Leite. Fonte do banco de dados: de bacias hidrográficas (SIEG, 2021); de geologia (IBGE, 2021). Software usado para confecção dos mapas: QGIS 3.22.0 (2021).....	39
Figura 2.7.	Geomorfologia do segmento da bacia hidrográfica do Alto Araguaia. Fonte do banco de dados: de bacias hidrográficas (ANA, 2016); de geomorfologia (IBGE, 2021). Software usado para confecção dos mapas: QGIS 3.22.0 (2021).....	41
Figura 2.8.	Geomorfologia do segmento da bacia hidrográfica do Médio Araguaia. Fonte do banco de dados: de bacias hidrográficas (ANA, 2016); de geomorfologia (IBGE, 2021). Software usado para confecção dos mapas: QGIS 3.22.0 (2021).....	42
Figura 2.9.	Geomorfologia do segmento da bacia hidrográfica do Baixo Araguaia. Fonte do banco de dados: de bacias hidrográficas (ANA, 2016); de geomorfologia (IBGE, 2021). Software usado para confecção dos mapas: QGIS 3.22.0 (2021).....	43
Figura 2.10.	Geomorfologia da bacia hidrográfica do João Leite. Fonte do banco de dados: de bacias hidrográficas (SIEG, 2021); de geomorfologia (IBGE, 2021). Software usado para confecção dos mapas: QGIS 3.22.0 (2021).....	44
Figura 3.1.	Localização de perfis de solos da planície do Rio Araguaia, Goiás, Brasil.....	63
Figura 3.2.	Esquema de coletas de amostras de feições redoximórficas dos perfis de solos P1 e P2. Pst: Posição.....	64
Figura 3.3.	Feições redoximórficas de Plintossolos da planície do Rio Araguaia. A: matriz do solo; B: mosqueado; C: plintita.....	65

Figura 3.4.	Valores médios do elemento ferro extraídos por diferentes métodos nas feições redoximórficas dos perfis estudados. Fet: fluorescência de raios-X; Fes: ataque ácido sulfúrico; Fed: ditionito-citrato-bicarbonato de sódio; Feo: oxalato ácido de amônio. As barras de erros referem-se à variabilidade amostral em porcentagem (5% de significância).....	70
Figura 3.5.	Difratogramas de raios-X da fração argila desferrificadas, tratadas e orientadas das feições redoximórficas dos perfis. As amostras foram saturadas com potássio (K) à temperatura ambiente 25°C (K25), aquecidas a 350°C (K350) e 550°C (K550) e saturadas com magnésio (Mg) e magnésio+glicerol (Mg-Gli).....	71
Figura 3.6.	Difratogramas de raios-X de amostras fragmentadas pelo aparelho Instron, trituradas e moídas até ficarem na forma de pó (powder), não orientadas e não tratadas da fração argila das feições redoximórficas dos dois perfis (P1 e P2). K: caulinita; Gb: gibbsita; Gh: goethita, Hm: hematita. MA: matriz do solo; MO: mosqueado; PL: plintita.....	72
Figura 3.7.	Teores de óxidos de silício (SiO ₂), alumínio (Al ₂ O ₃), ferro (Fe ₂ O ₃ ou Fes) e índices Ki e Kr obtidos em diferentes posições (Pst) das feições redoximórficas do perfil P1.....	73
Figura 3.8.	Teores de óxidos de silício (SiO ₂), alumínio (Al ₂ O ₃), ferro (Fe ₂ O ₃ ou Fes) e índices Ki e Kr obtidos em diferentes posições (Pst) das feições redoximórficas do perfil P2.....	74
Figura 3.9.	Teores de ferro obtidos por ataque ácido sulfúrico (Fes), ditionito citrato-bicarbonato de sódio (Fed), oxalato ácido de amônio (Feo) e relação Fed/Fes obtidos em diferentes posições (Pst) das feições matriz do solo e plintita do perfil P1.....	75
Figura 3.10.	Teores de ferro obtidos por ataque ácido sulfúrico (Fes), ditionito citrato-bicarbonato de sódio (Fed), oxalato ácido de amônio (Feo) e relação Fed/Fes obtidos em diferentes posições (Pst) das feições matriz do solo e plintita do perfil P2.....	76
Figura 3.11.	Detalhe de tubos de fluxo de água “pipe” presentes nos horizontes plínticos dos perfis P1 e P2.....	85
Figura 4.1.	Localização dos perfis de solo na planície do rio Araguaia e planície do rio João Leite, Brasil.....	97
Figura 4.2.	Esquema de coleta das feições redoximórficas nos perfis de solo P1, P2, P3 e P4. Pst: posição.....	98
Figura 4.3.	Difratogramas de raios-X obtidos em amostras naturais das frações argila+silte na forma de pó, da matriz, do mosqueado, da plintita e da TFSA, coletadas nas posições Pst3 e Pst4 dos perfis.....	103
Figura 4.4.	Difratogramas de raios-X da argila em amostras orientadas, tratadas com potássio a 25, 350 e 550 °C e saturadas com magnésio à temperatura ambiente, de plintitas das posições Pst3 e Pst4 dos perfis P1 e P2, da planície do rio Araguaia.....	104
Figura 4.5.	Teores de ferro (Fe) dos horizontes plínticos: inicial, principal e de base, obtidos por diferentes metodologias em amostras de plintitas após submetidas à forças de compressão (CS). Fes: ferro extraído por ataque ácido sulfúrico; Fed: ferro extraído por ditionito-citrato-bicarbonato de sódio; Feo: ferro extraído por oxalato ácido de	

	amônio. Após realizado os testes de força de compressão por posição (Pst), alguns conjuntos de amostras não ofereceram quantidade de material suficiente para realização das análises dos teores de ferro.....	106
Figura 4.6.	Teores de ferro (Fe) dos horizontes plínticos: inicial, principal e de base, obtidos por diferentes metodologias em amostras de plintitas após submetidas à forças de compressão (CS). Fes: ferro extraído por ataque ácido sulfúrico; Fed: ferro extraído por dititionito-citrato-bicarbonato de sódio; Feo: ferro extraído por oxalato ácido de amônio. Após realizado os testes de força de compressão por posição (Pst), alguns conjuntos de amostras não ofereceram quantidade de material suficiente para realização das análises dos teores de ferro.....	107
Figura 4.7.	Teores de ferro (Fe) dos horizontes plínticos: inicial, principal e de base, obtidos por diferentes metodologias em amostras de plintitas após submetidas à forças de compressão (CS). Fes: ferro extraído por ataque ácido sulfúrico; Fed: ferro extraído por dititionito-citrato-bicarbonato de sódio; Feo: ferro extraído por oxalato ácido de amônio. Após realizado os testes de força de compressão por posição (Pst), alguns conjuntos de amostras não ofereceram quantidade de material suficiente para realização das análises dos teores de ferro.....	108
Figura 5.1.	Localização dos perfis de solo na planície do Rio Araguaia, Goiás, Brasil.....	123
Figura 5.2.	Esquema de coleta de amostras indeformadas para micromorfologia do solo nos perfis P1 e P2. Os detalhes apontam os locais de amostragem que representam a porção superior e base dos perfis.....	124
Figura 5.3.	Esquema de coleta das amostras de feições redoximórficas para análise química (Posições “Pst1, Pst2, Pst3, Pst4 e Pst5”) e mineralogia Pst3 e Pst4.....	126
Figura 5.4.	Feições redoximórficas de Plintossolos da planície do rio Araguaia. A: matriz do solo; B: mosqueado; C: plintita.....	126
Figura 5.5.	Micrografias de horizontes superficiais e subsuperficiais do perfil 1. A=Desprendimento do nódulo por epissaturação do horizonte A (25x). B=Micrografia anterior com nicóis cruzados, com detalhe de quartzo. C=Geometria de um nódulo alongado que deu origem a nódulos menores por degradação pela epissaturação do horizonte de transição E/Btf1 (8x). D=Micrografia anterior com nicóis cruzados. E=Formação de núcleos e origem da plintita do horizonte transicional Btf4/Btf5 (8x). F=Micrografia anterior com nicóis cruzados. G=Detalhe do horizonte de transição Btf4/Btf5 com argiluviação (100x). H=Micrografia anterior com nicóis cruzados.....	131
Figura 5.6.	Micrografias de horizontes superficiais e subsuperficiais do perfil 2. A=Nódulo típico do horizonte de transição A/AE (25x). B=Grãos de quartzo ferruginizado com ferro relictual no horizonte de transição A/AE (25x), com nicóis cruzados. C=Depleção de ferro do nódulo com halo muito aderente do horizonte de transição AE/E (20x). D=Micrografia anterior com nicóis cruzados. E=Nódulo argiloso fissurado no horizonte Btf1/Btf2 (16x). F=Micrografia anterior com nicóis cruzados. G=Formação de núcleos e posterior origem de plintita do horizonte Btf3/Btf4 (25x). H=Micrografia anterior com nicóis cruzados.....	133

Figura 5.7.	Valores médios do elemento ferro extraídos por diferentes métodos nas feições redoximórficas dos perfis estudados. Fet: fluorescência de raios-X; Fes: ataque ácido sulfúrico; Fed: ditionito-citrato-bicarbonato de sódio; Feo: oxalato ácido de amônio. As barras de erros referem-se à variabilidade amostral em porcentagem (5% de significância).....	135
Figura 5.8.	Valores médios das formas de ferro extraídas das feições matriz do solo, mosqueado e plintita. Fe prim.: ferro primário (Fet-Fes); Fe sec.: ferro secundário (Fes-Fed); Fed: ferro extraído por ditionito-citrato-bicarbonato de sódio (DCB); e Feo: ferro extraído por oxalato ácido de amônio, em g kg ⁻¹ . As barras de erros referem-se à variabilidade amostral em porcentagem (5% de significância).....	135
Figura 5.9.	Teores médios de ferro obtidos por ataque ácido sulfúrico (Fes), ditionito-citrato-bicarbonato de sódio (Fed), oxalato-ácido de amônio (Feo) e relações Feo/Fed e Fed/Fes em conjuntos de amostras naturais de plintita após submetidas a testes de força de compressão (CS) em diferentes posições (Pst) do perfil P1.....	137
Figura 5.10.	Teores de ferro obtidos por ataque ácido sulfúrico (Fes), ditionito-citrato-bicarbonato de sódio (Fed), oxalato-ácido de amônio (Feo) e relações Feo/Fed e Fed/Fes em amostras naturais de plintita após submetidas a testes de força de compressão (CS) em diferentes posições (Pst) do perfil P2.....	138
Figura 5.11.	Difratogramas de raios-X da fração argila desferrificadas, tratadas e orientadas das feições redoximórficas dos perfis. As amostras foram saturadas com potássio (K) à temperatura ambiente 25°C (K25), aquecidas a 350°C (K350) e 550°C (K550) e saturadas com magnésio (Mg) e magnésio+glicerol (Mg-Gli).....	139
Figura 5.12.	Difratogramas de raios-X de amostras em pó das feições redoximórficas dos perfis (P1 e P2). K: Kaolinite; Gb: Gibbsite; Gt: Goethite. MA: matrix; MO: mottled; PL: plinthite.....	140
Figura 5.13.	Esquema da distribuição de plintitas da Planície do Rio Araguaia. PL: plintita; MO: mosqueados; MA: matriz do solo. Perfil de solo em barranco de estrada (A), plintitas individualizadas (B) e plintitas interligadas (C).....	142

RESUMO GERAL

SANTOS, D. P. **Feições redoximórficas, micromorfologia e endurecimento da plintita em solos da planície do rio Araguaia, Brasil.** 2020. 153 f. Tese (Doutorado em Agronomia: Solo e Água) - Escola de Agronomia, Universidade Federal de Goiás, Goiânia, 2020.¹

Os solos da planície do Rio Araguaia, possuem abundâncias em feições redoximórficas, em especial a plintita. Os solos predominantes nesta planície são Plintossolos que estão submetidos a flutuação natural do lençol freático e alterados pelo uso antrópico nas proximidades, pelo Projeto de irrigação por inundação em Luiz Alves, são Miguel do Araguaia, estado de Goiás. Desta forma, objetivou-se avaliar a composição química e mineralógica das feições redoximórficas, dinâmica do elemento ferro presentes nos solos, mecanismos de formação e possíveis causas ou condicionamentos do endurecimento da plintita, assim como os aspectos morfológicos (macro e micro) desta feição. Foram coletados feições redoximórficas em diversas posições dos perfis de solos e submetidos todos os procedimentos analíticos como recomendam os manuais especializados para cada análise, assim como equipamentos específicos para obtenção dos dados. Os teores de ferro em todas as formas estudadas determinadas são sempre maiores na feição plintita, intermediários na feição mosqueado e menores na feição matriz do solo. O ferro presente em minerais secundários (vermiculitas, VHES e illitas) alcançam valores da ordem de 64,60% em P1 e 58,02% em P2, enquanto apenas parte (cerca de 35,40% em P1 e 41,98% em P2) encontra-se detectado na forma de óxidos como goethita e hematita que teriam possibilidade de serem formados em processos de oxirredução. As feições mosqueado e plintita presentes nestes solos não são produto do processo clássico de segregação, mobilização e acumulação de ferro como consequência de processos de oxirredução. Se formaram ou surgiram nos mesmos como resultado de um processo de decomposição relativamente lento e constante do seu material de origem, que estão sendo decompostos em meio aquoso liberando boa parte de seus componentes, entre eles, o ferro e elementos mais móveis como as bases e o silício, que saem do sistema pela água de drenagem, podendo alguma pequena parte deles se recombinar para a formação de novos minerais menos complexos, como caulinita e óxidos. A maior dureza das feições plintita dos solos está diretamente relacionada ao teor de ferro férrico contido em sua fração fina. Os óxidos de ferro são os elementos responsáveis pela promoção e manutenção do endurecimento das feições. A presença da feição plintita, com os quesitos de cor e dureza plenamente satisfeitos, se estabeleceu nos casos estudados com uma combinação dos seguintes fatores: condição de sazonalidade do regime hídrico; teores absolutos de Fed de pelo menos 40 g kg⁻¹ associados a uma relação Fed/Fes de pelo menos 0,35 e valores de Fes iguais ou superiores a 100 g kg⁻¹, associados a uma relação Fes/Fet de pelo menos 0,70. As acumulações de ferro identificadas nestas feições pelo estudo micromorfológico são provavelmente formadas em tempos anteriores, imediatamente após a liberação do ferro das estruturas silicatadas e em condição distinta de umidade que possibilitaram a sua recombinação na forma de óxidos, provavelmente com menor movimentação de águas.

Palavras-chave: hematita, goethita, planície de inundação, óxidos de ferro.

¹ Doutorando em Agronomia na Universidade Federal de Goiás (UFG), Goiânia, GO, Brasil.

² Professor na Universidade Federal de Goiás (UFG), Goiânia, GO, Brasil.

³ Pesquisador aposentado do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE), Goiânia, GO, Brasil.

GENERAL ABSTRACT

SANTOS, D. P. **Redoxymorphic features, micromorphology and plintite hardening in soils on the Araguaia River plain, Brazil.** 2020. 153 f. Thesis (Doctored in Agronomy: Soil and Water) - Escola de Agronomia, Universidade Federal de Goiás, Goiânia, 2020.1

The soils of the Araguaia River plain have abundance in redoxymorphic features, especially plinthite. The predominant soils in this plain are plinthossols that are subjected to natural water table fluctuation and altered by the anthropic use nearby, by the flood irrigation project in Luiz Alves, São Miguel do Araguaia, state of Goiás. Thus, the objective was to evaluate the chemical and mineralogical composition of the redoxymorphic features, dynamics of the iron element present in the soils, formation mechanisms and possible causes or conditioning of the plintite hardening, as well as the morphological aspects (macro and micro) of this feature. Redoxymorphic features were collected in different positions of the soil profiles and submitted to all analytical procedures as recommended by the specialized manuals for each analysis, as well as specific equipment to obtain the data. The iron contents in all the studied forms determined are always higher in the plinthite feature, intermediate in the mottled feature and lower in the soil matrix feature. The iron present in secondary minerals (vermiculites, VHES and illites) reach values of the order of 64.60% in P1 and 58.02% in P2, while only part (around 35.40% in P1 and 41.98% in P2) is detected in the form of oxides such as goethite and hematite that would have the possibility of being formed in oxi-reduction processes. The mottled and plintite features present in these soils are not the product of the classic process of segregation, mobilization and accumulation of iron as a result of oxidation processes. They formed or appeared in them as a result of a relatively slow and constant decomposition process of their source material, which is being decomposed in an aqueous medium releasing much of its components, including iron and more mobile elements such as bases and silicon, which leave the system by draining water, and some small part of them can recombine to form new less complex minerals, such as kaolinites and oxides. The greater hardness of the plintite features of the soils is directly related to the content of ferric iron contained in its fine fraction. Iron oxides are the elements responsible for promoting and maintaining the hardening of features. The presence of the plintite feature, with the requirements of color and hardness fully satisfied, was established in the cases studied with a combination of the following factors: condition of seasonality of the water regime; absolute levels of Fed of at least 40 g kg⁻¹ associated with a Fed / Fes ratio of at least 0.35 and Fes values equal to or greater than 100 g kg⁻¹, associated with a Fes / Fet ratio of at least 0.70. The accumulations of iron identified in these features by the micromorphological study are probably formed in earlier times, immediately after the release of iron from silicate structures and in a distinct moisture condition that allowed its recombination in the form of oxides, probably with less water movement.

Keywords: hematite, goethite, floodplain, iron oxides.

¹ Doutorando em Agronomia na Universidade Federal de Goiás (UFG), Goiânia, GO, Brasil.

² Professor na Universidade Federal de Goiás (UFG), Goiânia, GO, Brasil.

³ Pesquisador aposentado do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE), Goiânia, GO, Brasil.

1 INTRODUÇÃO GERAL

Expressivas áreas com solos que apresentam feições redoximórficas, principalmente plintita, são frequentes em várias regiões do Brasil (Anjos et al., 1995; Coringa et al., 2012; Garcia et al. 2013; Martins et al., 2018a). Dentre essas regiões, destacam-se a região Amazônica (Alto Amazonas, o estado do Amapá e Ilha de Marajó), o Pantanal Mato-grossense, a Ilha do Bananal, a Baixada Maranhense, o Piauí Setentrional, o Sudoeste do Tocantins e Norte do Estado de Goiás (WRB, 2015; Santos et al., 2018).

O Vale do Rio Araguaia é a maior planície fluvial do estado de Goiás que possui plintita, localizada na região central do Brasil. A planície do médio Araguaia apresenta um complexo mosaico de unidades morfo-sedimentares formadas por sedimentos depositados durante o Pleistoceno, ou seja, formados por conglomeráticos arenosos e laterizados, enquanto os sedimentos Holocênicos, na qual formam a planície aluvial, são de diversas composições sedimentológicas, associadas a distintos tipos de ambientes lacustres, áreas pantanosas ou pequenos canais que drenam a planície (RadamBrasil, 1981; Moraes et al., 2008). O Bioma no qual está inserido a planície é Cerrado (segundo maior bioma do país quanto à área territorial, ocupando uma área de cerca de 2 milhões de km², correspondendo a 23% do território nacional (Ribeiro & Walter, 2008).

Na planície do Rio Araguaia, predominam Plintossolos, e estima-se que esta classe de solos ocupe uma área maior que 589 mil km² no território nacional, o que corresponde a aproximadamente 7% dos solos brasileiros (Santos et al., 2011). A gênese dos Plintossolos e outras classes de solo com plintita ou petroplintita está relacionada com o umedecimento e alternados ciclos de secagem ao longo tempo a períodos longos (Santos et al., 2018). Em geral, devido aos altos níveis do lençol freático, um intenso processo de redução química de compostos de ferro ocorre, levando ao transporte, mobilização e concentração destes compostos no sistema - solo. Consequentemente, quando expostos a estes processos, os perfis de solo podem desenvolver horizonte subsuperficial, conhecido como horizonte plíntico, associado a inundação do solo (IBGE, 2015; Santos et al., 2018).

Feições redoximórficas do solo apresentam aspectos morfológicos expressos por diferentes cores, verificadas em solos de ambientes úmidos ou com variações de umidade, comumente atribuídos à perdas (áreas de depleção) ou à ganhos (áreas de acumulação) de pigmentos (Vepraskas et al., 1994; Schoeneberger et al., 2012; Zhao et al., 2019). Dentre algumas das mais comuns e seguramente mais importantes feições redoximórficas

ocorrentes em solos brasileiros está a plintita (Soil Survey Staff, 2014), que além de ser definidora de um horizonte diagnóstico (horizonte plíntico) é também indicadora de uma classe de solos (Plintossolos) no Sistema Brasileiro de Classificação de Solos “SiBCS” (Santos et al., 2018).

Segundo a literatura especializada (Daniels et al., 1978; Eze et al., 2014; Soil Survey Staff, 2014; IBGE, 2015; Santos et al., 2018), a plintita (termo derivado de laterita, originalmente definida em trabalho realizado por Buchanan (1807) é uma feição redoximórfica constituída de mistura de argila, rica em ferro (Fe), ou Fe e alumínio (Al), pobre em carbono orgânico, com grãos de quartzo e outros minerais, sob a forma de mosqueados vermelhos, vermelho-amarelados e vermelho-escuros. Ainda, de acordo com Tardy et al. (1993), Coringa et al. (2012) e Santos et al. (2018), a gênese da plintita ocorre em ambiente úmido pela segregação de Fe, importando em mobilização, transporte e concentração final dos compostos de Fe. Daniels et al. (1978), Osher & Buol (1998), Gray & Murphy (1999) e Anjos et al. (2007) constataram que estas feições ocorrem em locais imperfeitamente drenados no terço inferior de vertentes e em planícies aluviais.

Os solos dessa classe são formados sob condições de restrição à percolação da água, podendo permanecer saturados ou submersos durante parte do ano devido à elevação do nível do lençol freático (Lima et al., 2006; Santos et al., 2018). De modo geral, apresentam elevada acidez, altos valores de alumínio trocável e saturação por alumínio e baixa saturação por bases (Santos & Batista, 1996; Lima et al., 2006; Anjos et al., 2007; Coringa et al., 2012; Garcia et al., 2013; Miguel et al., 2013). Dessa forma, suas principais limitações são a baixa fertilidade natural e a má drenagem.

Em relação a química dessas feições, Alexander & Cady (1962) observaram que a plintita apresenta ampla variabilidade enquanto Roquin et al. (1990) consideraram que este material estava relacionado com o grau de evolução e natureza do material de origem do qual é derivado. No entanto, comumente, segundo esses autores, os elementos mais abundantes nesta feição redoximórfica são silício (Si), Al e Fe, embora se tenha outros componentes químicos em menores proporções (Zhao et al., 2019). De acordo com Gallaher et al. (1974) e Singh & Gilkes (1996), a composição da plintita difere quimicamente da composição da matriz do solo, devido a maior quantidade de óxidos de Fe.

Em relação ao endurecimento da plintita, os óxidos de ferro presentes nas feições são os principais responsáveis para o endurecimento, sendo hematita, goethita, óxidos

fracamente cristalizados e hidróxido de Al (Lal & Stewart, 1990; Soil Survey Staff, 2010, 2014).

Para Beauvais & Colin (1993), a ferruginização inicial é primeiramente goethítica nos estádios iniciais de formação da plintita, onde e se torna progressivamente hematítica durante os processos de oxidação e endurecimento dessa feição. Em pesquisas de Coelho & Vidal-Torrado (2003) estudando glébulas plínticas, houve predomínio de goethita na sua constituição, ocorrendo também a hematita em proporções consideráveis. Já em trabalhos de Anjos et al. (1995) e Miguel et al. (2013) estudando solos com plintitas no Maranhão e Rio Grande do Sul, respectivamente, os autores detectaram predominância da hematita em detrimento da goethita.

Em relação aos aspectos micromorfológicos, Tardy et al. (1993) e Beauvais & Colin, (1993) sugerem que a plintita (nódulos) se encontra em estágio de degradação, ao constatarem nódulos irregulares e fracamente impregnados com cores amareladas e halos de alteração. Conforme descrito em Thomas (1994) e Tucker et al. (1994), nódulos em estágio de degradação são estáveis e relictuais, possuindo limites nítidos, podendo terem sido formados em ambientes mais secos que o atual. Além dessas condições, as temperaturas mais elevadas, altos conteúdos de oxigênio e atividade biológica em condições de lençol freático suspenso temporário anual, também podem acelerar o processo de degradação de nódulos por epissaturação (Vepraskas & Lindbo, 2012). Estes autores apontam que os halos de degradação formados nos nódulos ocorrem em função da dissolução da hematita, condicionando a formação de nódulos contemporâneos, devido ao processo de remobilização do ferro em zonas oxidadas. Concomitantemente a isso, ocorrem nódulos fortemente impregnados com mudança abrupta da superfície do nódulo junto a matriz, o que leva a crer que os nódulos não estão sendo degradados (Wilson et al., 2013). Contudo, em estudos de caracterização de Plintossolos da planície do Rio Araguaia-GO, Moura (2015) observa que o processo de plintização tem ocorrido na base dos perfis, enquanto a sua degradação ocorre por depleção nos horizontes superiores.

Dessa forma, as principais hipóteses desse trabalho é que as feições redoximórficas são influenciadas principalmente pelas reações químicas, sendo o ferro o elemento mais atuante nestas feições; os óxidos de Fe hematita e goethita são os principais responsáveis na composição e formação da plintita; as plintitas estão sendo formadas pelo processo redox nos perfis de solo.

Apesar da importância dessa classe de solo, poucos estudos tem sido realizados avaliando a gênese e morfologia dos Plintossolos brasileiros, sendo que estas feições são poucas documentadas quanto a sua composição elementar, morfologia, dinâmica do elemento ferro e mecanismos de formação dessas feições redoximórficas. Dessa forma, este estudo teve como objetivo geral avaliar a composição química de feições redoximórficas, mineralogia, dinâmica do elemento ferro, mecanismos de formação e endurecimento da plintita, assim como avaliar a micromorfologia de Plintossolos da planície do Rio Araguaia, Brasil.

2 REVISÃO DE LITERATURA

2.1. BACIAS HIDROGRÁFICAS DO ARAGUAIA E DO JOÃO LEITE

A bacia hidrográfica do Araguaia compreende uma área total de 323.419,0 km², sendo subdividida em três segmentos (Figura 2.1): Alto Araguaia, Médio Araguaia e Baixo Araguaia (ANA, 2016). O segmento Alto Araguaia inicia-se dentro dos limites dos municípios de Mineiros - GO (à margem direita) e Alto Taquari - MT (à margem esquerda), se estendendo até os municípios de Porangatu - GO (à margem direita) e São Félix do Araguaia - MT (à margem esquerda), compreendendo uma área total de 132.528,2 km². Este segmento representa 41,0% da área total da bacia hidrográfica. Na sequência, o segmento do Médio Araguaia, na sua porção superior iniciado dentro dos municípios de Porangatu - GO e São Félix do Araguaia - MT, se estende até os municípios de Nova Olinda - TO (à margem direita) e Rio Maria - PA (à margem esquerda), totalizando uma área total de 153.961,5 km², o que representa 47,6% da área total da bacia. Finalizando, o segmento do Baixo Araguaia, com uma área total de 36.929,3 km², coopera com cerca de 11,4% da área total da bacia e se estende até os limites inferiores, localizados entre os municípios de Esperantina - TO (à margem direita) e São João do Araguaia - PA (à margem esquerda).

Dentro da bacia hidrográfica do Araguaia, o rio Araguaia é o principal curso d'água e o maior sistema fluvial que drena o Bioma Cerrado (Latrubesse & Stevaux, 2006; Valente, 2007; ANA, 2016), sendo que, neste Bioma, desde a década de 1970 tem ocorrido constante abertura de novas áreas devido à expansão da fronteira agrícola.

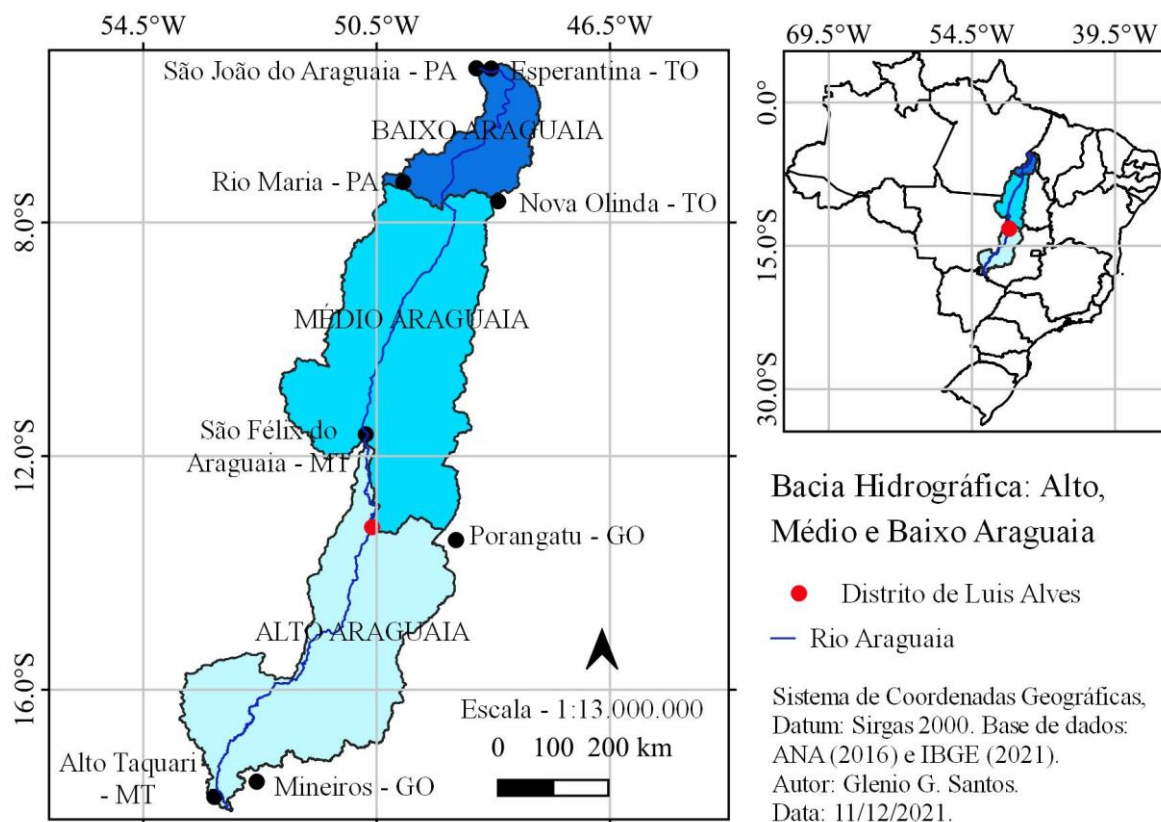


Figura 2.1. Bacia hidrográfica do Araguaia segmentada em: Alto Araguaia, Médio Araguaia e Baixo Araguaia. Fonte do banco de dados de bacias hidrográficas: ANA (2016). Software usado para confecção dos mapas: QGIS 3.22.0 (2021).

Já a bacia hidrográfica do João Leite (Figura 2.2) possui área total de 764,56 km² (SIEG, 2021). No seus limites superiores, à margem direita onde se encontra a nascente do ribeirão João Leite está o município de Anápolis; ao centro o município de Campo Limpo de Goiás e à sua margem esquerda se encontra o município de Ouro Verde de Goiás. Já o seu limite inferior encontra-se no município de Goiânia, onde está seu exutório no rio Meia Ponte que pertence a bacia hidrográfica do Paraná. Da mesma forma já apresentada para a bacia hidrográfica do Araguaia, a bacia hidrográfica do João Leite também apresenta problemas relacionados a antropização de aproximadamente 90% da sua área total (Oliveira, 2013).

Dessa forma, o entendimento da gênese dos solos pertencentes a estas duas bacias para fins de conservação da biodiversidade e uso adequado dos solos, torna-se imprescindível (Martins et al., 2018a, b). Portanto, para se entender a gênese dos solos das duas planícies de inundação, faz-se necessário o conhecimento da geologia e

geomorfologia que compõem as bacia hidrográficas do Araguaia e João Leite, respectivamente.

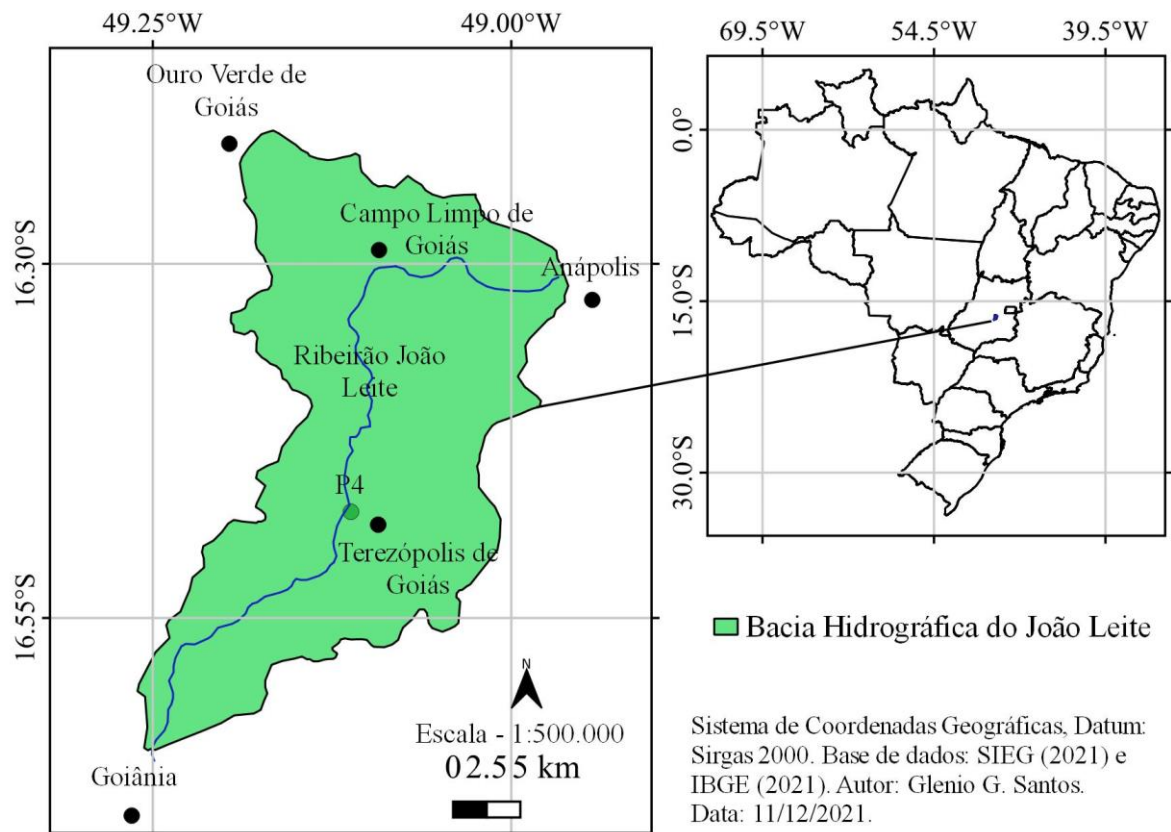


Figura 2.2. Bacia hidrográfica do João Leite. Fonte do banco de dados de bacias hidrográficas: SIEG (2021). Software usado para confecção dos mapas: QGIS 3.22.0 (2021).

2.2 GEOLOGIA DA BACIA HIDROGRÁFICA DO ARAGUAIA

A geologia da bacia hidrográfica do Araguaia é composta pelas províncias Amazônia, Cobertura Cenozoica, Paraná, Parecias, Parnaíba e Tocantins (Figuras 2.3, 2.4 e 2.5), conforme banco de dados geológicos disponível em IBGE (2021).

A composição geológica do segmento Alto Araguaia apresenta dominância da província Tocantins, representando 35,6% da área total, distribuída pelas região Sul, Sudeste, Centro, Norte e Nordeste do segmento (Figura 2.3). Na sequência, a Província Paraná representa 34,9% da área total, estando distribuída na parte inicial e mais alta do segmento, principalmente na região Sul e Sudoeste. Por último, distribuída mais ao Centro, Noroeste e Norte do segmento Alto Araguaia, está a Província Cobertura Cenozoica, ocupando uma área de 28,6%. Corpos d'água continental ocupam 0,9% da área total deste segmento da bacia hidrográfica Alto Araguaia.

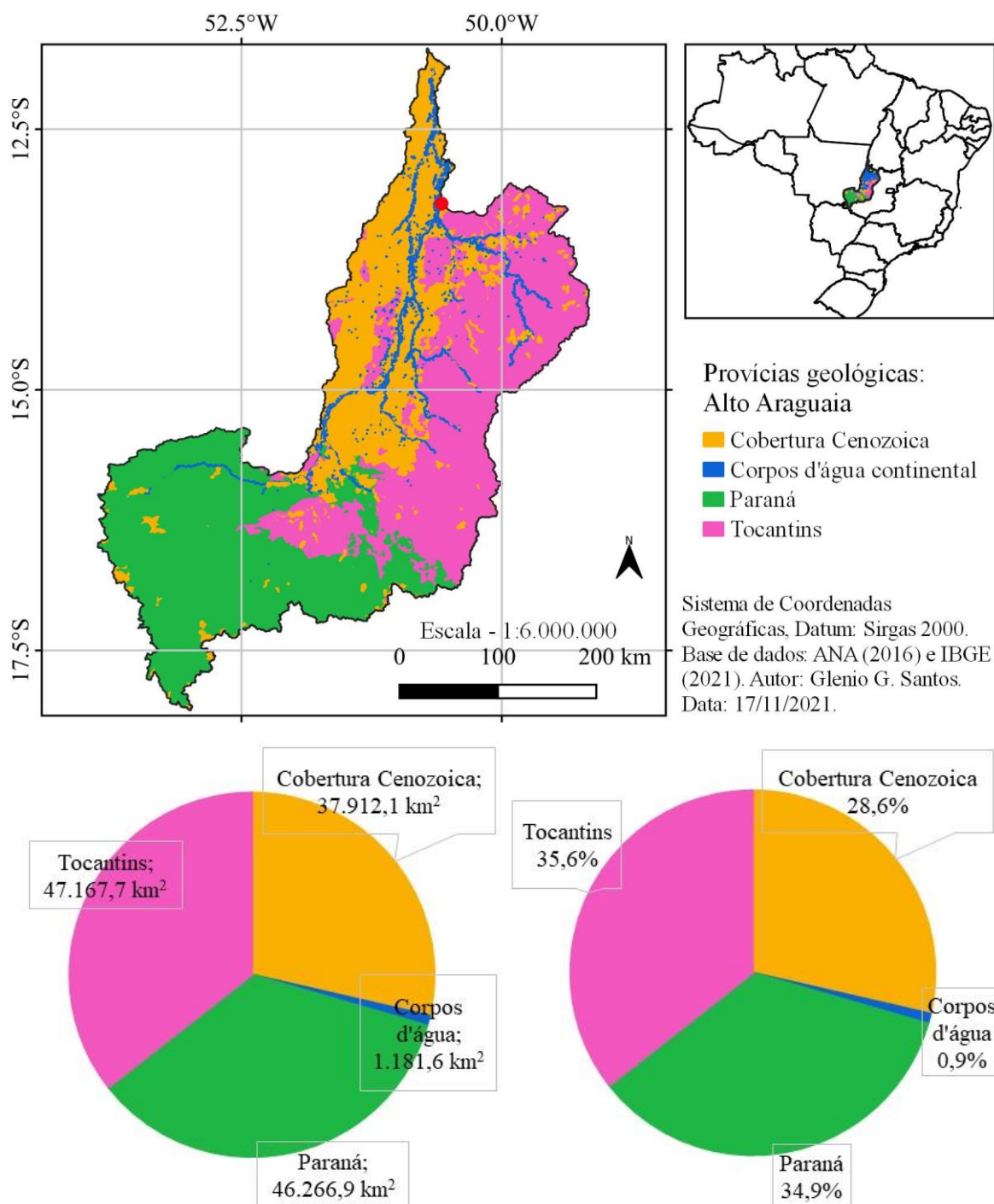


Figura 2.3. Geologia do segmento da bacia hidrográfica do Alto Araguaia. Fonte do banco de dados: de bacias hidrográficas (ANA, 2016); de geologia (IBGE, 2021). Software usado para confecção dos mapas: QGis 3.22.0 (2021).

No que diz respeito às Unidades Geológicas que compõem o segmento da bacia hidrográfica Alto Araguaia (Tabela 2.1), a Aquidauana é a mais representativa, ocupando 19,25% do segmento e 55,14% da Província Paraná (IBGE, 2021).

Tabela 2.1. Representatividade das Unidades Geológicas⁽¹⁾ do segmento da bacia hidrográfica Alto Araguaia, com respectivos tempos geológicos e Províncias Geológicas.

Tempo Geológico	Província Geológica	Unidade Geológica	Área (km²)	Área (%)
Fanerozoico Paleozoica Carbonífero Pensilvaniano	Paraná	Aquidauana	25.513,49	19,25%
Fanerozoico Cenozoica Quaternário Pleistoceno Superior	Cobertura Cenozoica	Cobertura Detrito-Laterítica Neo-Pleistocênica	15.457,48	11,66%
Fanerozoico Cenozoica Quaternário Pleistoceno Gelasiano	Cobertura Cenozoica	Bananal	13.768,93	10,39%
Proterozoico Neoproterozoica Toniano	Tocantins	Ortognaisse do Oeste de Goiás	8.164,83	6,16%
Fanerozoico Paleozoica Devoniano Inferior	Paraná	Ponta Grossa	7.410,18	5,59%
Fanerozoico Paleozoica Devoniano Inferior Emsiano	Paraná	Furnas	5.510,07	4,16%
Fanerozoico Cenozoica Quaternário Holoceno	Cobertura Cenozoica	Depósitos Aluvionares Holocênicos	5.419,22	4,09%
Arqueano Mesoarqueana	Tocantins	Caiçara	4.771,53	3,60%
Proterozoico Paleoproterozoica Orosiriano	Tocantins	Rio dos Mangues	4.538,30	3,42%
Proterozoico Neoproterozoica Toniano	Tocantins	Manoel Alves	3.758,56	2,84%
Fanerozoico Mesozoica Jurássico Superior	Paraná	Botucatu	3.504,90	2,64%
Arqueano Mesoarqueana	Tocantins	Anta - Unidade Granito-Gnáissica	3.451,80	2,60%
Proterozoico Neoproterozoica	Tocantins	Xambioá	3.347,39	2,53%
Arqueano Mesoarqueana	Tocantins	Uvã	3.002,48	2,27%
Fanerozoico Cenozoica Neógeno Mioceno	Cobertura Cenozoica	Cobertura Detrito-Laterítica Neogênica	2.089,71	1,58%
Fanerozoico Paleozoica Permiano Lopingiano	Paraná	Corumbataí	1.768,94	1,33%
Proterozoico Neoproterozoica Ediacarano	Tocantins	Serra Negra	1.637,61	1,24%
Proterozoico Neoproterozoica Criogeniano	Tocantins	Cuiabá	1.272,31	0,96%
Proterozoico Neoproterozoica Toniano	Tocantins	Sequência Metavulcano-Sedimentar Anicuns-Itaberaí	1.242,12	0,94%
Proterozoico Neoproterozoica Ediacarano	Tocantins	Complexo Granulítico Porangatu	1.232,23	0,93%
Corpos d'água continental	Corpos d'água continental	Corpos d'água continental	1.181,55	0,89%
Proterozoico Neoproterozoica Toniano	Tocantins	Sequência Mara Rosa - Unid. 2	1.081,31	0,82%
Fanerozoico Cenozoica Quaternário Holoceno	Cobertura Cenozoica	Areias Quartzosas	977,10	0,74%
Fanerozoico Mesozoica Cretáceo Inferior Valanginiano	Paraná	Serra Geral	896,89	0,68%
Arqueano Mesoarqueana	Tocantins	Anta - Unidade Gnaiss-Granodiorítica	671,04	0,51%
Proterozoico Paleoproterozoica Estateriano	Tocantins	Serra da Mesa - Unidade Xisto Quartzítica	670,00	0,51%

Continua...

Tabela 2.1. Continuação.

Tempo Geológico	Província Geológica	Unidade Geológica	Área (km²)	Área (%)
Proterozoico Neoproterozoica	Tocantins	Rio Caiapó	601,82	0,45%
Proterozoico Neoproterozoica Toniano	Tocantins	Sequência Mara Rosa - Unid. 4	524,51	0,40%
Arqueano Mesoarqueana	Tocantins	Tonalito Tocambira	505,53	0,38%
Fanerozoico Mesozoica Cretáceo Inferior Aptiano	Paraná	Bauru	484,85	0,37%
Arqueano Neoarqueana	Tocantins	Hidrolina	457,82	0,35%
Fanerozoico Mesozoica Cretáceo Superior Santoniano	Paraná	Marília	427,37	0,32%
Proterozoico Neoproterozoica Ediacarano	Tocantins	Sequência Metavulcanossedimentar Iporá-Amorinópolis - Unidade 2	384,30	0,29%
Proterozoico Neoproterozoica Toniano	Tocantins	Sequência Metavulcanossedimentar Arenópolis-Piranhas - Unidade Máfico-Ultramáfica	382,91	0,29%
Arqueano Mesoarqueana	Tocantins	Serra de Santa Rita	374,33	0,28%
Proterozoico Paleoproterozoica	Tocantins	Stocks e Diques Máfico-Ultramáficos	358,48	0,27%
Fanerozoico Paleozoica Permiano Cisuraliano Kunguriano	Paraná	Palermo	357,17	0,27%
Proterozoico Neoproterozoica Criogeniano	Tocantins	Unidade Metavulcano-sedimentar Jaupaci	356,64	0,27%
Proterozoico Neoproterozoica	Tocantins	Chapada	353,34	0,27%
Proterozoico Neoproterozoica Toniano	Tocantins	Sequência Mara Rosa - Unid. 3	307,70	0,23%
Fanerozoico Mesozoica Cretáceo Superior Coniaciano	Tocantins	Iporá	289,31	0,22%
Proterozoico Neoproterozoica Toniano	Tocantins	Sequência Metavulcanossedimentar Arenópolis-Piranhas - Unidade Metassedimentar	268,38	0,20%
Proterozoico Neoproterozoica Toniano	Tocantins	Sequência Mara Rosa - Unid. 6	235,79	0,18%
Arqueano Mesoarqueana	Tocantins	Córrego Alagadinho	225,67	0,17%
Proterozoico Neoproterozoica	Tocantins	Santa Tereza	224,80	0,17%
Fanerozoico Paleozoica Permiano	Paraná	Passa Dois	208,68	0,16%
Arqueano Mesoarqueana	Tocantins	Manoel Leocádio	183,42	0,14%
Arqueano Mesoarqueana	Tocantins	Crixás	177,97	0,13%
Fanerozoico Cenozoica Quaternário Holoceno	Cobertura Cenozoica	Terraços Holocênicos	164,66	0,12%
Proterozoico Paleoproterozoica Estateriano	Tocantins	Serra Dourada - Unidade Quartzito-Conglomerática	152,45	0,12%
Fanerozoico Paleozoica Siluriano Llandovery	Paraná	Vila Maria	142,73	0,11%
Arqueano Neoarqueana	Tocantins	Moqué - Unidade Gnaiss Granodiorítico	120,75	0,09%
Arqueano Mesoarqueana	Tocantins	Granodiorito Águas Claras	107,77	0,08%
Proterozoico Neoproterozoica Criogeniano	Tocantins	Uruaçu - Unidade A	107,19	0,08%

Tabela 2.1. Continuação.

Tempo Geológico	Província Geológica	Unidade Geológica	Área (km²)	Área (%)
Arqueano Mesoarqueana	Tocantins	Serra Azul	105,22	0,08%
Proterozoico Neoproterozoica Toniano	Tocantins	Sequência Mara Rosa - Unid. 5	99,20	0,07%
Arqueano Mesoarqueana	Tocantins	Córrego Fundo	97,85	0,07%
Arqueano Mesoarqueana	Tocantins	Gnaiss Crixás-Açu	92,99	0,07%
Proterozoico Neoproterozoica Ediacarano	Tocantins	Bom Jardim de Goiás - Unid. 1	90,90	0,07%
Proterozoico Neoproterozoica Criogeniano	Tocantins	Granitos Tipo Aragoiânia	87,34	0,07%
Fanerozoico Paleozoica Siluriano	Tocantins	Água Bonita	77,04	0,06%
Arqueano Mesoarqueana	Tocantins	Serra do Moinho	70,31	0,05%
Arqueano Mesoarqueana	Tocantins	Cabaçal	68,11	0,05%
Proterozoico Neoproterozoica	Tocantins	Gabro-Diorítica Amaralina	67,79	0,05%
Arqueano Neoarqueana	Tocantins	Moqué - Unidade Gnaiss Tonalítico	60,83	0,05%
Proterozoico Neoproterozoica Ediacarano	Tocantins	Araras	59,05	0,04%
Arqueano Mesoarqueana	Tocantins	Limeira	57,50	0,04%
Arqueano Mesoarqueana	Tocantins	Rio Vermelho	55,30	0,04%
Proterozoico Neoproterozoica Toniano	Tocantins	Sequência Mara Rosa - Unid. 1	54,51	0,04%
Proterozoico Neoproterozoica Toniano	Tocantins	Americano do Brasil	49,96	0,04%
Arqueano Mesoarqueana	Tocantins	Cedrolina	48,45	0,04%
Arqueano Mesoarqueana	Tocantins	Serra do Cotovelo	40,28	0,03%
Arqueano Neoarqueana	Tocantins	Moqué - Unidade Granito Gnaiss	35,86	0,03%
Fanerozoico Cenozoica Quaternário Pleistoceno Gelasiano	Cobertura Cenozoica	Depósitos Coluviais Pleistocênicos	34,97	0,03%
Fanerozoico Paleozoica Ordoviciano	Paraná	Piranhas	34,50	0,03%
Arqueano Mesoarqueana	Tocantins	Boqueirão	33,15	0,03%
Arqueano Neoarqueana	Tocantins	Moqué - Unidade Gnaiss Trondhjemítico	32,77	0,02%
Arqueano Mesoarqueana	Tocantins	Ribeirão das Antas	32,01	0,02%
Fanerozoico Mesozoica Cretáceo Superior Coniaciano	Tocantins	Alcalina Santa Fé	31,86	0,02%
Proterozoico Neoproterozoica Toniano	Tocantins	Granitos Tipo Rio Piracanjuba	30,83	0,02%
Proterozoico Paleoproterozoica Orosiriano	Tocantins	Gnaiss Ribeirão	29,08	0,02%
Arqueano Mesoarqueana	Tocantins	Sequência Serra do Cantagalo	25,22	0,02%
Arqueano Mesoarqueana	Tocantins	Digo-Digo	20,60	0,02%
Proterozoico Paleoproterozoica Sideriano	Tocantins	Sequência Morro Escuro	20,00	0,02%
Arqueano Mesoarqueana	Tocantins	Intrusivas Graníticas Arqueanas	16,76	0,01%
Fanerozoico Mesozoica Cretáceo Superior Coniaciano	Tocantins	Alcalina Morro do Engenho	15,98	0,01%

Tabela 2.1. Continuação.

Tempo Geológico	Província Geológica	Unidade Geológica	Área (km ²)	Área (%)
Fanerozoico Mesozoica	Paraná	Vale do Rio do Peixe	7,14	0,01%
Cretáceo Superior				
Proterozoico	Tocantins	Serra Dourada - Unidade Xisto-Quartzítica	7,12	0,01%
Paleoproterozoica Estateriano				
Arqueano Mesoarqueana	Tocantins	São Patricinho	5,24	0,004%
Arqueano Mesoarqueana	Tocantins	Aimbé	4,82	0,004%
Proterozoico	Tocantins	Gabro-Diorítica de Posselândia	1,23	0,001%
Paleoproterozoica				
Proterozoico	Tocantins	Associação Ortognáissica	0,11	0,0001%
Paleoproterozoica Sideriano		Migmatítica		

⁽¹⁾ Fonte do banco de dados: de bacias hidrográficas (ANA, 2016) e tabela de atributos de geologia (IBGE, 2021).

Na sequência, as Unidades Cobertura Detrito-Laterítica Neo-Pleistocênica e Bananal representam 11,66% e 10,39% do segmento e 40,77% e 36,32% da Província Cobertura Cenozoica, respectivamente. A Unidade Ortognaisse do Oeste de Goiás representa 6,16% do segmento e 17,31% da Província Tocantins. Por último, as Unidades Ponta Grossa e Furnas ocupam 5,59% e 4,16% do segmento e representam 16,02% e 11,91% da Província Paraná. As demais Unidades Geológicas e corpos d'água continental motradas na Tabela 2.1, com menor representatividade, completam o segmento da bacia hidrográfica Alto Araguaia, para cada Província Geológica apresentada na Figura 2.3.

No segmento Médio Araguaia (Figura 2.4), a dominância das Províncias Geológicas obedece à seguinte ordem: 37,4% da Cobertura Cenozoica distribuída na sua maioria, entre a região Sul, Sudoeste e Centro, com pequenas ocorrências na região Norte e Nordeste; 36,6% da Província Tocantins distribuída entre as regiões Sul, Sudeste, Centro, Norte e Nordeste; 21,8% da Província Amazônia distribuída nas regiões Noroeste e Norte; 2,3% da Província Parnaíba distribuída entre as regiões Nordeste/Norte; e 1,0% da Província Parecis a Sudoeste do segmento da bacia. Os corpos d'água continental somam 0,9% da área total do segmento Médio Araguaia.

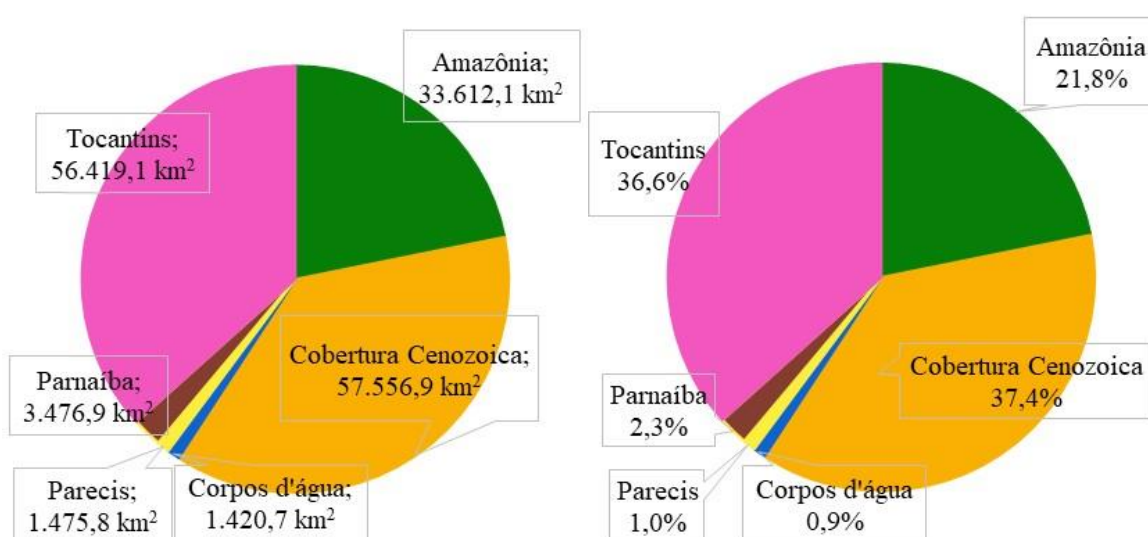
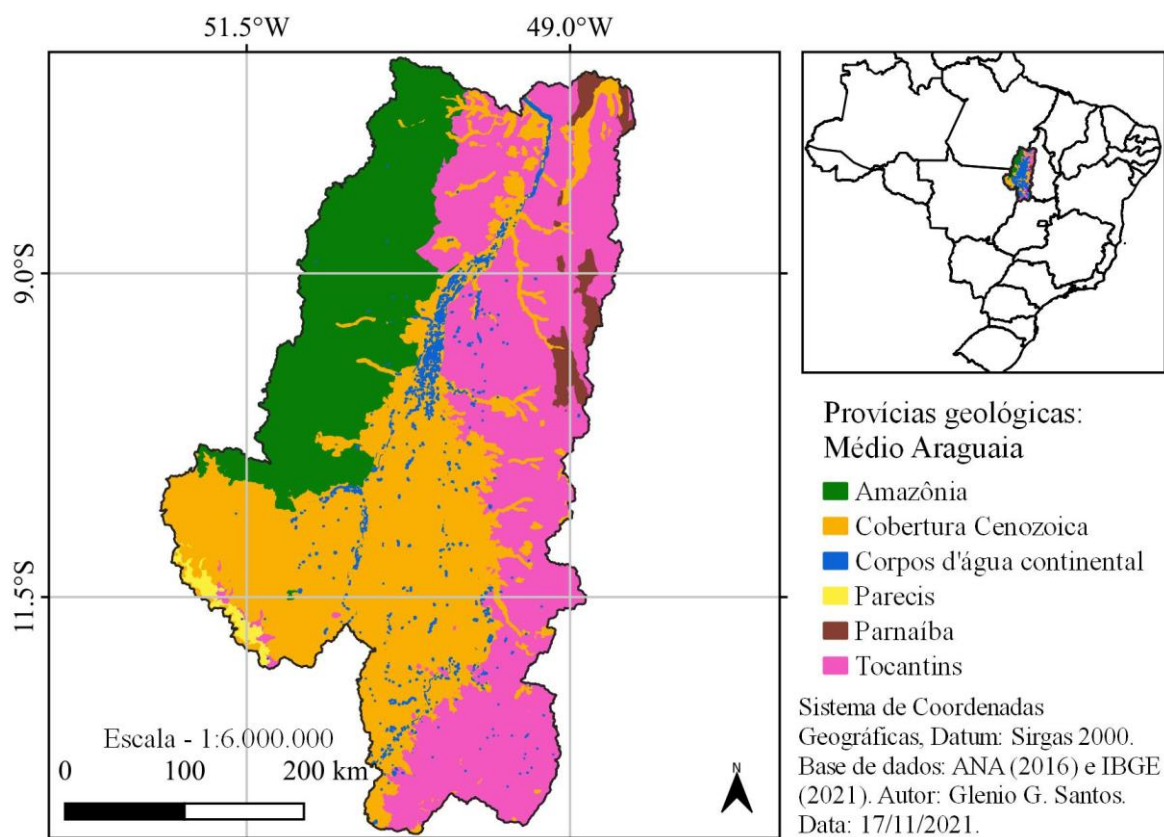


Figura 2.4. Geologia do segmento da bacia hidrográfica do Médio Araguaia. Fonte do banco de dados: de bacias hidrográficas (ANA, 2016); de geologia (IBGE, 2021). Software usado para confecção dos mapas: QGis 3.22.0 (2021).

No que diz respeito às Unidades Geológicas que compõem o segmento da bacia hidrográfica Médio Araguaia (Tabela 2.2), a Bananal é a mais representativa, ocupando 21,88% do segmento e 58,52% da Província Cobertura Cenozoica (IBGE, 2021).

Tabela 2.2. Representatividade das Unidades Geológicas⁽¹⁾ do segmento da bacia hidrográfica Médio Araguaia, com respectivos tempos geológicos e Províncias Geológicas.

Tempo Geológico	Província Geológica	Unidade Geológica	Área (km ²)	Área (%)
Fanerozoico Cenozoica Quaternário	Cobertura	Bananal	33.682,12	21,88
Pleistoceno Gelasiano	Cenozoica			
Proterozoico Neoproterozoica	Tocantins	Couto Magalhães	29.150,95	18,93
Fanerozoico Cenozoica Quaternário	Cobertura	Cobertura Detrito-Laterítica	11.198,34	7,27
Pleistoceno Superior	Cenozoica	Neo-Pleistocênica		
Arqueano Mesoarqueana	Amazônia	Arco Verde	10.816,95	7,03
Proterozoico Neoproterozoica	Tocantins	Xambioá	9.288,94	6,03
Fanerozoico Cenozoica Quaternário	Cobertura	Depósitos Aluvionares	8.864,51	5,76
Holoceno	Cenozoica	Holocênicos		
Proterozoico Paleoproterozoica	Amazônia	Santana do Araguaia	7.903,96	5,13
Orosiriano				
Proterozoico Paleoproterozoica	Tocantins	Rio dos Mangues	6.382,28	4,15
Orosiriano				
Proterozoico Neoproterozoica	Tocantins	Pequizeiro	5.068,03	3,29
Toniano				
Arqueano Mesoarqueana	Amazônia	Granito Xinguara	3.837,50	2,49
Proterozoico Paleoproterozoica	Amazônia	CrepORIZÃO	3.303,94	2,15
Orosiriano				
Fanerozoico Cenozoica Neógeno	Cobertura	Cobertura Detrito-Laterítica	3.158,37	2,05
Mioceno	Cenozoica	Neogênica		
Proterozoico Neoproterozoica	Tocantins	Morro do Campo	1.998,89	1,30
Fanerozoico Paleozoica Devoniano				
Médio Givetiano	Parnaíba	Pimenteiras	1.830,80	1,19
Proterozoico Paleoproterozoica	Amazônia	Parauari	1.713,97	1,11
Orosiriano				
Fanerozoico Mesozoica Cretáceo	Parecis	Utiariti	1.453,07	0,94
Superior				
Corpos d'água continental	-	-	1.420,68	0,92
Proterozoico Paleoproterozoica	Amazônia	Gorotire	1.098,18	0,71
Estateriano				
Proterozoico Paleoproterozoica	Amazônia	Iriri	1.042,00	0,68
Orosiriano				
Arqueano Mesoarqueana	Amazônia	Granodiorito Rio Maria	864,78	0,56
Arqueano Mesoarqueana	Amazônia	Quixadá	855,57	0,56
Proterozoico Neoproterozoica	Tocantins	Diamantino	750,51	0,49
Ediacarano				
Proterozoico Neoproterozoica	Tocantins	Complexo Granulítico	708,70	0,46
Ediacarano		Porangatu		
Proterozoico Paleoproterozoica	Amazônia	Jamon	698,89	0,45
Orosiriano				
Proterozoico Neoproterozoica	Tocantins	Quatipuru	543,47	0,35
Toniano				
Fanerozoico Paleozoica Devoniano	Parnaíba	Cabeças	518,88	0,34
Médio Givetiano				
Proterozoico Paleoproterozoica	Amazônia	Sienogranito Redenção	511,59	0,33
Fanerozoico Cenozoica Quaternário	Cobertura	Terraços Holocênicos	500,76	0,33
Holoceno	Cenozoica			
Arqueano Mesoarqueana	Tocantins	Colméia	468,73	0,30

Continua...

Tabela 2.2. Continuação.

Tempo Geológico	Província Geológica	Unidade Geológica	Área (km²)	Área (%)
Fanerozoico Paleozoica Permiano Cisuraliano	Parnaíba	Pedra de Fogo	440,92	0,29
Fanerozoico Mesozoica Cretáceo Superior	Tocantins	Rio das Barreiras	422,46	0,27
Arqueano Mesoarqueana	Amazônia	Morada da Prata	405,71	0,26
Fanerozoico Paleozoica Permiano Lopingiano	Parnaíba	Motuca	310,38	0,20
Proterozoico Neoproterozoica Ediacarano	Tocantins	Lajeado	294,53	0,19
Fanerozoico Paleozoica Siluriano	Tocantins	Água Bonita	259,20	0,17
Proterozoico Paleoproterozoica	Tocantins	Gnaiss Cantão	251,57	0,16
Arqueano Neoarqueana	Tocantins	Rio do Coco	241,46	0,16
Proterozoico Neoproterozoica	Tocantins	Estrondo	237,18	0,15
Fanerozoico Paleozoica Carbonífero Mississipiano	Parnaíba	Poti	192,02	0,12
Proterozoico Paleoproterozoica Orosiriano	Amazônia	Rio Naja	153,94	0,10
Fanerozoico Paleozoica Carbonífero Pensilvaniano	Parnaíba	Piauí	145,01	0,09
Proterozoico Paleoproterozoica Estateriano	Amazônia	Tarumã	135,58	0,09
Arqueano Mesoarqueana	Amazônia	Andorinhas	126,31	0,08
Fanerozoico Cenozoica Quaternário Holoceno	Cobertura Cenozoica	Areias Quartzosas	88,00	0,06
Proterozoico Paleoproterozoica	Tocantins	Stocks e Diques Máfico-Ultramáficos	85,58	0,06
Proterozoico Neoproterozoica	Tocantins	Matança	79,01	0,05
Proterozoico Neoproterozoica Toniano	Tocantins	Manoel Alves	74,06	0,05
Fanerozoico Cenozoica Quaternário Pleistoceno Gelasiano	Cobertura Cenozoica	Terraços Pleistocênicos	64,74	0,04
Arqueano Neoarqueana	Amazônia	Rochas Máficas e Ultramáficas de posicionamento duvidoso	50,47	0,03
Proterozoico Paleoproterozoica	Tocantins	Gabro-Diorítica de Posselândia	48,29	0,03
Proterozoico Paleoproterozoica Estateriano	Tocantins	Serra da Mesa - Unidade Xisto Quatzítica	39,31	0,03
Fanerozoico Paleozoica Devoniano Superior Frasniano	Parnaíba	Longá	38,86	0,03
Proterozoico Paleoproterozoica Estateriano	Amazônia	Rio Dourado	32,65	0,02
Proterozoico Paleoproterozoica Estateriano	Amazônia	Sienito Rio Cristalino	23,43	0,02
Fanerozoico Mesozoica Cretáceo	Parecis	Salto das Nuvens	22,76	0,01
Proterozoico Neoproterozoica Toniano	Tocantins	Monte Santo	18,88	0,01
Proterozoico Paleoproterozoica Orosiriano	Amazônia	Tocandera	11,22	0,01
Proterozoico Paleoproterozoica Orosiriano	Tocantins	Serrote	10,70	0,01
Proterozoico Neoproterozoica	Tocantins	Santa Tereza	10,58	0,01

Continua...

Tabela 2.2. Continuação.

Tempo Geológico	Província Geológica	Unidade Geológica	Área (km ²)	Área (%)
Proterozoico Neoproterozoica Toniano	Tocantins	Tocantins	5,20	0,003
Arqueano Mesoarqueana	Amazônia	Tucumã	4,78	0,003
Arqueano Mesoarqueana	Amazônia	Trondhjemito Mogno	1,30	0,001

⁽¹⁾ Fonte do banco de dados: de bacias hidrográficas (ANA, 2016) e tabela de atributos de geologia (IBGE, 2021).

Na sequência, as Unidades Couto Magalhães e Cobertura Detrito-Laterítica Neo-Pleistocênica representam 18,93% e 7,27% do segmento e 51,67% e 19,46% das Províncias Tocantins e Cobertura Cenozoica, respectivamente. A Unidade Arco Verde representa 7,03% do segmento e 32,18% da Província Amazônia. Por último, as Unidades Xambioá e Depósitos Aluvionares Holocênicos ocupam 6,03% e 5,76% do segmento e representam 16,46% e 15,40% das Províncias Tocantins e Cobertura Cenozoica. As demais Unidades Geológicas e corpos d'água continental motradas na Tabela 2.2, com menor representatividade, completam o segmento da bacia hidrográfica Médio Araguaia, para cada Província Geológica apresentada na Figura 2.4.

A Figura 2.5 mostra a distribuição das Províncias Geológicas dentro do Baixo Araguaia. A Província Parnaíba corresponde a 39,8% da área total, principalmente nas regiões Sudeste, Nordeste e Norte do segmento. Já a Província Tocantins representa 35,5% da geologia do Baixo Araguaia, distribuída entre as regiões Sul, Sudoeste e Centro/Norte do segmento da bacia. A Cobertura Cenozoica distribuída de forma irregular colabora com 12,5% da geologia do Baixo Araguaia, enquanto a Província Amazônia coopera com 10,5% da geologia deste segmento, a Sudoeste da bacia. Corpos d'água continental complementam os outros 1,7% da área total do Baixo Araguaia.

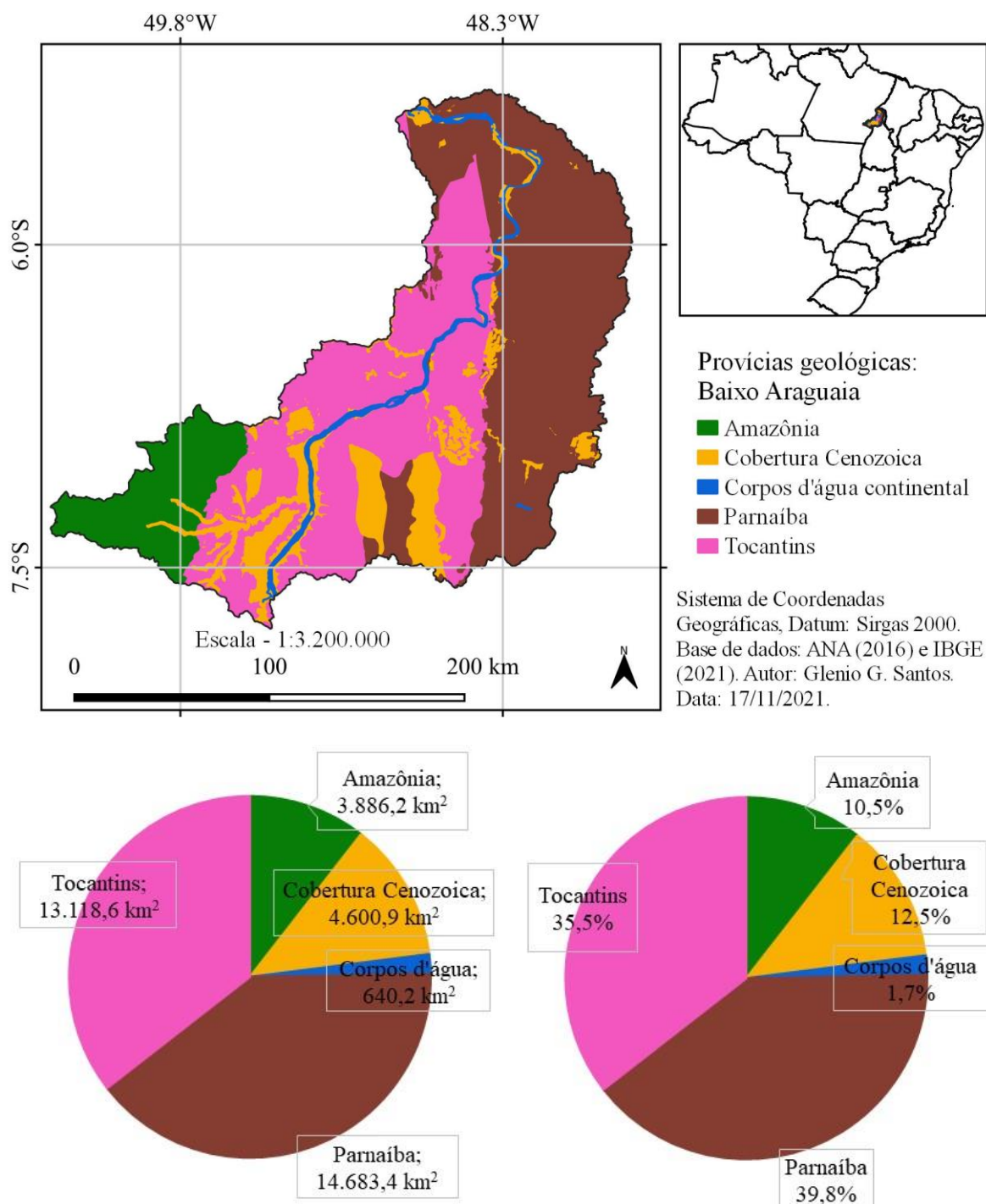


Figura 2.5. Geologia do segmento da bacia hidrográfica do Baixo Araguaia. Fonte do banco de dados: de bacias hidrográficas (ANA, 2016); de geologia (IBGE, 2021). Software usado para confecção dos mapas: QGis 3.22.0 (2021).

No que diz respeito às Unidades Geológicas que compõem o segmento da bacia hidrográfica Baixo Araguaia (Tabela 2.3), a Xambioá é a mais representativa, ocupando 11,26% do segmento e 31,71% da Província Tocantins (IBGE, 2021).

Tabela 2.3. Representatividade das Unidades Geológicas⁽¹⁾ do segmento da bacia hidrográfica Baixo Araguaia, com respectivos tempos geológicos e Províncias Geológicas.

Tempo Geológico	Província Geológica	Unidade Geológica	Área no segmento (km ²)	Área no segmento (%)
Arqueano Mesoarqueana	Tocantins	Xambioá	4.160,01	11,26
Arqueano Mesoarqueana	Tocantins	Couto Magalhães	3.499,10	9,48
Fanerozoico Paleozoica Devoniano Médio Givetiano	Parnaíba	Sambaíba	3.202,11	8,67
Proterozoico Paleoproterozoica	Cobertura Cenozoica	Cobertura Detrito- Laterítica Neogênica	2.891,12	7,83
Fanerozoico Cenozoica Neógeno Mioceno	Parnaíba	Motuca	2.683,15	7,27
Fanerozoico Cenozoica Quaternário Pleistoceno Superior	Tocantins	Pequizeiro	2.639,82	7,15
Fanerozoico Cenozoica Paleógeno Oligoceno	Parnaíba	Itapeturu	1.928,62	5,22
Arqueano Mesoarqueana	Cobertura Cenozoica	Depósitos Aluvionares Holocênicos	1.531,33	4,15
Fanerozoico Mesozoica Jurássico Médio	Parnaíba	Mosquito	1.472,47	3,99
Corpos d'água continental	Parnaíba	Corda	1.425,83	3,86
Proterozoico Neoproterozoica	Parnaíba	Pedra de Fogo	1.403,91	3,80
Fanerozoico Cenozoica Quaternário Holoceno	Tocantins	Rio das Barreiras	1.289,73	3,49
Fanerozoico Cenozoica Quaternário Pleistoceno Gelasiano	Parnaíba	Pimenteiras	1.245,15	3,37
Proterozoico Paleoproterozoica	Amazônia	Xingu	776,08	2,10
Arqueano Neoarqueana	Tocantins	Serra do Tapa	763,18	2,07
Proterozoico Neoproterozoica	Amazônia	Trondhjemitó Mogno	678,98	1,84
Corpos d'água continental	Corpos d'água continental	Corpos d'água continental	640,22	1,73
Arqueano Mesoarqueana	Parnaíba	Poti	583,99	1,58
Fanerozoico Mesozoica Cretáceo Inferior Albiano	Tocantins	Morro do Campo	562,66	1,52
Proterozoico Paleoproterozoica Orosiriano	Amazônia	Andorinhas	547,87	1,48
Fanerozoico Paleozoica Devoniano Superior Frasniano	Parnaíba	Piauí	529,09	1,43
Proterozoico Neoproterozoica	Amazônia	Granito Xinguara	488,92	1,32
Fanerozoico Mesozoica Triássico Superior Noriano	Amazônia	Granodiorito Rio Maria	369,35	1,00
Fanerozoico Paleozoica Permiano Lopingiano	Amazônia	São Roque	246,28	0,67
Fanerozoico Mesozoica Jurássico Médio	Amazônia	Sapucaia	241,81	0,65
Fanerozoico Paleozoica Permiano Cisuraliano	Amazônia	Cachoeirinha	217,29	0,59
Proterozoico Neoproterozoica Toniano	Amazônia	Jamon	208,49	0,56
Fanerozoico Paleozoica Carbonífero Pensilvaniano	Tocantins	Colméia	180,60	0,49

Continua...

Tabela 2.3. Continuação.

Tempo Geológico	Província Geológica	Unidade Geológica	Área no segmento (km ²)	Área no segmento (%)
Fanerozoico Paleozoica Devoniano Médio Givetiano	Parnaíba	Cabeças	100,17	0,27
Fanerozoico Paleozoica Carbonífero Mississipiano	Cobertura Cenozoica	Cobertura Detrito- Laterítica Paleogênica	89,51	0,24
Fanerozoico Mesozoica Cretáceo Superior	Parnaíba	Longá	78,86	0,21
Proterozoico Paleoproterozoica Orosiriano	Cobertura Cenozoica	Depósitos Coluviais Pleistocênicos	72,19	0,20
Fanerozoico Mesozoica Triássico Médio Anisiano	Amazônia	Arco Verde	62,61	0,17
Arqueano Neoarqueana	Amazônia	Granito Plaquê	30,40	0,08
Proterozoico Neoproterozoica Toniano	Parnaíba	Pastos Bons	30,00	0,08
Arqueano Mesoarqueana	Tocantins	Gnaisse Cantão	23,28	0,06
Arqueano Mesoarqueana	Cobertura Cenozoica	Cobertura Detrito- Laterítica Neo- Pleistocênica	16,73	0,05
Proterozoico Neoproterozoica	Amazônia	Tucumã	13,22	0,04
Arqueano Mesoarqueana	Tocantins	Granito Ramal do Lontra	5,15	0,01

⁽¹⁾ Fonte do banco de dados: de bacias hidrográficas (ANA, 2016) e tabela de atributos de geologia (IBGE, 2021).

Na sequência, as Unidades Couto Magalhães e Sambaíba representam 9,48% e 8,67% do segmento e 26,67% e 21,81% das Províncias Tocantins e Parnaíba, respectivamente. As Unidades Cobertura Detrito-Laterítica Neogênica, Motuca e Pequizeiro representam 7,83%, 7,27% e 7,15% do segmento e 62,84%, 18,27% e 20,12% das Províncias Cobertura Cenozoica, Parnaíba e Tocantins. As demais Unidades Geológicas e corpos d'água continental mostradas na Tabela 2.3, com menor representatividade, completam o segmento da bacia hidrográfica Médio Araguaia, para cada Província Geológica apresentada na Figura 2.5.

A Figura 2.6 mostra a distribuição das Províncias Geológicas dentro da bacia do João Leite. A Província Tocantins corresponde a 90,5% da área total da bacia, distribuída de forma homogênea. Já a Província Cobertura Cenozoica representa 9,4% da geologia do João Leite, distribuída nas regiões Sudoeste, Centro, Norte e Nordeste da bacia. Corpos d'água continental complementam os outros 0,1% da área total.

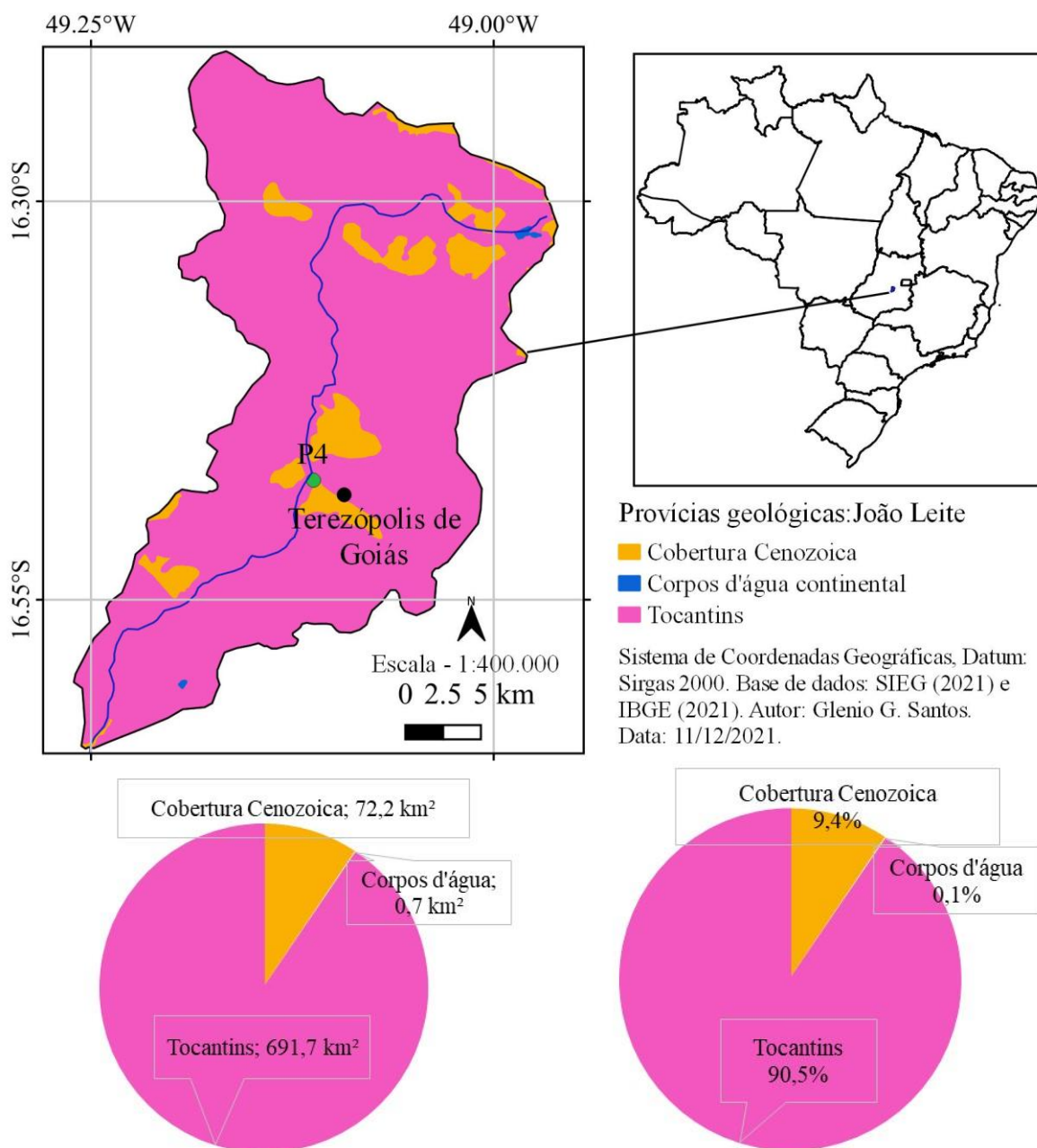


Figura 2.6. Geologia da bacia hidrográfica do João Leite. Fonte do banco de dados: de bacias hidrográficas (SIEG, 2021); de geologia (IBGE, 2021). Software usado para confecção dos mapas: QGis 3.22.0 (2021).

A Tabela 2.4 mostra a representatividade das Unidades Geológicas que compõem a bacia hidrográfica do João Leite, onde as Unidades Granulítico Anápolis-Itauçu - Associação Ortogranulitos e Granulítico Anápolis-Itauçu - Associação Supracrustais são as mais representativas, ocupando respectivamente, 45,01% e 38,64% da bacia e 49,75% e 42,71% da Província Tocantins (IBGE, 2021).

Tabela 2.4. Representatividade das Unidades Geológicas⁽¹⁾ da bacia hidrográfica João Leite, com respectivos tempos geológicos e Províncias Geológicas.

Tempo Geológico	Província Geológica	Unidade Geológica	Área (km²)	Área (%)
Proterozoico				
Neoproterozoica	Tocantins	Granulítico Anápolis-Itauçu - Associação Ortogranulitos	344,141	45,01
Criogeniano				
Proterozoico				
Neoproterozoica	Tocantins	Granulítico Anápolis-Itauçu - Associação Supracrustais	295,406	38,64
Criogeniano				
Fanerozoico Cenozoica	Cobertura Cenozoica	Cobertura Detrito-Laterítica	64,057	8,38
Neógeno Mioceno		Neogênica		
Proterozoico				
Paleoproterozoica	Tocantins	Jurubatuba	41,172	5,39
Riacciano				
Proterozoico				
Paleoproterozoica	Tocantins	Sequência Metavulcanossedimentar	10,955	1,43
Riacciano		Silvânia		
Fanerozoico Cenozoica	Cobertura Cenozoica	Cobertura Detrito-Laterítica	7,151	0,94
Paleógeno Oligoceno		Paleogênica		
Fanerozoico Cenozoica	Cobertura Cenozoica	Depósitos Aluvionares	0,952	0,12%
Quaternário Holoceno		Holocênicos		
Corpos d'água continental	Corpos d'água continental	Corpos d'água continental	0,722	0,09

⁽¹⁾ Fonte do banco de dados: de bacias hidrográficas (SIEG, 2021) e tabela de atributos de geologia (IBGE, 2021).

A Cobertura Detrito-Laterítica Neogênica e a Jurubatuba correspondem a 8,38% e 5,39% da bacia e 88,77% e 5,95% das Províncias Cobertura Cenozoica e Tocantins. As demais Unidades Geológicas e corpos d'água continental, com menor representatividade, completam a bacia hidrográfica do João Leite, para cada Província Geológica.

2.3 GEOMORFOLOGIA DA BACIA HIDROGRÁFICA DO ARAGUAIA

A geomorfologia da bacia hidrográfica do Araguaia (Figuras 2.7, 2.8 e 2.9) agrega os seguintes domínios: Bacias e Coberturas Sedimentares Fanerozóicas, Cinturões Móveis Neoproterozóicos, Crátons Neoproterozóicos e Depósitos Sedimentares Quaternários, conforme banco de dados do IBGE (2021). Esses domínios são comuns aos três segmentos da bacia, variando apenas na sua representatividade e distribuição.

No segmento Alto Araguaia (Figura 2.7), as Bacias e Coberturas Sedimentares Neoproterozóicas representam 36,7% da área total, distribuída principalmente nas regiões Sul e Sudoeste. Os Depósitos Sedimentares Quaternários cooperam com 27,7%, enquanto os Crátons Neoproterozóicos colaboram com 21,7% da área total deste segmento da bacia. Por último, 13,0% desta área faz parte dos Cinturões Móveis Neoproterozóicos e 0,9% é ocupado por corpos d'água continental.

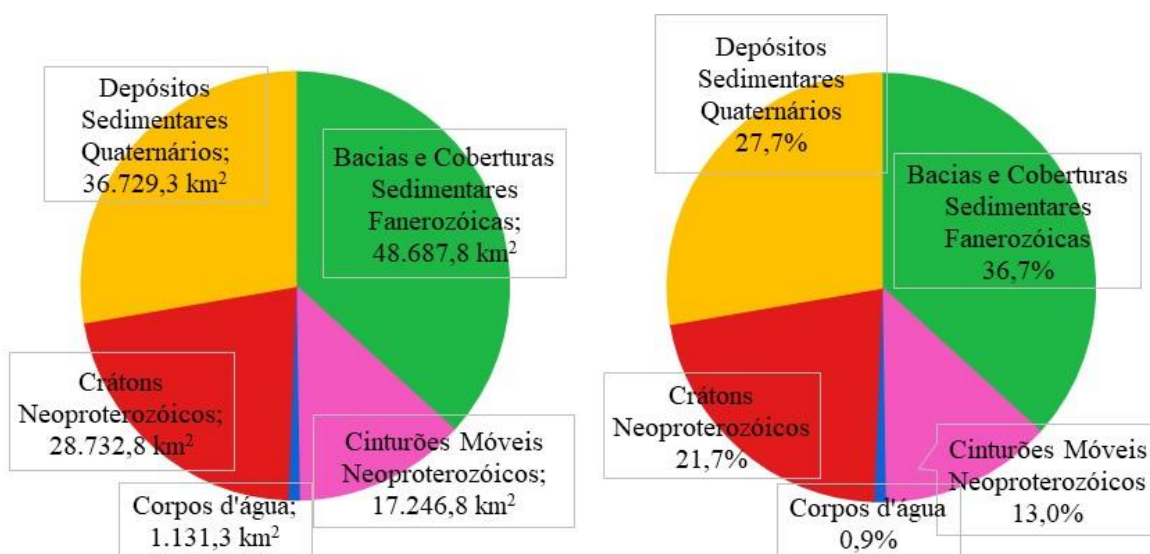
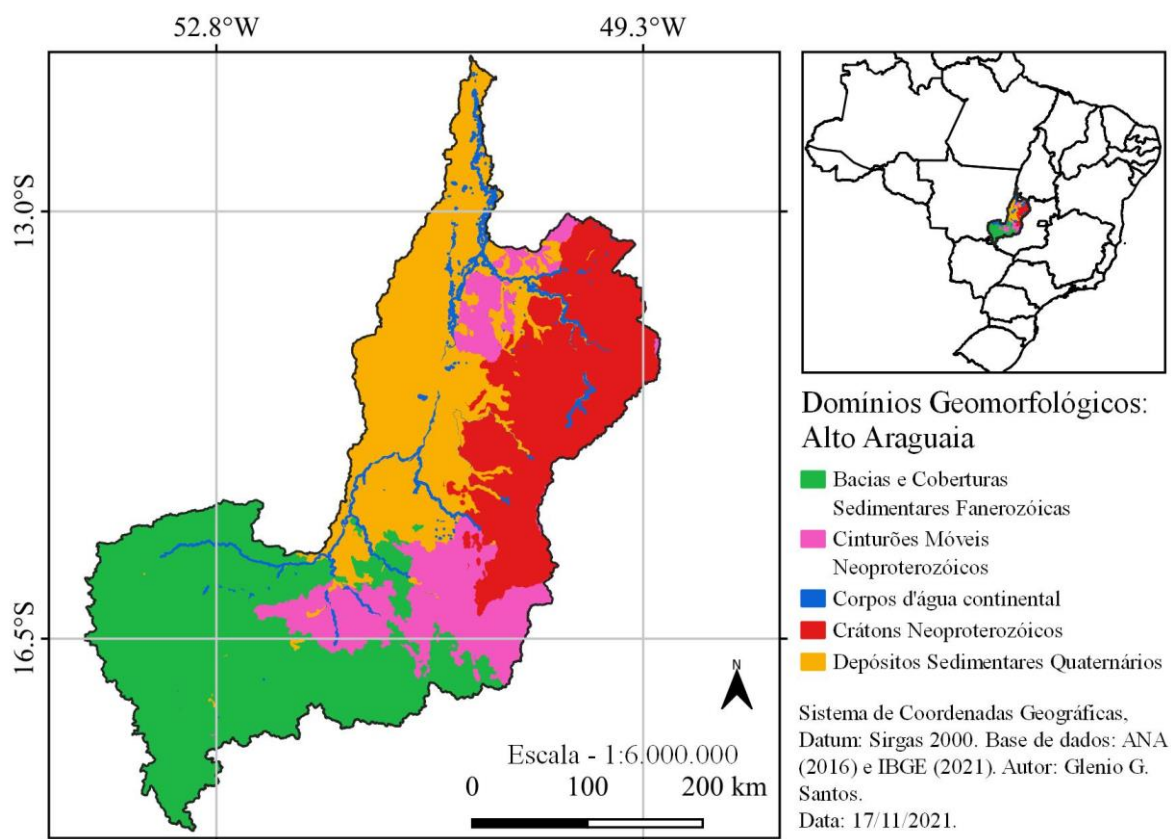


Figura 2.7. Geomorfologia do segmento da bacia hidrográfica do Alto Araguaia. Fonte do banco de dados: de bacias hidrográficas (ANA, 2016); de geomorfologia (IBGE, 2021). Software usado para confecção dos mapas: QGis 3.22.0 (2021).

No médio Araguaia (Figura 2.8), os Cinturões Móveis Neoproterozóicos representam 45,7% da área total do segmento da bacia e estão distribuídos entre as regiões Sudeste, Sudoeste, Nordeste e Norte. Os Crátons Neoproterozóicos representam 23,7% do

segmento da bacia e sua distribuição está, principalmente, nas regiões Sul, Sudoeste e Centro, com pequenas incursões entre as regiões Norte, Noroeste e Nordeste.

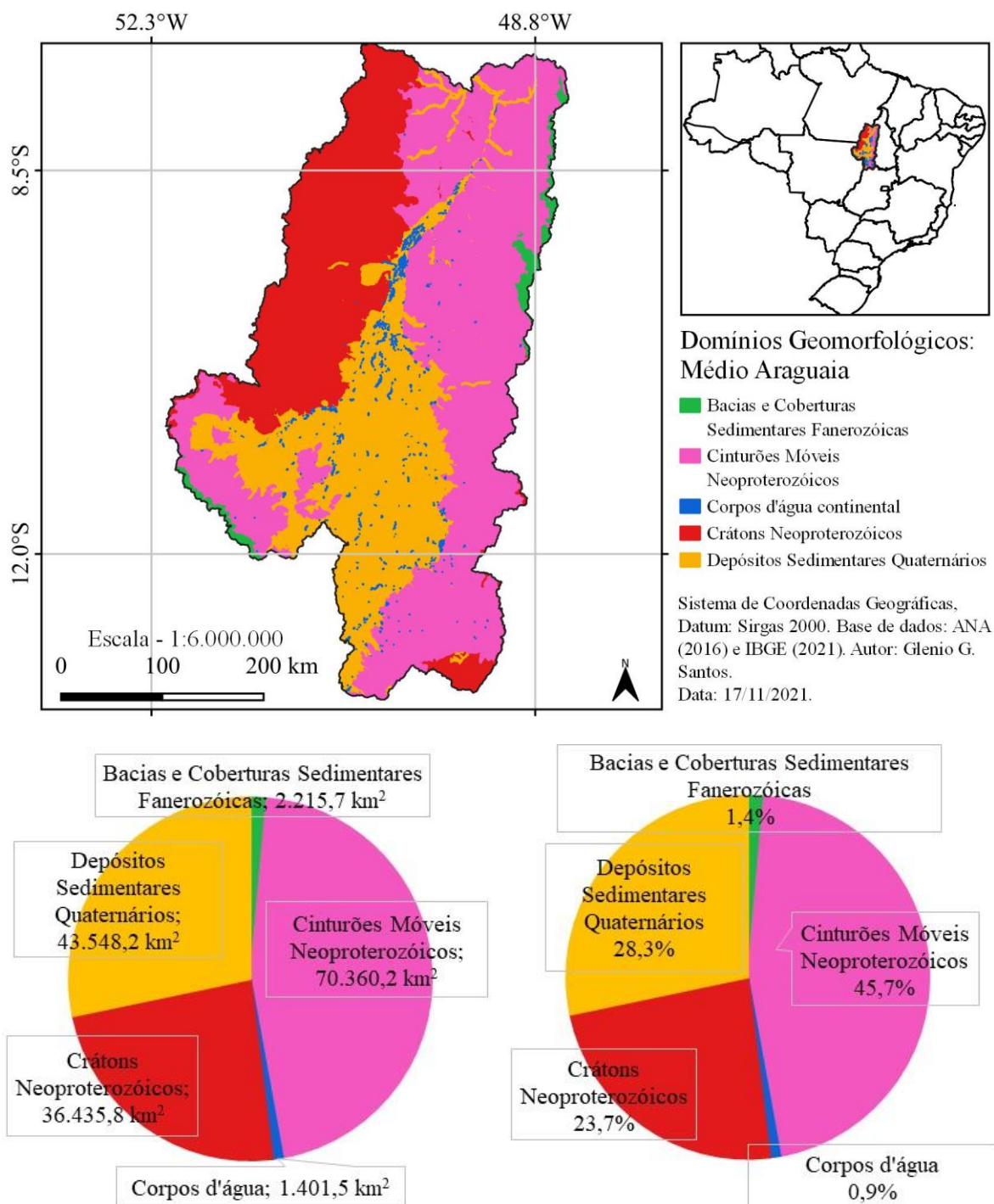


Figura 2.8. Geomorfologia do segmento da bacia hidrográfica do Médio Araguaia. Fonte do banco de dados: de bacias hidrográficas (ANA, 2016); de geomorfologia (IBGE, 2021). Software usado para confecção dos mapas: QGis 3.22.0 (2021).

A geomorfologia do Baixo Araguaia (Figura 2.9) apresenta ampla dominância dos Cinturões Móveis Neoproterozóicos, com 80,7% da área total, distribuídos uniformemente

em todas as regiões deste segmento. Os Crátons Neoproterozóicos representam 8,1%, as Bacias e Coberturas Sedimentares Fanerozóicas colaboram com 6,9% e os Depósitos Sedimentares Quaternários cooperam com 2,5% deste segmento da bacia. Os outros 1,7% do segmento são completados com corpos d'água continental.

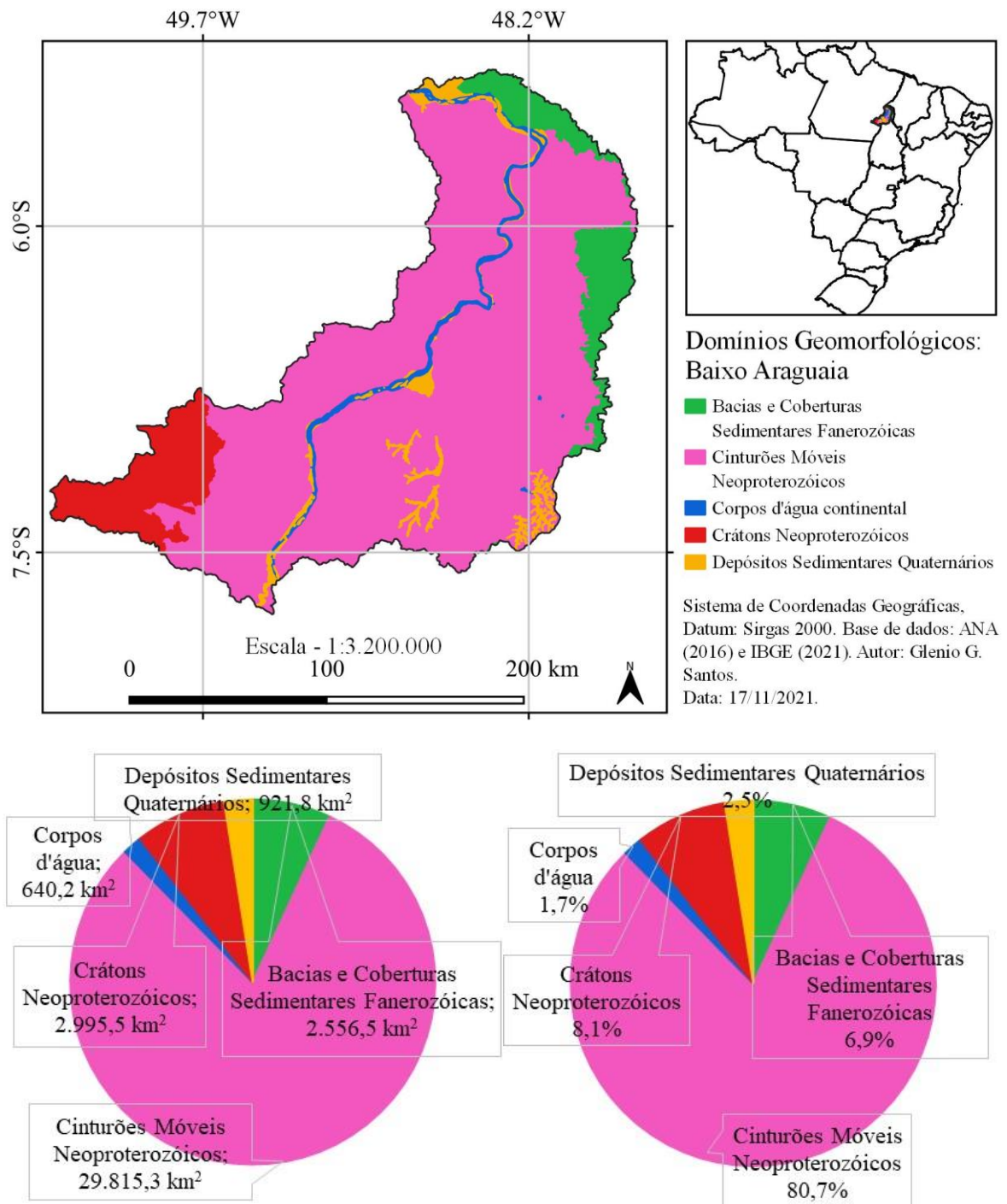


Figura 2.9. Geomorfologia do segmento da bacia hidrográfica do Baixo Araguaia. Fonte do banco de dados: de bacias hidrográficas (ANA, 2016); de geomorfologia (IBGE, 2021). Software usado para confecção dos mapas: QGis 3.22.0 (2021).

A geomorfologia da bacia hidrográfica do João Leite (Figura 2.10) apresenta ampla dominância dos Cinturões Móveis Neoproterozóicos, com 99,7% da área total, distribuídos uniformemente em todas as regiões deste segmento, enquanto os Depósitos Sedimentares Quaternários representam apenas 0,2% e corpos de água continental apenas 0,1% da bacia (IBGE, 2021; SIEG, 2021).

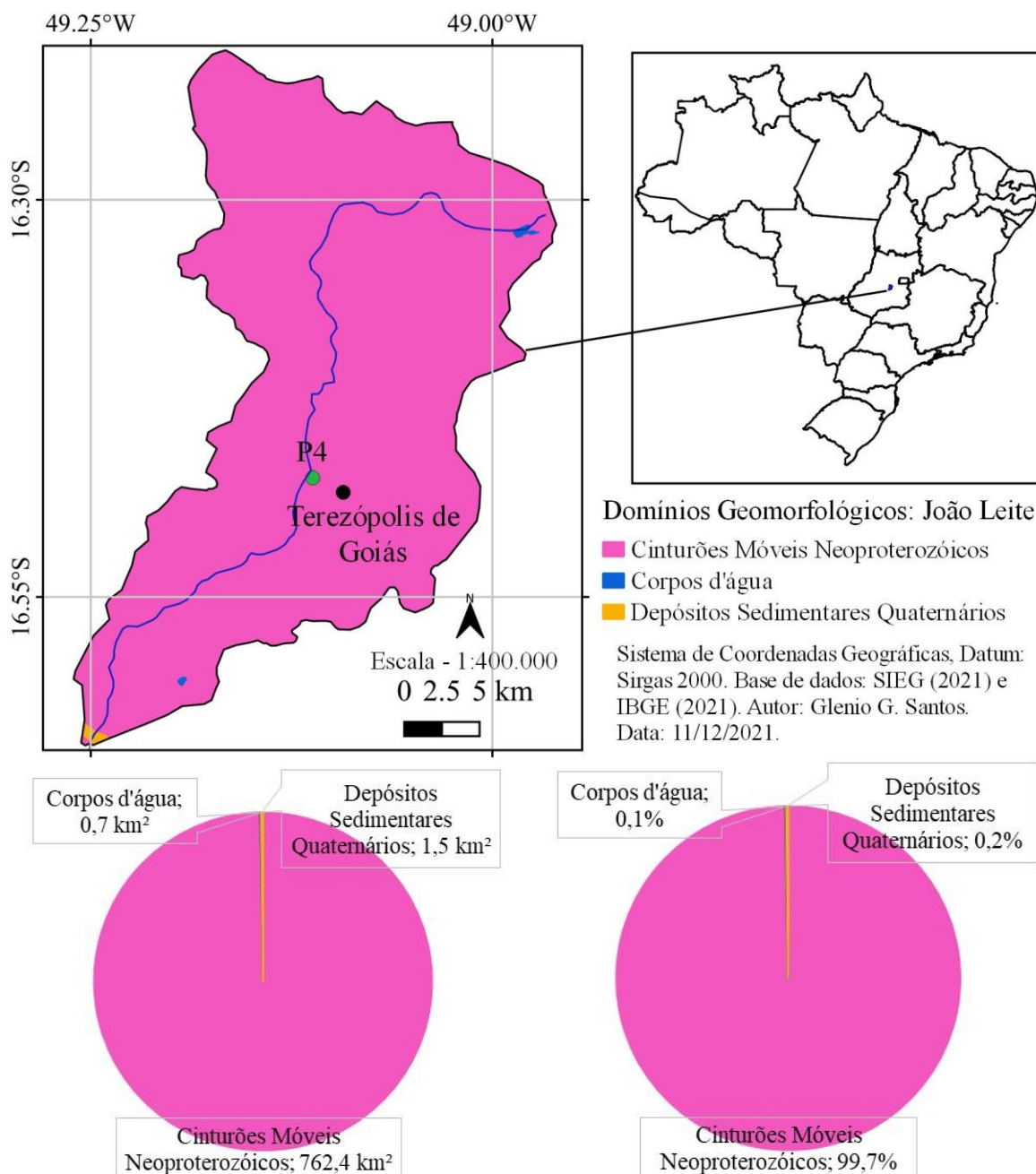


Figura 2.10. Geomorfologia da bacia hidrográfica do João Leite. Fonte do banco de dados: de bacias hidrográficas (SIEG, 2021); de geomorfologia (IBGE, 2021). Software usado para confecção dos mapas: QGis 3.22.0 (2021).

2.4 PAISAGEM DO VALE DO ARAGUAIA E DA PLANÍCIE DO JOÃO LEITE

A paisagem do Vale do Rio Araguaia é formada por imensas planícies e depressões alagadas em épocas sazonais, com predomínio de vegetação campestre associada a murundus, e fitofisionomias florestais do tipo Ipucas e do tipo Cerrado com diferentes densidades arbustivas (Martins et al., 2008; Maranhão et al., 2017). O ambiente pedogeomorfológico é bastante intrínseco (Schaefer et al., 2009; Maranhão et al., 2017), principalmente nas áreas onde ocorrem sucessivas oscilações do lençol freático, e consequentemente, surgem as feições pedológicas com certas particularidades, sobretudo com uma vegetação local governada principalmente pelo regime hidrológico (Maranhão, 2018).

Na paisagem da Planície do Rio Araguaia, há microrrelevos distribuídos ao longo do Vale (Araújo-Neto et al., 1986), apresentando padrões distintos conforme o grau de saturação hídrica do solo (Marimon & Lima, 2001). Nesta planície, os processos erosivos variam em função do tempo e espaço, em que eventos climáticos e antrópicos deixam feições na paisagem (Dotterweich, 2013; Comino et al., 2016; Mhazo et al., 2016). Destacam-se a intensidade dos processos em uma longa escala de tempo, principalmente a chuva, a cobertura vegetal, o relevo, solos e o aspecto geológico. Quanto aos aspectos de natureza antrópica, destacam-se o desmatamento e as formas de uso e ocupação do solo (Coe et al., 2011).

As características intrínsecas do ambiente são formadas por fatores e processos de formação do solo sendo que, desse modo, o sistema (solo) sempre buscará um equilíbrio, inclusive com registros do que ocorreu no pretérito, tal como a interações com a biosfera. A compreensão da variabilidade espacial do solo, o seu desenvolvimento ao longo do tempo (pedogênese) e suas relações funcionais com os processos recentes na paisagem, estão entre os desafios da ciência do solo, comumente relatados na literatura (Maranhão, 2018).

A bacia hidrográfica do João Leite é formada por sete municípios goianos, tendo sua paisagem na região central da bacia, formada por vegetação de cerrado e, nas bordas da bacia é possível encontrar Floresta Estacional Decidual ou Semidecidual (Silva et al., 2009; Oliveira, 2013). A cobertura vegetal configura aproximadamente 29,75% de cobertura com vegetação de cerrado remanescente e 70,25% modificada por ações antrópicas (Nishi et al., 2010). O relevo varia de plano a suavemente ondulado, circundada por relevos mais movimentados (Oliveira, 2013).

2.5 FEIÇÕES REDOXIMÓRFICAS

Características redoximórficas são padrões de cor em um solo causados pela perda (esgotamento) ou ganho (concentração) de pigmento em comparação com a cor da matriz (Schoeneberger et al., 2012), e são formadas pela redução e oxidação de compostos de Fe (ferro) e Mn (manganês) em solos saturados sazonalmente por água. Como esses recursos podem ser vistos a olho nu ou com lentes de mão, eles podem ser descritos no campo. No horizonte A da maioria dos solos intemperizados (desenvolvidos), a matéria orgânica pode mascarar as características do ferro e/ou parte ou todo o ferro pode ter sido lixiviado deste horizonte. Para solos jovens (como os de várzea) e em solos áridos (muito secos), esse pode não ser o caso. Nos horizontes do subsolo, os minerais de óxido de ferro dão aos horizontes as cores vermelha, marrom, amarela ou laranja, dependendo de quais minerais de ferro estão presentes. Os óxidos de manganês produzem cores pretas. Esses óxidos tendem a revestir as superfícies das partículas do solo. Sem os revestimentos de óxido, as partículas são cinza, que é sua cor natural (NRCS, 2011).

As áreas do solo onde o ferro é reduzido frequentemente desenvolvem cores cinza-azuladas ou cinza-esverdeadas características, conhecidas como gley. O ferro férrico é insolúvel, mas o ferro ferroso entra facilmente na solução do solo e pode ser movido ou translocado para outras áreas do solo (Vasilas et al., 2010). As áreas que perderam ferro geralmente desenvolvem cores cinza ou avermelhadas características e são conhecidas como depleções redox. Se um solo voltar a um estado aeróbio, o ferro que está em solução se oxidará e se concentrará em manchas e ao longo dos canais radiculares e outros poros. Essas áreas de ferro oxidado são chamadas de concentrações redox (NRCS, 2011; Schoeneberger et al., 2012). Como o movimento da água nesses solos saturados ou inundados pode ser multidirecional, depleções e concentrações redox podem ocorrer em qualquer lugar do solo e ter formas e tamanhos irregulares (Vepraskas et al., 2018). Solos que estão saturados e contêm ferro ferroso no momento da amostragem podem mudar de cor quando expostos ao ar, pois o ferro ferroso é rapidamente convertido em ferro férrico na presença de oxigênio. Diz-se que esses solos têm uma matriz reduzida (Vepraskas, 1995). Embora os indicadores relacionados à depleção ou concentração de ferro ou manganês sejam os mais comuns em solos hídricos, eles não podem se formar em solos cujos materiais originais são baixos em Fe ou Mn. Solos formados em tais materiais podem ter cores de baixo croma que não estão relacionadas à saturação e redução. Para tais solos, características formadas pelo acúmulo de carbono orgânico podem estar presentes. Quando

existem condições aeróbicas, as bactérias decompõem a matéria orgânica e consomem oxigênio nos poros do solo que contêm ar. Em condições anaeróbicas, as bactérias decompõem a matéria orgânica consumindo oxigênio dissolvido até que ele desapareça. Nesse ponto, a água do solo é reduzida. As bactérias continuam consumindo matéria orgânica, mas em um ritmo mais lento. Eles produzem produtos químicos orgânicos que reduzem os nitratos e minerais, incluindo óxidos de ferro e manganês (NRCS, 2011).

Quando um horizonte é repetidamente saturado, reduzido e drenado, as massas de Fe se formarão onde o ar penetra no horizonte lentamente para oxidar os íons de Mn e Fe reduzidos. Acredita-se que os nódulos e concreções se formem quando o ar penetra rapidamente, talvez em um ponto na matriz úmida contendo Fe (II) e Mn (II). Uma matriz reduzida se forma simplesmente pela redução do Fe no solo. Isso requer que o horizonte do solo seja saturado para excluir o ar por um período de tempo longo o suficiente para que ocorra a redução do Fe. Matrizes reduzidas só podem ocorrer onde matéria orgânica solúvel está presente e microorganismos são ativos (NRCS, 2011; Schoeneberger et al., 2012).

Resumindo, feições redoximórficas são materiais do solo onde ocorrem ganhos ou perdas de óxidos de ferro, dentre outros elementos (Kämpf & Curi, 2012; Schoeneberger et al., 2012; Soil Survey Staff, 2014). Dessa forma, as principais feições redoximórficas presentes no Vale do Rio Arguaia e na bacia do João Leite são; mosqueados, plintitas e petroplintitas (excluído a matriz do solo, onde se percebe aparecimento de primeiros mosqueados brancos no local do perfil), todas de coloração variando de vermelho a amarelo claros ou escuros e de consistência e dureza diferenciadas.

2.5.1 Mosqueado

A primeira referência ao termo mosqueado na literatura está relacionada Buchanan em 1807, que encontrou, no Malabar-Índia, um material de solo mosqueado avermelhado, aparentemente rico em ferro, que era macio na escavação devido à sua condição macia natural, mas se tornou irreversivelmente duro como pedra quando deixado para secar ao ar livre (Buringh & Sombroek, 1971).

Os mosqueados são manchas com cores que diferem da cor da matriz do solo e são formados pelos processos de redução, translocação e oxidação de óxidos de Fe e Mn, e não podem ser separados manualmente da matriz do solo (IBGE, 2015). Tecnicamente, de acordo com Vepraskas (1995), mosqueados incluem acumulações de carbonato e manchas

orgânicas que não indicam, necessariamente, saturação e redução. Entretanto, como as características redoximórficas foram definidas, em sua maior parte, usando conceitos micromorfológicos (Bullock et al., 1985), e essas feições, em especial mosqueados, podem ser vistos a olho nu ou com lentes manuais, elas podem ser descritas por mapeadores de solo diretamente no campo.

Na prática no Brasil, um horizonte pode ter cor única ou apresentar multiplicidade de cores. No caso de haver predominância de uma cor sobre as demais, tem-se os mosqueados, e quando não se pode distinguir uma cor como sendo de fundo (matriz), tem-se a coloração variegada. Para os mosqueados, descreve-se a cor da matriz (cor de fundo), a(s) cor(es) do(s) principal(is) mosqueado(s) e a caracterização dos mosqueados, de acordo com sua quantidade, tamanho e contraste (IBGE, 2015).

2.5.2 Plintita

Já a plintita (derivada da palavra grega "plinthos", que significa pedra), é uma formação constituída da mistura de argila, pobre em carbono orgânico e rica em ferro, ou ferro e alumínio, com grãos de quartzo e outros minerais (Buringh & Sombroek, 1971; Daniles et al., 1978; Soil Survey Staff, 2014; Santos et al., 2018). Ocorre comumente sob a forma de mosqueados vermelhos, vermelho-amarelados e vermelho-escuros, com padrões usualmente laminares, poligonais ou reticulados.

Quanto à gênese, a plintita se forma em ambiente úmido pela segregação de ferro, importando em mobilização, transporte e concentração final dos compostos de ferro, que pode se processar em qualquer solo onde o teor de ferro for suficiente para permitir sua segregação sob a forma de manchas vermelhas ou amareladas brandas (IBGE, 2015; Santos et al., 2018), ou de coloração escura, quando originadas de segregação do Mn. Ainda, segundo estes autores, em condições naturais, a plintita não endurece irreversivelmente como resultado de um único ciclo de umedecimento e secagem. A plintita é geralmente caracterizada por um alto teor de Fe (na forma de hematita, goethita e compostos de óxidos mal cristalizados) e/ou alumínio em relação a outros componentes (Buringh & Sombroek, 1971; Lal & Stewart, 1990; Soil Survey Staff, 2014).

Morfologicamente, a plintita é separável da matriz do solo e pode resistir ao rolamento entre os dedos (IBGE, 2015; WRB, 2015; Santos et al., 2018). A plintização é o processo pedogenético de formação da plintita (Buringh & Sombroek, 1971; van Breemen & Buurman, 2002; Buol et al., 2011). Finalmente, a plintita é utilizada como propriedade

diagnóstica para caracterizar horizonte plíntico em solos da ordem dos Plintossolos (Santos et al., 2018).

A plintita e suas formas relacionadas podem fornecer informações do ambiente passado sob o qual se formaram, uma vez que sua natureza a preserva de ser completamente erodida durante as mudanças ambientais (Eze et. al., 2014). Esse fato provou ser uma ferramenta inestimável para cientistas envolvidos em reconstruções paleoambientais e paleoclimáticas (Ding et al., 1998; Guo et al., 2002; Hao et al., 2002; Liu et al., 2003).

2.5.3 Petroplintita

A petroplintita, também conhecida como “lateritas” (Alexander & Cady, 1962), referem-se a nódulos endurecidos, concreções ferruginosas ou acúmulos maciços de argila e mistura de sesquióxidos (Watana, 2005). Este material normalmente é proveniente da plintita que, sob efeito de ciclos repetitivos de umedecimento seguidos de ressecamento acentuado, sofre consolidação vigorosa, dando lugar à formação de nódulos ou de concreções ferruginosas (*ironstone*, concreções lateríticas, canga, tapanhoacanga) de dimensões e formas variadas (laminar, nodular, esferoidal ou alongada), posicionadas verticalmente ou irregularmente e individualizadas ou aglomeradas (Eswaran et al., 1990; Beinroth et al., 1996; Eze et al., 2014; Soil Survey Staff, 2014; Martins et al., 2018a, b).

A petroplintita é utilizada como propriedade diagnóstica para caracterizar horizonte concrecionário e litoplíntico em solos da ordem dos Plintossolos. Os solos com horizonte concrecionário são constituídos por 50% ou mais (volume) de material grosseiro, com predomínio dessa feição ferruginosa (IBGE, 2015; Santos et al., 2018). Por sua vez, o horizonte litoplíntico é caracterizado por apresentar petroplintita formando camada contínua ou praticamente contínua, que dificulta à penetração de raízes e o livre fluxo de água (IBGE, 2015; Santos et al., 2018).

2.5.4 Condições de transporte e enriquecimento/acumulação de sesquióxidos nas feições redoximórficas

O transporte de sesquióxidos pode ocorrer como: íons Fe^{2+} , importante no micro transporte como géis de oxihidrato de Fe/Al, possivelmente também importante no transporte lateral como Fe/Al; complexos de húmus: importante no transporte descendente no perfil do solo ("branqueamento/iluviação") como minerais de argila Fe/Al

possivelmente importantes no transporte descendente no perfil do solo, como processos de "lessivagem/argiluviação". Já as zonas de enriquecimento/acumulação de sesquióxidos são aquelas onde a água transportadora sofre uma alteração no potencial redox. Esse processo pode ser atribuído às seguintes situações: a) a água das chuvas percoladas para baixo, formando uma couraça no horizonte B (pseudo hidromorfismo acima do horizonte B compacto/adensado) ou uma couraça no horizonte glei (em regime hidromórfico propriamente dito) (D'Hoore, 1954); b) a penetração lateral ou inundação das águas fluviais, ricas em Fe/Al, dando origem à couraças de galerias; e c) a água subterrânea que se move por infiltração e, possivelmente, também alguma água capilar que se move para cima. O caráter fóssil das couraças de superfície é quase sempre estabelecido, sendo que o modo de enriquecimento mencionado no tópico "a" acima, de longe é mais difundido (Buringh & Sombroek, 1971). De acordo com Prescott & Pendleton (1952), D'Hoore (1954), Maignien (1958), Sombroek (1966) e Buringh & Sombroek (1971), as condições para acumulações absolutas de sesquióxidos, notadamente óxidos de ferro, seguem a sequência: a) drenagem variando de imperfeita a pobre; b) fornecimento de oxigênio temporário repetido; c) a entrada de água no solo sem substâncias enriquecedoras, ou seja, poucos ou nenhuma quantidade de sais inorgânicos, sem partículas sedimentares em suspensão.

2.6 REFERÊNCIAS

- ALEXANDER, L. T.; CADY, J. G. **Genesis and hardening of laterite in soils**. Washington: United States Department of Agriculture, 1962. 90 p. (Technical Bulletin, n. 1282).
- AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS E SANEAMENTO BÁSICO (Brasil); PORTAL DE METADADOS DO SNIRH. **Divisão de bacias hidrográficas - Unidade de planejamento hídrico**. Brasília, DF: ANA, 2016. Disponível em: https://metadados.snirh.gov.br/geonetwork/srv/api/records/fe192ba0-45a9-4215-90a5-3fba6abea174/attachments/SNIRH_UPH.zip. Acesso em: 09 de nov. 2021.
- ANJOS, L. H. C.; PEREIRA, M. G.; PÉREZ, D. V. RAMOS, D. P. Caracterização e classificação de Plintossolos no município de Pinheiro-MA. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 31, p. 1035-1044, 2007.
- ANJOS, L. H. C.; FRANZMEIER, D. P.; SCHULZE, D. G. Formation of soil with plinthite on a toposequence in Maranhão State, Brazil. **Geoderma**, Amsterdam, v. 64, n. 1, p. 257-279, 1995.

ARAÚJO-NETO, M. D.; FURLEY, P. A.; HARIDASAN, M.; JOHNSON, C. E. The murundus of the Cerrado region of Central Brazil. **Journal of Tropical Ecology**, Cambridg, v. 2, n. 1, p. 17-35, 1986.

BEAUVAIS, A.; COLIN, F. Formation and transformation processes of iron duricrust systems in tropical humid environment. **Chemical Geology**, Amsterdam, v. 106, n. 1, p. 77-101, 1993.

BEINROTH, F. H.; ESWARAN, H.; PALMIERI, F.; REICH, P. F. **Properties, classification and management of Oxisols**. Puerto Rico: Department of Agronomy and Soils/Washington, World Soil Resources, Natural Resources Conservation Service/Brasil, Centro Nacional de Pesquisa de Solos, 1996. 34 p.

BUCHANAN, F. **A journey from madras through the countries of Mysore, Canara and Malabar**. 2 ed. East Indian Company, London, 1807, p. 436-560.

BUOL, S. W.; SOUTHARD, R. J.; GRAHAM, R. C.; McDANIEL, P. A. **Soil genesis and classification**. 6. ed. Iowa: John Wiley & Sons, 2011. 560 p.

BULLOCK, P.; FEDOROFF, N.; JONGERIUS, A.; STOOPS, G.; TURSINA, T. **Handbook for soil thin section description**. Wolverhampton, England: Waine Research Publications, 1985. 152 p.

BURINGH, P.; SOMBROEK, W. G. **Ferrallitic and plinthitic soils**. Wageningen: Agricultural University, Departament of Tropical Soil Science, 1971. 95 p.

COE, M. T.; LATRUBESSE, E. M.; FERREIRA, M. E.; AMSLER, M. L. The effects of deforestation and climate variability on the streamflow of the Araguaia River, Brazil. **Biogeochemistry**, Dordrecht, v. 105, n. 1, p. 119-131, 2011.

COELHO, M. R.; VIDAL-TORRADO, P. Caracterização e gênese de perfis plínticos desenvolvidos de arenito do Grupo Bauru. I - Química. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 27, n. 1, p.483-494, 2003.

COMINO, J. R.; ISERLOH, T.; LASSU, T.; CERDÀ, A.; KEESTRA, S. D.; PROSDOCIMI, M.; BRINGS, C.; MARZEN, M.; RAMOS, M. C.; SENCIALES, J. M.; SINOGA, J. D. R.; SEEGER, M.; RIES, J. B. Quantitative comparison of initial soil erosion processes and runoff generation in Spanish and German vineyards. **Science of the Total Environment**, Amsterdam, v. 565, n. 1, p. 1165-1174, 2016.

CORINGA, E. A. O.; COUTO, E. G.; PEREZ, X. L. O.; VIDAL-TORRADO, P. Atributos de solos hidromórficos no Pantanal Norte Matogrossense. **Acta Amazonica**, Manaus, v. 42, n. 1, p. 19-28. 2012.

DANIELS, R. B.; PERKINS, H. F.; HAJEK, B. F.; GAMBLE, E. E. Morphology of discontinuous phase plinthite and criteria for its field identification in the southeastern United States. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 42, n. 1, p. 944-949, 1978.

D'HOORE, J. The description and classification of free sesquioxide accumulation zones. - *In: TRANSACTIONS 5TH INTERNATIONAL CONGRESS OF SOIL SCIENCE*, 5., 1954, Leopoldville. **Conference**. Leopoldville: 1954. p. 39-44.

DING, Z. L.; SUN, J. M.; YANG, S. L.; LIU, T. S. Preliminary magnetostratigraphy of a thick eolian red clay-loess sequence at Lingtai, the Chinese Loess Plateau. **Geophysical Research Letters**, New Jersey, v. 25, n. 8, p. 1225-1228, 1998.

DOTTERWEICH, M. The history of human-induced soil erosion: Geomorphic legacies, early descriptions and research, and the development of soil conservation - A global synopsis. **Geomorphology**, Amsterdam, v. 201, n. 1, p. 1-34, 2013.

ESWARAN, H.; DE CONINCK, F.; VARGHESE, T. Role of plinthite and related forms in soil degradation. *In: LAL, R.; STEWART, B. A. (ed.) Soil degradation: Advances in Soil Science*. New York: Springer-Verlag, 1990. v. 11, p. 109-127.

EZE, P. N.; UDEIGWE, P. K.; MEADOWS, M. E. Plinthite and its associated evolutionary forms in soils and landscapes: a review. **Pedosphere**, Amsterdam, v. 24, n. 2, p. 153-166, 2014.

GALLAHER, R. N.; PERKINS, H. F.; TAN, K. H. Classification, composition, and mineralogy of iron glaebules in a southern coastal plain soil. **Soil Science**, Baltimore, v. 117, n. 3, p. 155-164, 1974.

GARCIA, C. H. P.; LIMA, H. N.; SILVA, F. W. R.; JUNIOR, A. F. N.; TEIXEIRA, W. G.; MACEDO, R. S.; TAVARES, S. G. Chemical properties and mineralogy of soils with plinthite and petroplinthite in Iranduba (AM), Brazil. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 37, n. 4, p. 936-946, 2013.

GRAY, J. M.; MURPHY, B. W. **Parent material and soils: a guide to the influence of parent material on soil distribution in eastern Australia**. Sydney: Department of Land and Water Conservation, 1999. 122 p. (Technical Report n°. 45).

GUO, Z. T.; RUDDIMAN, W. F.; HAO, Q. Z.; WU, H. B.; QIAO, Y. S.; ZHU, R. X.; PENG, S. Z.; WEI, J. J.; YUAN, B. Y.; LIU, T. S. Onset of Asian desertification by 22 Myr ago inferred from loess deposits in China. **Nature**, London, v. 416, n. 1, p. 159-163, 2002.

HAO, Q. Z.; GUO, Z. T. Magnetostratigraphy of an early-middle Miocene loess-soil sequence in the western Loess Plateau of China. **Geophysical Research Letters**, New Jersey, v. 34, n. 8, L18305, 2007.

IBGE - Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Banco de informações ambientais**. <https://bdiaweb.ibge.gov.br/#/home>. Acesso em: 28 de out. 2021.

IBGE - Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Manual técnico de pedologia**. 3. ed. Rio de Janeiro: Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística, 2015. 430 p. (Manuais Técnicos em Geociências, n. 4).

KÄMPF, N.; CURI, N. Formação e evolução do solo (pedogênese). In: KER, J. C.; CURI, N.; SCHAEFER, C. E. G. R.; VIDAL-TORRADO, P. (ed.). **Pedologia: fundamentos**. Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2012. v. 1, cap. 7, p. 207-302.

LAL, R.; STEWART, B. A (ed). **Soil degradation: Advances in Soil Science**. New York: Springer-Verlag, 1990. 360 p.

LATRUBESSE, E. M.; STEVAUX, J. C. Características físico-bióticas e problemas ambientais associados à planície aluvial do rio Araguaia, Brasil Central. **Revista Geociências**, Guarulhos, v. 5, n. 1, p. 65-73, 2006.

LIMA, H. N.; MELLO, J. W. V.; SCHAEFER, C. E. G. R.; KER, J. C.; LIMA, A. M. N. Mineralogia e química de três solos de uma toposequência da bacia sedimentar do Alto Solimões, Amazônia Ocidental. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 30, n. 1, p. 59-68, 2006.

LIU, X. M.; ROLPH, T.; AN, Z. S.; HESSE, P. Paleoclimatic significance of magnetic properties on the red clay underlying the loess and paleosols in China. **Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology**, Amsterdam, v. 199, n. 1-2, p. 153-166, 2003.

MAIGNIEN, R. **Le cuirassement des sols en Guinée: Afrique Occidentale**. 1958. 239 f. PhD thesis (Doctorate in Sciences) - Université de Strasbourg, Institut des Sciences Géologiques, Strasbourg, 1958.

MARANHÃO, D. D. C.; AGUADO, O. I. O.; PEREIRA, M.G.; ARAÚJO, A. P.; CASTRO, S. S.; FERREIRA JÚNIOR, L. G. Analysis of potential for linear erosion in the Cerrado Biome using morphopedology. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, viçosa, v. 41, e0160427, 2017.

MARANHÃO, D. D. C. **Feições ferruginosas de solos do Vale do Araguaia, Bioma Cerrado, Goiás, Brasil**. 2018. 156 f. Tese (Doutorado em Agronomia: Ciência do Solo), Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, Seropédica, 2018.

MARIMON, B. S.; LIMA, E. S. Caracterização fitofisionômica e levantamento florístico preliminar do pantanal dos rios Mortes-Araguaia, Cocalinho, Mato Grosso, Brasil. **Acta Botanica Brasilica**, Porto Alegre, v. 15, n. 2, p. 213-229, 2001.

MARTINS, A. P. B., SANTOS, G. G., OLIVEIRA, V. A., MARANHÃO, D. D. C., COLLIER, L. S. Hardening and stability of plinthic materials of the Araguaia river floodplain under different drying treatments. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 42, e0170190, 2018a.

MARTINS, A. P. B., SANTOS, G. G., OLIVEIRA, V. A., MARANHÃO, D. D. C., Collier, L. S. Reversibility of the hardening process of plinthite and petroplinthite in soils of the Araguaia river floodplain under different treatments. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 42, e0170191. 2018b.

MARTINS, S. V.; BRITO, E. R.; OLIVEIRA FILHO, A. T.; SILVA, A. F.; SILVA, E. Floristic composition of two wetland forests in Araguaian plain, State of Tocantins, Brazil, and comparison with other áreas. **Revista Árvore**, Viçosa, v. 32, n. 1, p. 129-141, 2008.

MIGUEL, P.; DALMOLIN, R. S. D.; PEDRON, F. A.; FINK, J. R.; MOURA-BUENO, J. M. Caracterização de plinthites e petroplinthites em solos da Depressão Central do Rio Grande do Sul. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 43, n. 6, p. 999-1005, 2013.

MHAZO, N.; CHIVENGE, P.; CHAPLOT, V. Tillage impact on soil erosion by water: Discrepancies due to climate and soil characteristics. **Agriculture, Ecosystems & Environment**, Amsterdam, v. 230, n. 1, p. 231-241, 2016.

MORAIS, R. P.; AQUINO, S.; LATRUBESSE, E. M. Controles hidrogeomorfológicos nas unidades vegetacionais da planície aluvial do rio Araguaia, Brasil. **Acta Scientiarum. Biological Sciences**, Maringá, v. 30, n. 4, p. 411-421, 2008.

MOURA, D. B. **Caracterização de Plintossolos Argilúvicos na planície do rio Araguaia**. 2015. 94 f. Dissertação (Mestrado em Agronomia: Solo e Água), Escola de Agronomia, Universidade Federal de Goiás, Goiânia, 2015.

NISHI, E.; TEGERINA-GARRO, F. L.; MAIA, T. C. B. Caracterização da cobertura vegetal remanescente e implicações na conservação da biota na bacia do Ribeirão João Leite, Goiás, Região Centro-Oeste. **Revista Brasileira de Cartografia**, Uberlândia, v. 62, n. 4, p. 649-660, 2010.

NRCS - **Natural Resources Conservation Service**. Circular Técnica, n. 6, NRCS/USDA, Dec. 2011.

OLIVEIRA, W. N. **Avaliação da qualidade ambiental da paisagem da bacia hidrográfica e do reservatório do ribeirão João Leite**. 2013. 179 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia do Meio Ambiente), Universidade Federal de Goiás, Goiânia, 2013.

OSHER, L. J.; BUOL, S. W. Relationship of soil properties to parent material and landscape position in eastern Madre de Dios, Peru. **Geoderma**, Amsterdam, v. 83, n 1-2, p. 143-166, 1998.

PRESCOTT, J. A. PENDLETON, R. L. **Laterite and lateritic soils**. England: Farnham Royal, Bucks, 1952. 45 p.

QGIS Development Team, 2021. QGIS 3.22.0. **Geographic information system user guide**. QGIS Association. Electronic document: https://docs.qgis.org/3.16/en/docs/user_manual/index.html.

RADAMBRASIL. **Folha SD. 22 Goiás**: geologia, geomorfologia, pedologia, vegetação e uso potencial da terra. Rio de Janeiro: Ministério das Minas e Energia, Secretaria Geral, 1981. 640 p (Levantamento de recursos naturais, 25).

RIBEIRO, J. F.; WALTER, B. M. T. As Principais Fitofisionomias do Bioma Cerrado. *In*: SANO, S. M.; ALMEIDA, S. P.; RIBEIRO, J. F. (ed). **Cerrado: ecologia e flora**. ed. Brasília: Embrapa Cerrados, 2008. v. 2, cap. 3, 876 p.

ROQUIN, C.; FREYSSINET, P.H.; ZEEGERS, H.; TARDY, Y. Element distribution patterns in laterites of southern Mali: consequence for geochemical prospecting and mineral exploration. **Applied Geochemistry**, Oxford, v. 5, n. 1. p. 303-315, 1990.

SANTOS, H. G.; JACOMINE, P. K. T.; ANJOS, L. H. C.; OLIVEIRA, V.A.; LUMBRERAS, J. F.; COELHO, M. R.; ALMEIDA, J. A.; ARAÚJO FILHO, J. C.; OLIVEIRA, J. B.; CUNHA, T. J. F. **Sistema Brasileiro de Classificação de Solos**. 5. ed. Brasília: Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária, 2018. 355 p.

SANTOS, H. G.; CARVALHO JÚNIOR, W.; DART, R. O.; ÁGLIO, M. L. D.; SOUZA, J. S.; PARES, J. G.; FONTANA, A.; MARTINS, A. L. S.; OLIVEIRA, A. P (2. ed). **O novo mapa de solos do Brasil**: legenda atualizada. Rio de Janeiro: Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária, 2011. 67 p

SANTOS, M. C.; BATISTA, M. Avaliações física, química e mineralógica em solos plínticos da região meio-norte do Brasil, submetidos a teste de umedecimento e secagem. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v. 20, n. 1, p. 21-31, 1996.

SCHAEFER, C. E. G. R.; MENDONÇA, B. A. F.; FERREIRA JÚNIOR, W. G.; VALENTE, E. L.; CORRÊA, G. R (ed.). Relações solo-vegetação em alguns ambientes brasileiros: fatores edáficos e florística. *In*: MARTINS, S. V. **Ecologia de florestas tropicais do Brasil**. Viçosa: Editora UFV, 2009. p. 143-182.

SCHOENEBERGER, P. J.; WYSOCKI, D. A.; BENHAM, E. C.; SOIL SURVEY STAFF. **Field book for describing and sampling soils**: version 3.0. Lincoln, NE: Natural Resources Conservation Service, National Soil Survey Center, 2012. 298 p.

SIEG - Sistema Estadual de Geoinformação. **MacroZaee**: Hidrografia. SIEG (ed.), Goiânia, 2021. <http://www.sieg.go.gov.br/siegdownloads/>. Acesso em 10 dez. 2021.

SILVA, M. T. G.; LACERDA, M. P. C.; CHAVES, A. A. A. Geotecnologia aplicada na avaliação do uso das terras da microbacia do Ribeirão João Leite, Goiás. **Pesquisa Agropecuária Tropical**, Goiânia, v. 39, n. 4, p. 330-337, 2009.

SINGH, B.; GILKES, R. J. Nature and properties of iron rich glaeboles and mottles from some south-west Australian soils. **Geoderma**, Amsterdam, v. 71, n. 1, p. 95-120, 1996.

SOIL SURVEY STAFF. **Keys to soil taxonomy**. 11.ed. Washington, DC, USDA-Natural Resources Conservation Service, 2010. 346 p.

SOIL SURVEY STAFF. **Keys to soil taxonomy**. 12. ed. Washington: United States Department of Agriculture, Natural Resources Conservation Service, 2014. 372 p.

SOMBROEK, W. G. **Amazon soils: a reconnaissance of the soils of the Brazilian Amazon region**. 1966. 330 f. PhD thesis (Doctor in de Landbouwkunde), Landbouwhogeschool, Wageningen, 1966.

TARDY, Y., BOEGLIN, J., NOVIKOFF, A. AND ROQUIN, C. Petrological and geochemical classification of laterites. *In*: PROCEEDINGS OF THE 10TH INTERNATIONAL CLAY CONFERENCE., 18–23., 1993, Adelaide, Australia. p. 481–486. **Conference** [...].Adelaide, Australia, 1993. Disponível em: https://horizon.documentation.ird.fr/exl-doc/pleins_textes/pleins_textes_6/b_fdi_45-46/010007746.pdf

THOMAS, M. F.. **Geomorphology in the tropics: a study of weathering and denudation in low latitudes**. Chichester: John Wiley & Sons Ltd, 1994, 460 p.

TUCKER, R. J.; DREES, L. R.; WILDING, L. P. Signposts old and new: active and inactive redoximorphic features; and seasonal wetness in two Alfisols of the gulf coast region of Texas, U.S.A. *In*: RINGROSE-VOASE, A. J.; HUMPHREYS, G. S. (ed.). **Soil micromorphology: studies in management and genesis**. Amsterdam: Elsevier, 1994. v. 22, p. 99-106.

VALENTE C. R. **Geotectonic, geologic evolution and regional geomorphology of the Araguaia river basin, Central Brazil**. 2007. 204 f. Tese (Doutorado), Programa de Pós-Graduação em Ciências Ambientais, Universidade Federal de Goiás, Goiânia, 2007.

VAN BREEMEN, N.; BUURMAN, P. **Soil formation**. New York: Kluwer Academic Publishers, 2002. 404 p.

VASILAS, L. M.; HURT, G. W.; NOBLE, C. V. **Field indicators of hydric soils in the United States: a guide for identifying and delineating hydric soils**, version 7.0. Columbia: United States Department of Agriculture, Natural Resources Conservation Service, in cooperation with the National Technical Committee for Hydric Soils, 2010. 53 p.

VEPRASKAS, M. J.; WILDING, L. P.; DREES, L. R. Aquic conditions for soil taxonomy: concepts soil morphology and micromorphology. *In*: RINGROSE-VOASE, A. J.; HUMPHREYS, G. S. (ed.). **Soil micromorphology: studies in management and genesis**. Elsevier: Amsterdam. 1994. p. 117-131.

VEPRASKAS, M. J. **Redoximorphic features for identifying aquic conditions**. Raleigh: North Carolina Agriculture Research Service, North Carolina State University. 1995. 33 p. (Technical. Bulletin nº 301).

VEPRASKAS, M. J.; LINDBO, D. L. Redoximorphic features as related to soil hydrology and hydric soils. *In*: LIN, H. (ed.). **Hydropedology: synergistic integration of soil science and hydrology**. Amsterdam: Elsevier, 2012. p. 143-172.

VEPRASKAS, M. J.; LINDBO, D. L.; STOLT, M. H. Redoximorphic features. *In*: STOOPS, G.; MEES, F.; MARCELINO, V. (ed.). **Interpretation of micromorphological features of soils and regoliths**. Elsevier: Amsterdam. 2018. v. 44. p. 425-445.

WATANA, S. **Properties and inferred genetic environmental conditions of Thai laterite/plinthite**. 2005. 247 f. PhD thesis (Doctor of Philosophy of Soil Science) - Department of Soil Science, Kasetsart University, Kasetsart, 2005.

WILSON, C.A.; CLOY, J.M.; GRAHAM, M.C.; HAMLET, L.E. A microanalytical study of iron, aluminium and organic matter relationships in soils with contrasting hydrological regimes. **Geoderma**, Amsterdam, v. 202–203, n. 1, p. 71–81, 2013.

WRB. World Reference Base for Soil Resources -. International soil classification system for naming soils and creating legends for soil maps. **Food and Agriculture Organization of the United Nations**. Rome: IUSS/ISRIC/FAO, 2015. 106p.

ZHAO, X. R.; WU, H. Y.; SONG, X. D.; YANG, S. H.; DONG, Y.; YANG, J. L.; ZHANG, G. L. Intra-horizon differentiation of the bacterial community and its co-occurrence network in a typical Plinthic horizon. **Science of the Total Environment**, Amsterdam, v. 678, n.1, p. 3692-3701, 2019.

3. CONSTITUIÇÃO QUÍMICA E MINERALÓGICA DE FEIÇÕES REDOXIMÓRFICAS, DINÂMICA DO ELEMENTO FERRO E MECANISMO DE FORMAÇÃO DE PLINTOSSOLOS DA PLANÍCIE DO RIO ARAGUAIA-BRASIL

RESUMO – O objetivo deste estudo foi avaliar a composição química e mineralógica das feições redoximórficas e a dinâmica do elemento ferro presentes nestas, em perfis de Plintossolos da planície do Rio Araguaia, com a expectativa de esclarecer os processos pedogenéticos ou os mecanismos envolvidos na formação e no endurecimento de mosqueados e plintitas, particularmente de plintitas, e desta forma, confirmar ou não os seus mecanismos de formação, conforme sugeridos na literatura disponível. As feições do solo foram amostradas na posição superior direito e esquerdo no horizonte plântico inicial, posição superior direito e esquerdo no horizonte plântico principal e posição inferior direito no horizonte de base da zona de plintita no perfil. As amostras separadas, de matriz, mosqueados e plintita em condição de umidade natural, foram trituradas até a forma de pó para as determinações químicas por fluorescência de raios-X (FRX), ataque ácido sulfúrico (H_2SO_4), ditionito-citrato-bicarbonato de sódio (DCB), oxalato-ácido de amônio e mineralogia por difratometria de raios-X. Os teores de ferro determinados em todas as formas estudadas são sempre maiores na feição plintita, intermediários na feição mosqueado e menores na feição matriz do solo. A maior parte de ferro presente em todas as feições plintita encontra-se na forma de minerais primários do tipo micas (cerca de 14,48% em P1 e 28,48% em P2), de minerais secundários do tipo vermiculitas (64,60% em P1 e 58,02% em P2), enquanto a menor parte encontra-se na forma de óxidos como goethita e hematita (35,40% em P1 e 41,98% em P2). As feições mosqueado e plintita presentes nestes solos não são produto do processo clássico de segregação, mobilização e acumulação de ferro como consequência de processos de oxirredução, tendo se formado como resultado de um processo de decomposição relativamente lento e constante do material de origem, que está sendo decomposto em meio aquoso, que libera boa parte de seus componentes, entre eles, o ferro e elementos mais móveis como as bases e o silício, que saem do sistema pela água de drenagem, podendo alguma pequena parte deles se recombinar para a formação de novos minerais pouco complexos, como caulinitas e óxidos.

Palavras-chave: processo redox, formação de plintita, alúvio-coluvionar, mica, goethita, hematita

ABSTRACT - The aim of this study was to evaluate the chemical and mineralogical composition of the redoxymorphic features and the dynamics of the iron element present in them, in Plinthossols profiles of the Araguaia River plain, with the expectation of clarifying the pedogenetic processes or the mechanisms involved in the formation and hardening speckled and plinthite, particularly plinthite, and thus confirm or not their formation mechanisms, as suggested in the available literature. The soil features were collected in the upper right and left position in the initial plintic horizon, upper right and left position in the main plintic horizon and lower right position in the base horizon. The separated samples of matrix, mottled and plinthite under natural conditions were ground in the form of powder and chemical determinations were made by x-ray fluorescence (FRX), sulfuric acid attack (H_2SO_4), sodium dithionite-citrate-bicarbonate (DCB), ammonium oxalate and mineralogy by X-ray diffraction. The iron contents in all the studied forms are always higher in the plinthite feature, intermediate in the mottled feature and lower in the soil matrix feature. Most of the iron present in all redoximorphic features is found in the form of primary minerals (micas) about 14.48% in P1 and 28.48% in P2, secondary minerals (vermiculites) (64.60% in P1 and 58.02% in P2), while the smallest part of iron (35.40% in P1 and 41.98% in P2) is detected in the form of oxides such as goethite and hematite. The mottled and plintite features present in these soils are not the product of the classic process of segregation, mobilization and accumulation of iron as a result of oxidation processes. They formed or appeared in them as a result of a relatively slow and constant decomposition process of their source material, which is being decomposed in an aqueous medium releasing much of its components, including iron and more mobile elements such as bases and silicon, which leave the system by draining water, and some small part of them can recombine to form new less complex minerals, such as kaolinites and oxides.

Keywords: redox process, plinthite formation, alluvial-colluvial, mica, goethite, hematite

3.1 INTRODUÇÃO

Feições redoximórficas do solo apresentam aspectos morfológicos expressos por coloração diferente, verificadas em solos de ambientes úmidos ou com variações de umidade, comumente atribuídos à perdas (áreas de depleção) ou à ganhos (áreas de acumulação) de pigmentos (Vepraskas et al., 1994; Schoeneberger et al., 2012; Zhao et al., 2019). Dentre algumas das mais comuns e seguramente mais importantes feições redoximórficas ocorrentes em solos brasileiros está a plintita (Garcia et al., 2013; Martins et al., 2018a), que além de ser definidora de um horizonte diagnóstico (horizonte plíntico) é também definidora de uma classe de solos (Plintossolos) no Sistema Brasileiro de Classificação de Solos “SiBCS” (Santos et al., 2018).

Desse modo, expressivas áreas com solos que apresentam plintita são frequentes em várias regiões do Brasil (Anjos et al., 1995; Coringa et al., 2012; Garcia et al., 2013; Martins et al., 2018a). Estima-se que os Plintossolos ocupem uma área maior que 589 mil km² no território nacional, o que corresponde a aproximadamente 7% dos solos brasileiros (Santos et al., 2011). Dentre as principais áreas que apresentam essas feições ferruginosas no País, destacam-se a região Amazônica (Alto Amazonas, o estado do Amapá e Ilha de Marajó), o Pantanal Mato-grossense, a Ilha do Bananal, a Baixada Maranhense, o Piauí Setentrional, o Sudoeste do Tocantins e Norte do Estado de Goiás (WRB, 2015; Santos et al., 2018).

Apesar da importância dessa classe de solo, poucos estudos têm avaliado a gênese e morfologia dos Plintossolos brasileiros (Anjos et al., 1995; Coelho & Vidal-Torrado, 2003; Martins et al., 2018a; b). A sua grande utilização, principalmente os háplicos e argilúvicos, em grandes projetos de exploração agrícola em sistemas de irrigação e drenagem, tem determinado o direcionamento de pesquisas com o intuito de conhecer melhor os seus processos ou mecanismos de formação, bem como de características que determinam seu comportamento frente às diferentes demandas de uso.

Segundo a literatura especializada (Daniels et al., 1978; Soil Survey Staff, 1999; Soil Survey Staff, 2014; Eze et al., 2014; IBGE, 2015; Santos et al., 2018), a plintita, termo derivado de laterita, originalmente definida em trabalho realizado por Buchanan (1807) é uma feição redoximórfica constituída de mistura de argila, rica em ferro (Fe), ou Fe e alumínio (Al), pobre em carbono orgânico, com grãos de quartzo e outros minerais, sob a forma de mosqueados vermelhos, vermelho-amarelados e vermelho-escuros. Ainda, de

acordo com Tardy (1993), van Bodegom et al. (2003), Coringa et al. (2012) e Santos et al. (2018), a gênese da plintita ocorre em ambiente úmido pela segregação de Fe, importando em mobilização, transporte e concentração final dos compostos de Fe. Daniels et al. (1978), Osher & Buol (1998), Gray & Murphy (1999) e Anjos et al. (2007), constataram que estas feições ocorrem em locais imperfeitamente drenados no terço inferior de vertentes e em planícies aluviais.

Nesse sentido, Alexander & Cady (1962) observaram que a plintita apresentava ampla variabilidade de características químicas, enquanto Roquin et al. (1990) consideraram que este material estava relacionado com o grau de evolução e natureza do material de origem do qual é derivado. No entanto, comumente, segundo esses autores, os elementos mais abundantes nesta feição redoximórfica são silício (Si), Al e Fe, embora se tenha outros elementos em menores proporções (Zhao et al., 2019).

Estudos de Martins et al. (2018a, b) realizados nos mesmos perfis de solos objeto do presente trabalho, mostraram dados de química total por fluorescência de raios-X (FRX) e por ataque sulfúrico em amostras das feições matriz e plintita. Maranhão (2018), na mesma área, detectou em amostras de solo (TFSA), cerca de 15 g kg^{-1} de Fe extraído por ditionito-citrato-bicarbonato (Fed) e cerca de $0,8 \text{ g kg}^{-1}$ de Fe extraído por oxalato ácido de amônio (Feo) no horizonte plântico principal de Plintossolo Háplico da planície do Rio Araguaia. Já em trabalho de Moura (2015), por DRX, foram identificadas nas frações argila e silte do perfil de solo correspondente a P1, caulinita, ilita, vermiculita com hidróxido de Al na entrecamada (VHE) e gibbsita, sendo o quartzo o principal mineral presente na fração silte. Neste mesmo estudo, feldspatos e micas foram identificados na fração silte, e foram considerados minerais herdados do material de origem, enquanto goethita e hematita foram os óxidos de Fe cristalinos mais comuns na composição das plintitas.

De acordo com Gallaher et al. (1974) e Singh & Gilkes (1996), a composição da plintita difere quimicamente da composição da matriz do solo, devido a maior quantidade de óxidos de Fe. Dessa forma, as principais hipóteses deste trabalho são: i) que as feições redoximórficas são influenciadas principalmente pela variação no estado oxidante e redutor do elemento ferro, sendo este, o elemento mais atuante; ii) os óxidos de Fe hematita e goethita são os principais responsáveis na composição e formação da plintita; iii) as plintitas estão sendo formadas pelo processo redox nos perfis de solo.

O objetivo deste estudo foi determinar a composição química e mineralógica das feições redoximórficas e avaliar a dinâmica do elemento ferro presente nestas feições, em perfis de Plintossolos da planície do Rio Araguaia, com a expectativa de esclarecer os processos pedogenéticos ou os mecanismos envolvidos na formação de mosqueados e plintitas, particularmente de plintitas, e desta forma, confirmar ou não os seus mecanismos de formação, conforme sugeridos na literatura disponível.

3.2 MATERIAL E MÉTODOS

3.2.1 Localização da área de estudo

O estudo foi realizado empregando dois perfis de Plintossolos da planície do Rio Araguaia, distrito de Luiz Alves, município de São Miguel do Araguaia, estado de Goiás, Brasil (Figura 3.1), sob as coordenadas geográficas 13°14'38,17"S e 50°33'16,97" W, altitude de 218 m (perfil P1) e 13°12'17,75"S, 50°31'28,61"W, altitude de 216 m (perfil P2). O clima da região é AW e definido como tropical com estação seca no inverno (Köppen), precipitação pluvial anual média entre 1800 e 2000 mm e temperatura média anual variando de 25 a 26 °C (Cardoso et al., 2014). Os dois perfis de solo estudados (P1 e P2) foram selecionados, caracterizados rotineiramente no trabalho de Martins et al. (2018a) (no trabalho original, o perfil P2 corresponde ao perfil P3) e classificados como Plintossolos Argilúvicos Distróficos típicos, de acordo com normas especificadas em Santos et al. (2018) e Stagnic Plinthosol (Clayic, Orthodystric, Humic, Vetic) by World Reference Base for Soil Resources (WRB, 2015). A caracterização analítica de rotina realizada por Martins et al. (2018) empregou os métodos padrões adotados pela Embrapa (Donagema et al., 2011). Ambos os perfis têm como material de origem sedimentos aluvio-coluvionares da cobertura sedimentar do Bananal (RadamBrasil, 1981).

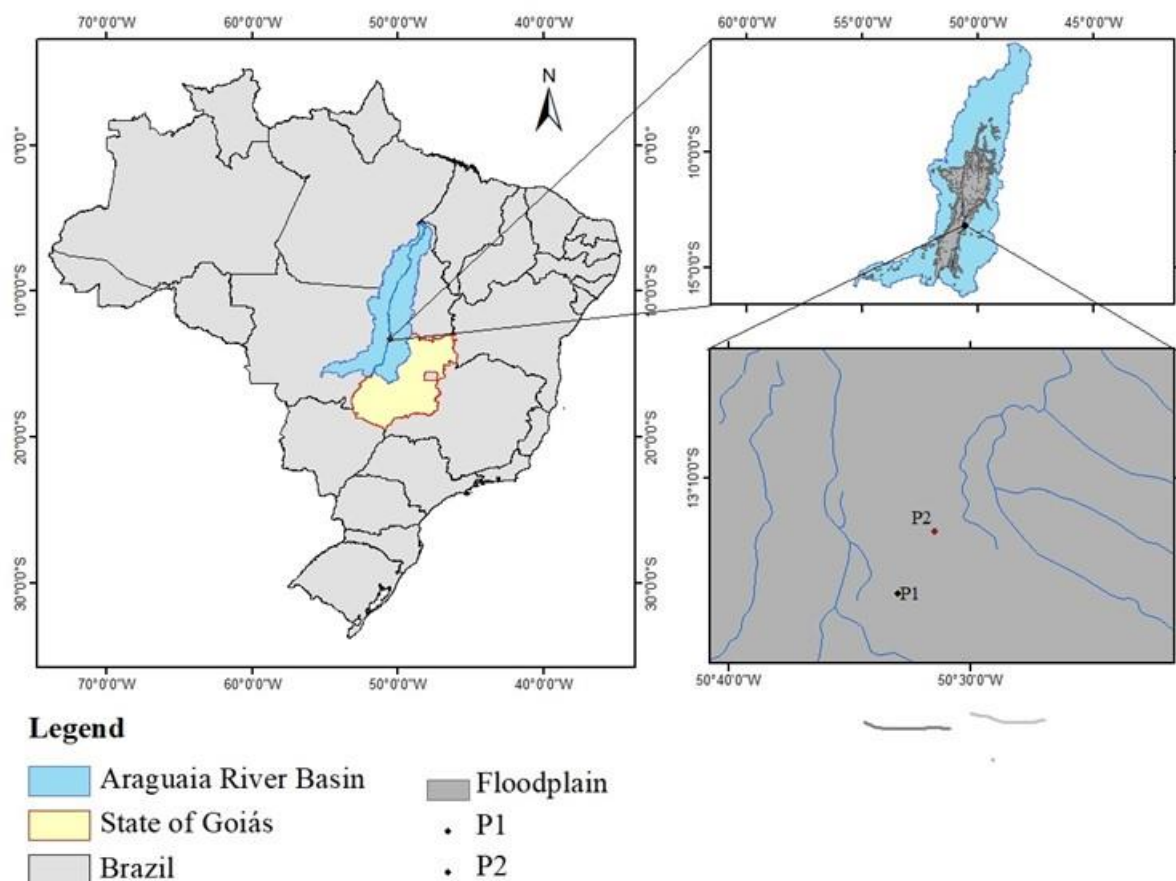


Figura 3.1. Localização de perfis de solos da planície do Rio Araguaia, Goiás, Brasil.

O ambiente da região apresenta relevo plano com presença de murundus sob vegetação natural de Campo Cerrado em situação de variação sazonal do lençol freático. Os solos permanecem naturalmente submersos na estação chuvosa e com lençol freático a profundidades medianas na estação seca ($> 1,80$ m da superfície). Além da flutuação do lençol freático de forma natural pela alternância das épocas chuvosa e seca, a atividade de exploração com lavouras irrigadas nas proximidades, pelo Projeto de Irrigação Luiz Alves, empregando a técnica de irrigação por inundação interfere na dinâmica natural da várzea.

Neste trabalho, foram coletadas amostras das feições redoximórficas nos horizontes plúnticos iniciais ou superior, no horizonte plúntico principal e nos horizontes plúnticos de base ou inferior, conforme esquema mostrado na Figura 3.2. De cada posição (Pst) amostrada foram separadas as feições redoximórficas presentes para as devidas determinações.

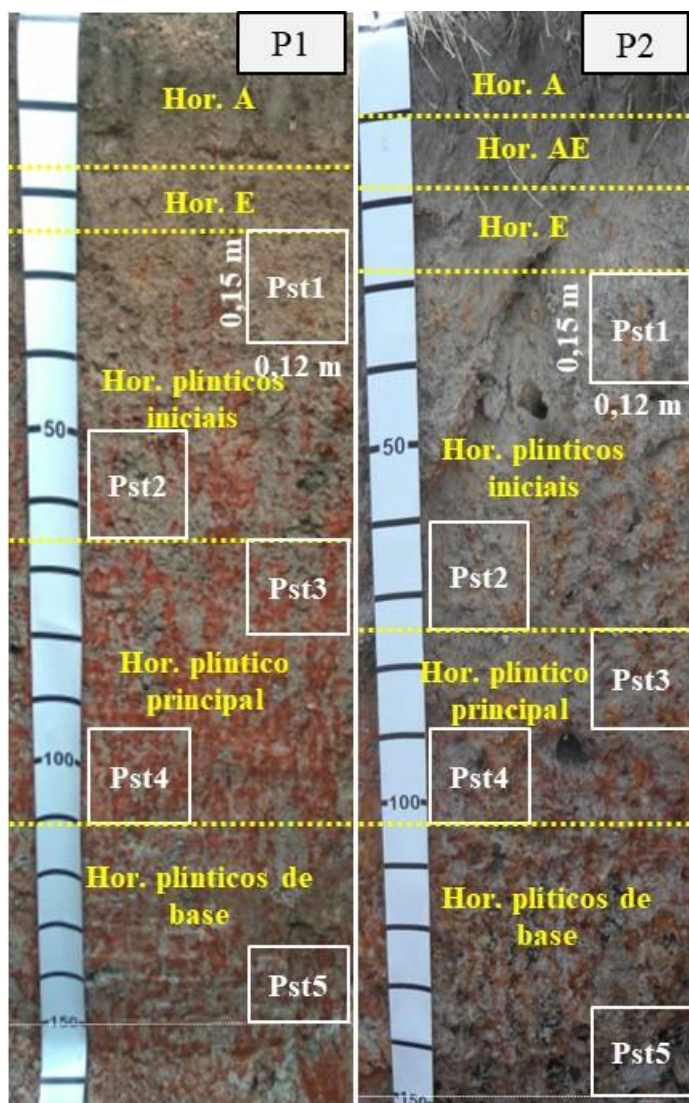


Figura 3.2. Esquema de coleta de feições redoximórficas dos perfis de solos. P1 e P2. Pst: Posição.

3.2.2 Seleção de posições de coletas nos perfis, amostragens e preparação das feições redoximórficas para análises

As diferentes posições para amostragem da matriz do solo, mosqueado e plintita ao longo dos perfis P1 e P2 foram definidos com o objetivo de avaliar as possíveis variações espaciais (horizontais ou verticais) quanto a acumulação de Fe e endurecimento da plintita em relação às demais feições redoximórficas, dentro de cada perfil. Nos horizontes plínticos superiores e no horizonte plíntico principal, coletaram-se amostras de matriz do solo, mosqueado e plintita em duas posições: posição superior direito (Pst1 e Pst3) posição inferior esquerdo (Pst2 e Pst4) e, nos horizontes plínticos da base, coletou-se essas feições apenas na posição 5 (Pst5) (posição inferior direito). Cada posição (Pst) amostrada foi

demarcada com com dimensões de 0,12 m x 0,15 m x 0,15 m (largura, altura e comprimento), o que resultou em amostras com volume em cada Pst cerca de 0,0027 m³. A partir de então, separou-se as feições matriz (Figura 3.3A), mosqueado (Figura 3.3B) e plintita (Figura 3.3C).



Figura 3.3. Feições redoximórficas de Plintossolos da planície do Rio Araguaia. A: matriz do solo; B: mosqueado; C: plintita.

Foram separados, considerando os critérios clássicos para este fim (cor e consistência) recomendados pelos manuais técnicos (IBGE, 2015; Santos et al., 2018) para cada perfil cinco conjuntos de matriz do solo (cinco Pst), três conjuntos de mosqueados em P1 (3 Pst) e dois conjuntos de mosqueados em P2 (2Pst) e cinco conjunto de plintita (5 Pst) por perfil de solo. Para matriz e mosqueado, cada Pst foi composto de amostra única e para plintita compôs-se 10 amostras por Pst. Em cada perfil, obtiveram-se cinco amostras (conjuntos) de matriz, três amostras (conjuntos) de mosqueados em P1 e duas amostras (conjuntos) de mosqueados em P2. Já para as plintitas, obteve-se 50 amostras de plintita (cinco conjuntos) em cada perfil. No total, foram avaliadas 115 amostras de feições redoximórficas (13 conjuntos em P1 e 12 conjuntos em P2).

Após realizadas todas as separações de interesse das feições redoximórficas, as amostras de cada grupo e por posição, foram trituradas em almofariz de ágata, e logo após, utilizadas para as diversas determinações químicas em cada perfil de solo.

3.2.3 Análise de espectrometria de fluorescência de raios-X

Para avaliação dos teores totais dos elementos, realizou-se análises por espectrometria de fluorescência de raios-X (FRX) nas amostras trituradas e moídas em almofariz de ágata até ficarem na forma de pó (powder) (malha da peneira 0,053 mm). Utilizou-se duas gramas de cada amostra de cada feição por posição. As amostras foram acondicionadas em porta amostras padrão, com fundo revestido com filme poliéster “mylar” de 3,6 µm e dispostas em um carrossel removível, com capacidade de 10 amostras.

Nesta análise, foram feitas duas leituras em cada amostra, tendo realizado média no final para cada elemento do solo. Para avaliar os elementos químicos de cada feição, fez-se uma média geral de todas as posições amostradas.

3.2.4 Análise por ataque ácido sulfúrico

As amostras de plintita foram trituradas e moídas em almofariz de ágata e preparadas para extração com ácido sulfúrico para identificar e quantificar elementos como silício (Si), alumínio (Al), ferro (Fe) e titânio (Ti), livres ou presentes na estrutura de minerais secundários (Verdade, 1972), além de possibilitar o cálculo das relações moleculares (Ki e Kr) para avaliar estágios de intemperismo dos solos. Para esta determinação, as amostras foram solubilizadas com ácido sulfúrico (H_2SO_4) na proporção de 1:1 conforme Teixeira et al. (2017).

3.2.5 Análise para extração de ferro: ditionito-citrato-bicarbonato de sódio e oxalato ácido de amônio

As amostras de plintita foram trituradas e moídas em almofariz de ágata e preparadas para extração do elemento Fe por ditionito-citrato-bicarbonato de sódio (Fed) e pelo oxalato ácido de amônio (Feo), procederam-se as análises seguindo o método de Teixeira et al. (2017). Para tabulação dos dados e confecção do gráfico de diferentes extrações de Fe foram utilizadas médias dos cinco posições para cada feição redoximórfica.

3.2.6 Análise por difração de raios-X

A mineralogia da fração argila nas diferentes feições do solo nas posições (Pst 3 e Pst 4), foi determinada por difração de raios-X (DRX) usando um difratômetro Shimadzu XRD 6000 operado com $Cu K\alpha$ a 40 kV e 30 mA e um monocromador de grafite. A fração argila foi analisada na forma de amostras de pó não orientadas e não tratadas a uma velocidade de $1^\circ \text{ min } 2\theta$ e registradas na faixa de 3 a $70^\circ (2\theta)$. Em outro tratamento, as amostras de argila foram pré-tratadas e desferrificadas usando a solução de DCB (Jackson, 1975). Foram realizados tratamentos de saturação usando potássio (K) e magnésio (Mg) na

forma de microagregados orientados de argila (Jackson, 1975) a uma velocidade de $0,7^\circ$ min (2θ) e dentro de uma faixa de 3 a 35° (2θ). As amostras saturadas com K ($\text{KCl } 1 \text{ mol L}^{-1}$) foram submetidas a tratamentos térmicos sucessivos (25 , 350 e 550°C), e as amostras saturadas com Mg ($\text{MgCl}_2 \text{ } 1 \text{ mol L}^{-1}$) foram analisadas à temperatura ambiente, solvatadas com glicerol e depois analisadas a uma velocidade de $0,7^\circ$ min (2θ) dentro de uma faixa de 3 a 15° (2θ).

Os critérios utilizados para interpretação dos DRX e identificação dos minerais presentes na fração argila foram baseados no espaçamento interplanar (d) e no comportamento do pico de difração em relação a saturação e tratamentos térmicos utilizados, conforme apresentado em Jackson (1975), Brown & Brindley (1980) e Moore & Reynolds (1997) e comportamento frente aos tratamentos.

3.2.7 Estatística

O erro padrão da média presentes nas tabelas foi obtido dividindo-se o desvio padrão da amostra pela raiz quadrada do número de observações de cada feição redoximórfica. Os gráficos, tabelas e seus respectivos erros padrões, assim como as barras de erros com porcentagem (5% de significância) e linhas de tendência foram confeccionados utilizando o programa Microsoft Excel 2010.

3.3 RESULTADOS

3.3.1 Constituição química das diferentes feições redoximórficas e formas de ferro presentes

Os teores totais de elementos químicos constituintes das feições redoximórficas, expressos na forma de óxidos e determinados por fluorescência de raios-X (FRX), são apresentados na Tabela 3.1, com a média das cinco posições amostradas em cada perfil. De maneira geral, o somatório dos teores de Si (SiO_2), Al (Al_2O_3) e Fe total (Fe_2O_3) representaram valores acima de 96% para os elementos analisados em todas as feições redoximórficas avaliadas nos dois perfis de solo, indicando o seu absoluto predomínio em todas as feições. Em especial, pode-se destacar o quantitativo de Fe total (Fe_2O_3), diretamente proporcional ao maior avermelhamento e consistência mais firme das

diferentes feições, sendo 4,71% e 3,69% na matriz; 8,76% e 7,94% no mosqueado e 16,57% e 15,77% na plintita dos perfis P1 e P2, respectivamente.

Tabela 3.1. Constituição química total das feições redoximórficas, determinada por fluorescência de raios-X (FRX).

Feições ⁽²⁾	SiO ₂ ⁽¹⁾	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	TiO ₂	MgO	K ₂ O	V ₂ O ₅	ZrO ₂	Outros
-----g kg ⁻¹ -----									
Perfil 1 - PLINTOSSOLO ARGILÚVICO Distrófico típico (Santos et al., 2018) / Plinthosol (WRB, 2015)									
Matriz	509,99±1,55	403,13±1,86	47,05±1,51	19,04±0,40	1,94±0,12	10,96±0,84	0,28±0,01	0,53±0,04	7,48±0,31
Mosqueado	488,36±4,84	384,15±2,23	87,56±6,38	16,94±0,47	2,10±0,09	12,33±0,71	0,40±0,03	0,44±0,05	7,71±0,22
Plintita	459,92±14,75	342,26±10,25	165,65±9,58	14,11±0,25	2,08±0,17	11,00±0,71	0,42±0,03	0,45±0,05	9,31±0,65
Perfil 2 - PLINTOSSOLO ARGILÚVICO Distrófico típico (Santos et al., 2018) / Plinthosol (WRB, 2015)									
Matriz	599,00±6,13	326,18±3,59	36,89±4,97	17,20±0,38	2,41±0,14	10,05±0,34	0,21±0,01	0,67±0,02	7,40±0,16
Mosqueado	556,33±4,69	326,35±0,13	79,38±5,05	15,17±0,21	2,63±0,07	11,04±0,15	0,29±0,01	0,61±0,01	8,23±0,04
Plintita	501,94±5,23	305,75±3,19	157,23±4,80	12,94±0,38	2,42±0,11	10,65±0,24	0,32±0,01	0,49±0,01	8,77±0,26

⁽¹⁾SiO₂: dióxido de silício; Al₂O₃: óxido de alumínio; Fe₂O₃: óxido de ferro; TiO₂: dióxido de titânio; MgO: óxido de magnésio; K₂O: óxido de potássio; V₂O₅: pentóxido de vanádio; ZrO₂: dióxido de zircônio. ⁽²⁾Valores médios dos cinco posições amostrados para cada feição nos perfis de solo. Os números após o sinal ± se refere ao erro padrão amostral para cada elemento em cada feição do solo.

Na Tabela 3.2 são apresentados os teores médios dos elementos químicos detectados por ataque ácido sulfúrico nas diferentes feições. Os valores médios de Fe variaram entre 6,20% a 25,03% entre os perfis P1 e P2, ambos para a plintita, feição que também apresentou o menor valor de Ki (1,25 em P1).

Tabela 3.2. Caracterização dos principais elementos químicos das feições redoximórficas determinados por ataque ácido sulfúrico.

Feições ⁽²⁾	SiO ₂ ⁽¹⁾	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	TiO ₂	Ki	Kr
(g kg ⁻¹)						
Perfil 1 - PLINTOSSOLO ARGILÚVICO Distrófico típico (Santos et al., 2018) / Plinthosol (WRB, 2015)						
Matriz	201,20±19,94	222,40±5,92	40,60±1,44	9,36±0,20	1,54	1,38
Mosqueado	251,00±28,88	228,00±10,26	63,00±4,00	9,27±0,03	1,87	1,59
Plintita	209,67±13,01	214,56±4,97	141,67±7,90	7,84±0,19	1,73	1,25
Perfil 2 - PLINTOSSOLO ARGILÚVICO Distrófico típico (Santos et al., 2018) / Plinthosol (WRB, 2015)						
Matriz	164,60±6,51	191,40±23,87	38,20±3,72	7,36±0,19	1,46	1,30
Mosqueado	194,00±4,00	180,50±2,50	62,00±3,00	7,60±0,40	1,83	1,50
Plintita	201,00±5,84	182,27±4,46	112,45±4,99	7,63±0,38	1,81	1,31

⁽¹⁾SiO₂: dióxido de silício; Al₂O₃: óxido de alumínio; Fe₂O₃: óxido de ferro; TiO₂: dióxido de titânio.

⁽²⁾Valores médios dos cinco posições amostrados para cada feição nos perfis de solo. Ki=(SiO₂/Al₂O₃)x1,70 e Kr=(SiO₂/0,6)/(Al₂O₃/1,02)+(Fe₂O₃/1,60). Os números após o sinal ± se refere ao erro padrão amostral para cada elemento em cada feição do solo.

3.3.2 Teores médios de ferro determinados por diferentes métodos nas feições redoximórficas

Na Tabela 3.3 são apresentados os teores médios de Fe obtidos por ataque ácido sulfúrico (Fes), ditionito-citrato-bicarbonato de sódio (Fed) e oxalato-ácido de amônio (Feo) nas feições redoximórficas. No geral, os dados apontam que todos os valores são maiores na feição plintita, seguida pelo mosqueado e por último, pela matriz do solo, para todas as feições redoximórficas analisadas. A relação Fed/Fes foi maior no P1 e Feo/Fed foi igual entre os dois perfis.

Tabela 3.3. Teores médios de ferro⁽¹⁾ da feições redoximórficas determinados por ataque ácido sulfúrico (Fes) ditionito-citrato-bicarbonato de sódio (Fed) e oxalato ácido de amônio (Feo) e suas relações (Feo/Fed).

Feições	Fes	Fed	Feo	Fed/Fes	Feo/Fed
	(g kg ⁻¹)			-	-
Perfil 1 - PLINTOSSOLO ARGILÚVICO Distrófico típico (Santos et al., 2018) / Plinthosol (WRB, 2015)					
Matriz	40,60±1,44	9,44±1,31	0,30±0,04	0,23	0,03
Mosqueado	63,00±4,00	23,37±1,59	0,58±0,09	0,37	0,02
Plintita	141,67±7,90	50,14±1,07	1,61±0,15	0,35	0,03
Perfil 2 - PLINTOSSOLO ARGILÚVICO Distrófico típico (Santos et al., 2018) / Plinthosol (WRB, 2015)					
Matriz	38,20±3,72	10,05±1,93	0,26±0,04	0,26	0,03
Mosqueado	62,00±3,00	24,00±2,00	0,44±0,01	0,39	0,02
Plintita	112,45±4,99	47,21±1,32	1,56±0,14	0,42	0,03

⁽¹⁾Os valores de ferro referem-se às médias das cinco posições (Pst) amostradas nos perfis P1 e P2 para cada feição redoximórfica. Os números após o sinal ± se refere ao erro padrão amostral para cada elemento em cada feição do solo.

A Figura 3.4 representa os teores médios de Fe obtidos por diferentes métodos nas feições matriz do solo, mosqueado e plintita. No geral, destaca-se a presença de valores maiores de ferro em todas as suas formas de determinação na feição plintita, seguidos a da feição mosqueado e, por fim, da feição matriz. Via de regra, observa-se nos dois perfis avaliados, variação gradativa dos teores de Fe nas diferentes formas de determinação, sendo Feo<Fed<Fes<Fet, o que é lógico considerando-se o alcance, pelo menos teórico, de cada uma das determinações, excetuando-se pequenas exceções como acontece entre os valores de Fes e Fet da matriz do solo de P2, onde os valores são praticamente equivalentes, mas maiores em Fes.

Destaca-se ainda os valores de Feo dos dois perfis avaliados para a feição plintita, que foram equivalentes entre si, com valores considerados muito baixos, em comparação às demais formas de Fe analisadas.

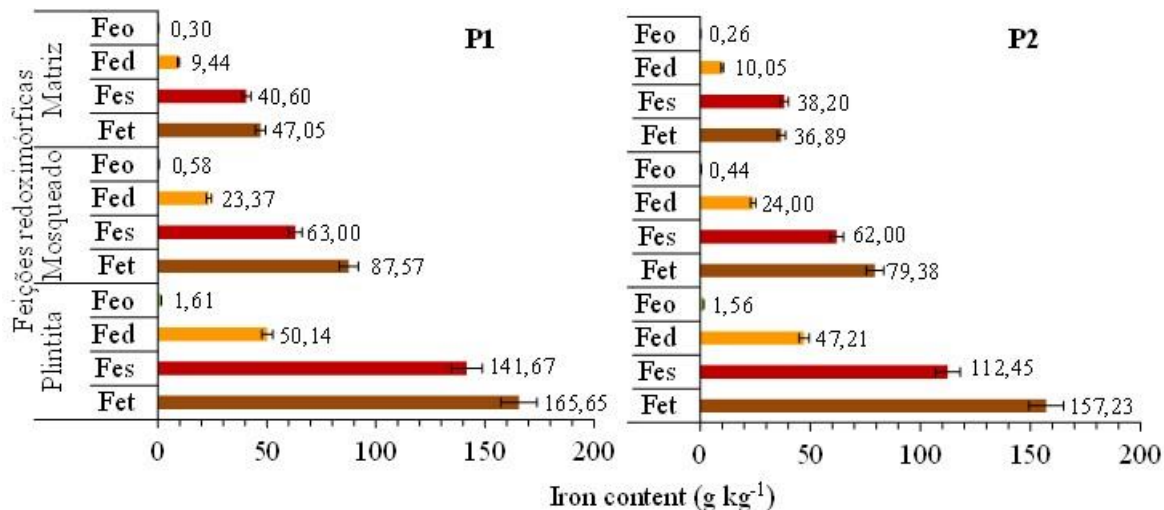


Figura 3.4. Valores médios do elemento ferro extraídos por diferentes métodos nas feições redoximórficas dos perfis estudados. Fet: fluorescência de raios-X; Fes: ataque ácido sulfúrico; Fed: ditionito-citrato-bicarbonato de sódio; Feo: oxalato ácido de amônio. As barras de erros referem-se à variabilidade amostral em porcentagem (5% de significância).

3.3.3 Identificação por DRX dos minerais presentes na fração argila das diferentes feições redoximórficas

Na Figura 3.5 constam os difratogramas de raios-X de amostras de argila desferrificadas, orientadas e tratadas, relativas à fração argila das feições matriz do solo, mosqueado e plintita. Verifica-se que em todas as feições foram constatados os argilominerais vermiculita (V), mica (Mi), caulinita (K) e gibbsita (Gb).

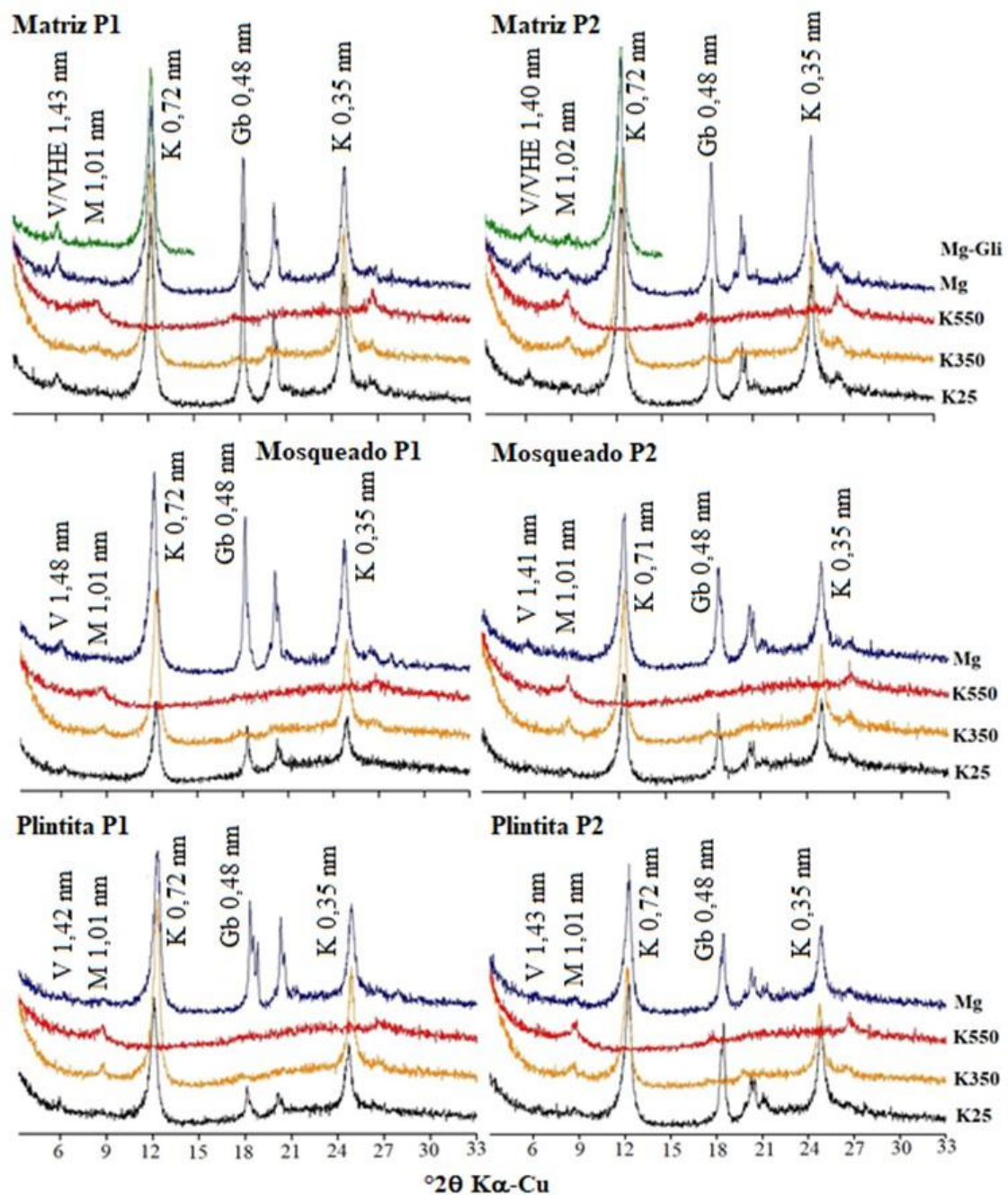


Figura 3.5. Difratomogramas de raios-X da fração argila desferrificadas, tratadas e orientadas das feições redoximórficas dos perfis. As amostras foram saturadas com potássio (K) à temperatura ambiente 25°C (K25), aquecidas a 350°C (K350) e 550°C (K550) e saturadas com magnésio (Mg) e magnésio+glicerol (Mg-Gli).

Ao observar os DRX de amostras das feições redoximórficas na forma de pó (não orientadas e nem tratadas), foi detectado predominantemente o óxido de Fe goethita (Gh) em ambos os perfis de solo (Figura 3.6). Já, o óxido de Fe hematita (Hm) foi detectado em menor proporção nas feições.

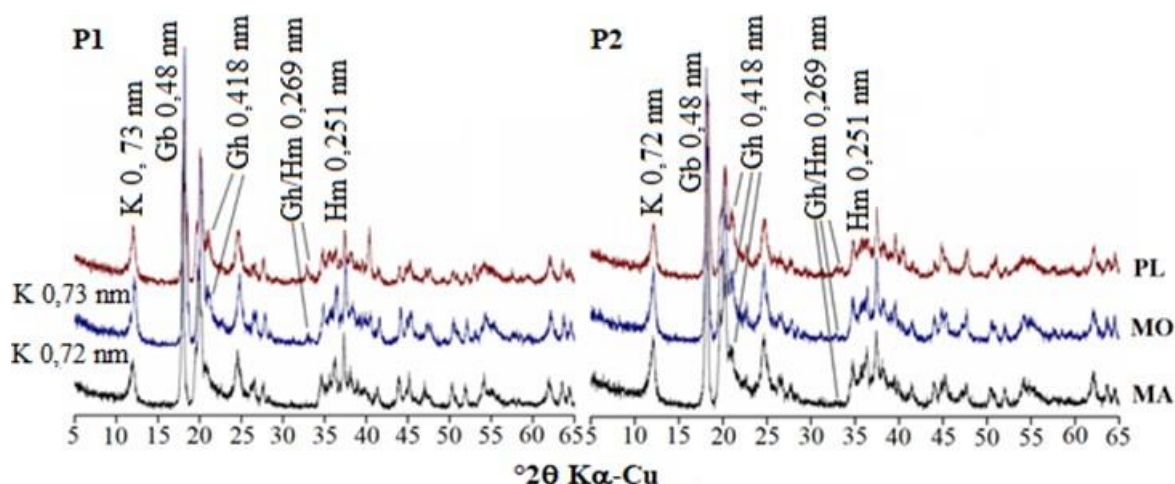


Figura 3.6. Difratogramas de raios-X de amostras fragmentadas pelo aparelho Instron, trituradas e moídas até ficarem na forma de pó (powder), não orientadas e não tratadas da fração argila das feições redoximórficas dos dois perfis (P1 e P2). K: caulinita; Gb: gibbsita; Gh: goethita, Hm: hematita. MA: matriz do solo; MO: mosqueado; PL: plintita.

3.3.4 – Distribuição dos teores dos principais elementos químicos obtidos por ataque ácido sulfúrico e valores de Ki e Kr nas diferentes feições e posições amostradas em cada perfil de solo

A Figura 3.7 mostra os teores dos elementos químicos e valores dos índices Ki e Kr obtidos por ataque ácido sulfúrico em cada feição redoximórfica distribuídos por posição (Pst) amostrada do perfil P1.

De uma forma geral, as linhas de tendência mostram que os teores de Si (SiO_2) e Al (Al_2O_3) aumentam suas concentrações da posição inicial (Pst1) para a posição inferior (Pst5) em todas as feições redoximórficas analisadas no perfil P1, mesma tendência observada pelos valores dos índices Ki e Kr, indicando maior grau de intemperismo nas feições superiores para todas as feições. Quanto aos teores de Fe (Fe_2O_3 ou Fes) deste perfil, a linha de tendência não mostra nenhuma regularidade ou similaridade entre as feições ou entre as posições.

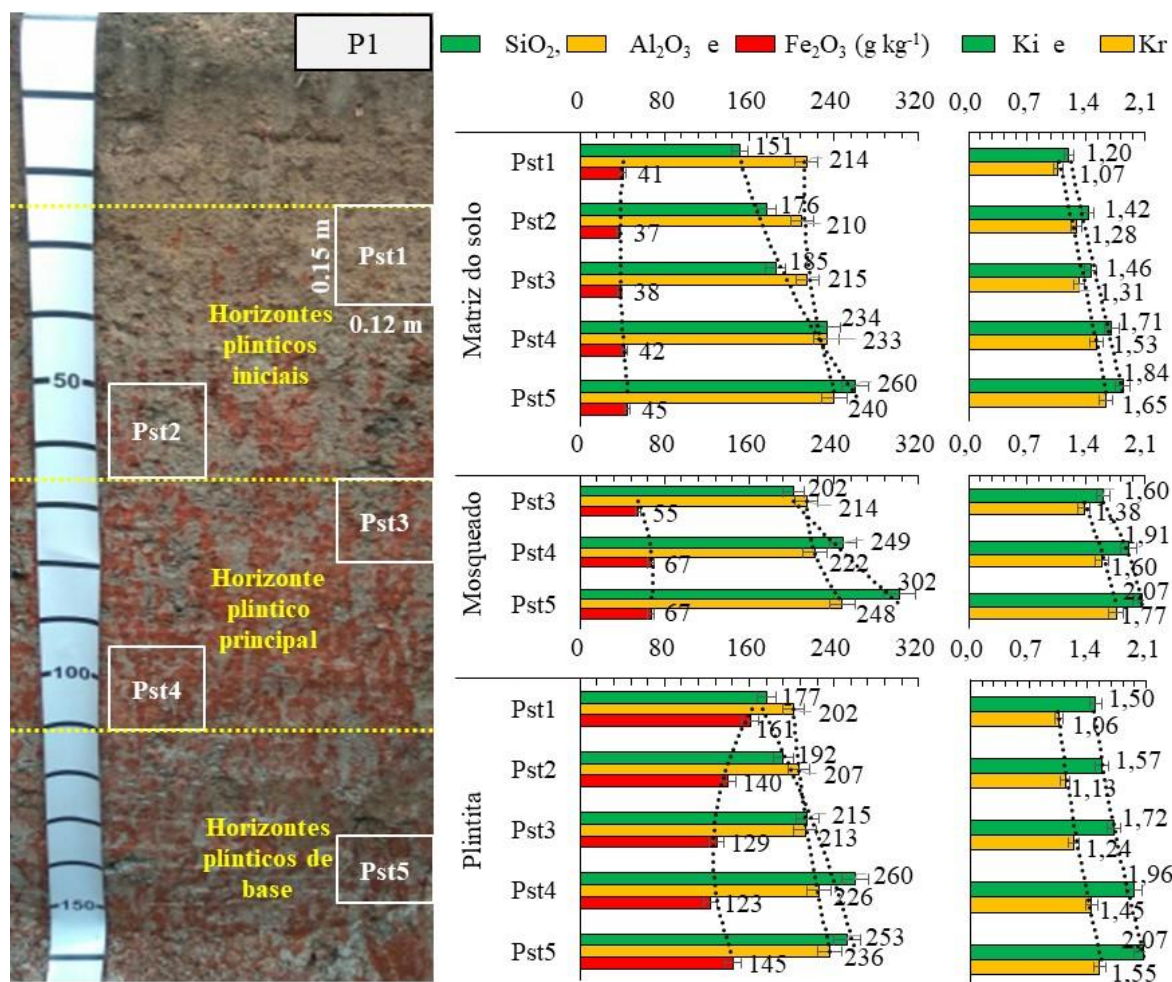


Figura 3.7. Teores de óxidos de silício (SiO₂), alumínio (Al₂O₃), ferro (Fe₂O₃ ou Fe) e índices Ki e Kr obtidos em diferentes posições (Pst) das feições redoximórficas do perfil P1.

Os resultados obtidos dos elementos químicos extraídos por ataque ácido sulfúrico distribuídos por posição (Pst) amostrada do perfil P2 (Figura 3.8), não mostram uma tendência lógica definida para qualquer dos elementos e relações de intemperismo para nenhuma das feições redoximórficas estudadas. Destaca-se o elemento Fe, cujo teor eleva-se na matriz do solo de Pst1 (28,00 g kg⁻¹) para Pst5 (49,00 g kg⁻¹), diminui no mosqueado de Pst4 (65,00 g kg⁻¹) para Pst5 (59,00 g kg⁻¹), e no caso da feição plintita, Fe aumenta de Pst1 (111,00 g kg⁻¹) para Pst2 (126,00 g kg⁻¹), diminui para Pst3 (118,00 g kg⁻¹), aumenta novamente para Pst4 (125,00 g kg⁻¹) e, de novo, diminui em Pst5 (114,00 g kg⁻¹), com valores muito próximos aos de Pst1.

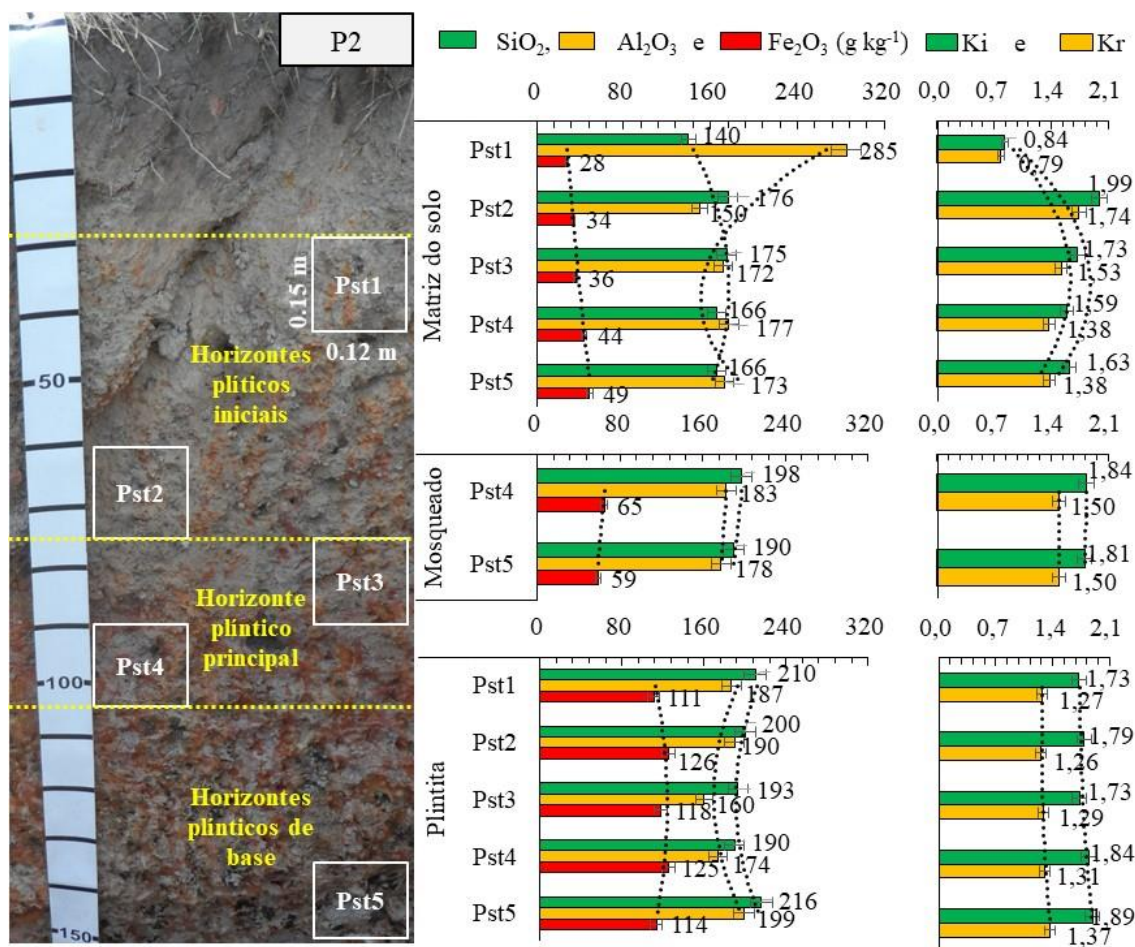


Figura 3.8. Teores de ferro obtidos por ataque ácido sulfúrico (Fes), ditionito citrato-bicarbonato de sódio (Fed), oxalato ácido de amônio (Feo) e relação Fed/Fes obtidos em diferentes posições (Pst) das feições matriz do solo e plintita do perfil P2.

3.3.5 Dinâmica do elemento ferro nas feições matriz do solo e plintita em diferentes posições nos perfis

Para avaliar o comportamento específico ou isolado do ferro férrico (Fed) que constitui a forma que efetivamente pode ser produzida e concentrada no solo como consequência direta do processo redox, as Figuras 3.9 e 3.10 mostram as concentrações de Fed e Feo junto às de Fes e relação Fed/Fes, nas diversas posições estudadas em cada perfil, dentro das feições matriz do solo e plintita. No geral, não se observa comportamento regular na distribuição das formas de Fe nos horizontes plínticos. Na Figura 3.9, para matriz do solo e plintita, observa-se tendência de redução nos teores de Fes dos horizontes plínticos iniciais para o horizonte plíntico principal e na sequência, elevação nos seus teores para os horizontes plínticos de base, mesma tendência observada para Feo. No

sentido contrário, os teores de Fed diminuem de Pst1 para Pst5. A relação Fed/Fes entre as duas feições apresentam comportamento distintos.

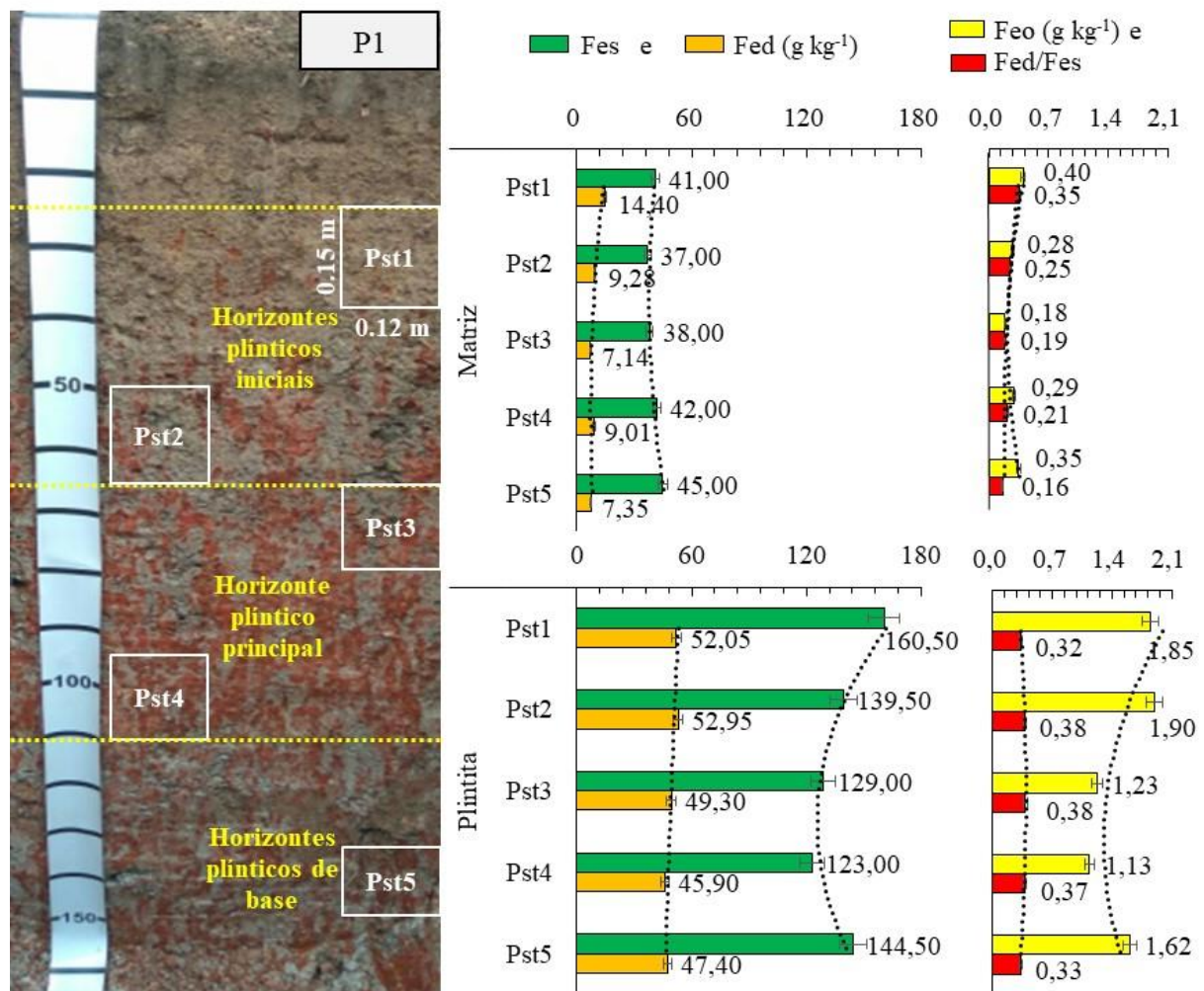


Figura 3.9. Teores de ferro obtidos por ataque ácido sulfúrico (Fes), ditionito citrato-bicarbonato de sódio (Fed), oxalato ácido de amônio (Feo) e relação Fed/Fes obtidos em diferentes posições (Pst) das feições matriz do solo e plintita do perfil P1.

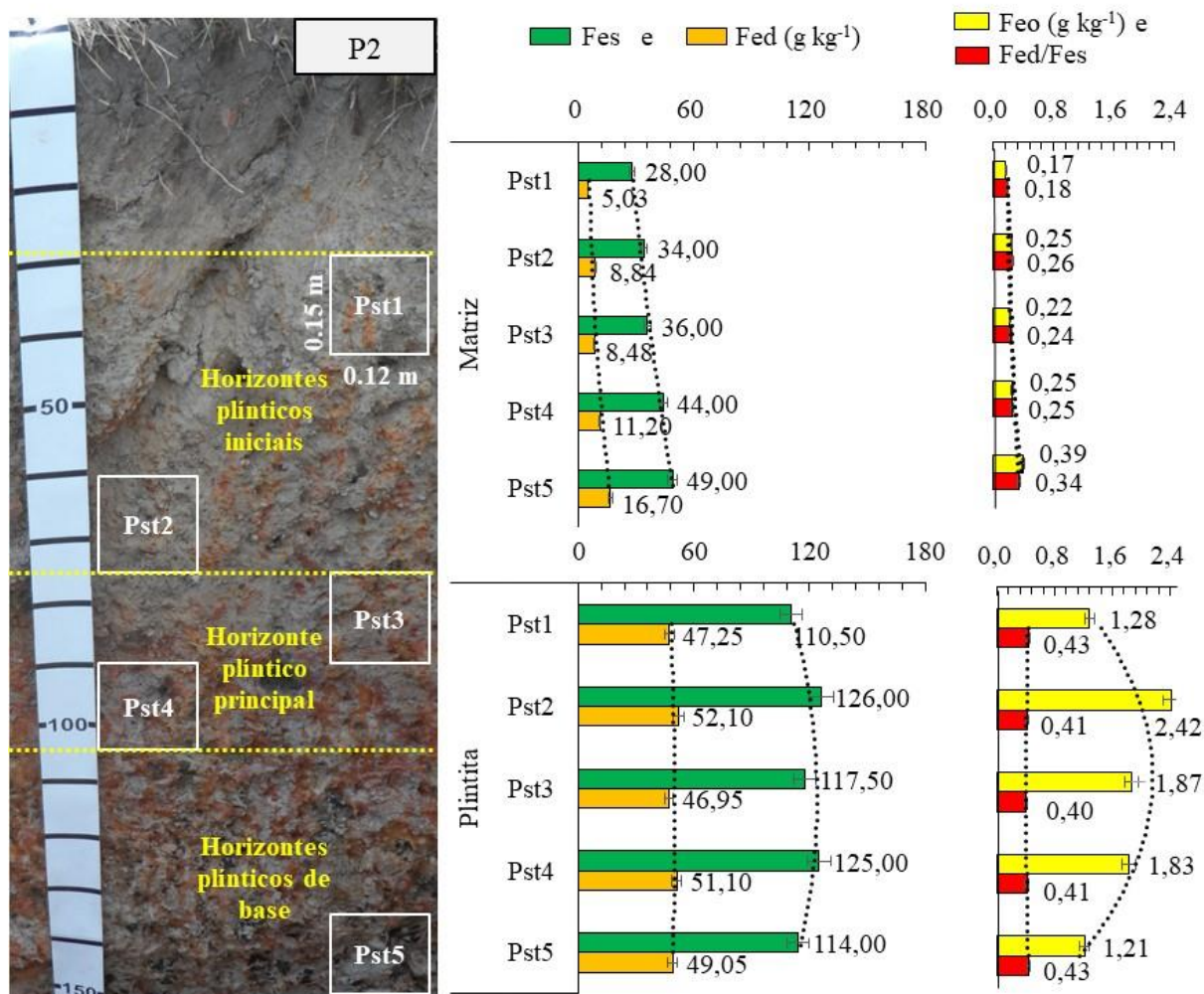


Figura 3.10. Teores de óxidos de silício (SiO_2), alumínio (Al_2O_3), ferro (Fe_2O_3 ou Fes) e índices Ki e Kr obtidos em diferentes posições (Pst) das feições redoximórficas do perfil P2.

Para a matriz do solo da Figura 3.10, observa-se a tendência de aumento nos valores de Fes, Fed, Feo e Fed/Fes dos horizontes plânticos iniciais para os horizontes plânticos de base. No caso da plintita, os valores de Fed e Fed/Fes foram praticamente constantes, enquanto os teores de Fes e Fed apresentaram distribuição irregular entre os horizontes plânticos analisados do perfil P2.

3.4 DISCUSSÃO

3.4.1 Constituição química e quantitativos de ferro das diferentes feições redoximórficas

Através da análise das Tabelas 3.1 e 3.2 observa-se que os elementos Si (SiO_2), Al (Al_2O_3) e Fe (Fe_2O_3) são os mais abundantes nas feições redoximórficas do solo, fato também observado em outros trabalhos (Chauvel et al., 1987; Bravard & Righi, 1990; Dubroeuq & Volkoff, 1998; Roquin et al., 1990; Coringa et al., 2012). O somatório dos elementos Si, Al e Fe da Tabela 2.1 perfaz acima de 96% e da Tabela 3.2 acima de 98% do total de elementos, o que está em consonância com os valores constatados por Martins et al. (2018a).

As diferenças nos teores detectados entre os métodos apresentados nas tabelas, são devidas ao alcance de cada um deles, determinado pelo seu poder de extração de cada elemento nas amostras. Na Tabela 3.1 constam os valores determinados por FRX que engloba os elementos presentes em todas as formas minerais constituintes da amostra (minerais primários e secundários) e na forma livre, enquanto na Tabela 3.2, constam os valores de cada elemento determinado por ataque sulfúrico, na forma livre ou presente nos minerais secundários que constituem a fração argila, e possivelmente, em pequena parte da fração silte, que, portanto, são valores sempre menores que os da Tabela 3.1. Os maiores valores de Si da Tabela 3.1 em relação aos da Tabela 3.2 referem-se ao quantitativo de Si presente na forma de quartzo que constitui a fração areia, e em micas e vermiculitas, computados somente por FRX.

Quanto aos maiores valores de Si nas feições matriz (509,99 em P1 e 599,00 g kg^{-1} em P2), intermediários nos mosqueados (488,36 em P1 e 556,33 g kg^{-1} em P2) e menores na plintita (459,92 em P1 501,94 g kg^{-1} em P2) de ambos os perfis (Tabela 3.1) podem ser explicados, principalmente, pela maior quantidade de Fe presente nas frações plintita (165,65 em P1 e 157,72 g kg^{-1} em P2) e mosqueado (87,56 em P1 e 79,38 g kg^{-1} em P2), consequentes de acumulação por meio do processo redox. Estes resultados são pertinentes, considerando-se o que sugere a literatura especializada (Daniels et al., 1978; Díaz-Ortega et al., 2011; Soil Survey Staff, 2014; Santos et al., 2018), de que a feição plintita se trata de um material formado por acumulação de Fe em processo redox, provavelmente migrado da feição matriz.

Em relação aos teores de Al total (FRX) apresentados na Tabela 3.1, de maneira análoga aos de Si, são também mais elevados nas feições matriz e mosqueados que na feição plintita, o que pode ser explicado, em parte, por ser o Al um elemento de muito baixa mobilidade (solubilidade) nos processos de intemperismo (Mason, 1971; Birkeland, 1974; Oliveira, 1998). Portanto, o Al permanece em maiores concentrações nestas feições

na medida em que saem do sistema outros elementos mais móveis como o Si (Mello & Perez, 2009; Buol et al., 2011), o que é corroborado por valores de relação Ki bem mais baixos na feição matriz (Tabela 3.2) e, em parte, devido à perda do elemento Fe destas feições para se concentrar na feição plintita em consequência do processo redox.

Em relação aos teores do elemento Fe presentes nas feições, tanto na Tabela 3.1 quanto na Tabela 2.2, são mais elevados na feição plintita, seguido por mosqueado e matriz do solo, o que está de acordo com praticamente toda a literatura que aborda a questão, considerando-se que a plintita é resultado da concentração de Fe por processo redox e os mosqueados seriam uma fase intermediária deste processo (Schwertmann & Kampf, 1983; Eswaran et al., 1990; Payton et al., 1992; Lin et al., 2007; Tanner & Khalifa, 2010; Vepraskas, 2015). Os demais elementos identificados apresentaram-se com valores baixos, totalizando menos de 5% em todas as feições do solo, o que parece bastante natural considerando-se que, além de já ocorrerem normalmente em baixas concentrações em rochas e solos, se tratam também de elementos bastante solúveis (muitos deles) e que são removidos do sistema muito rapidamente.

Ainda, cabe salientar que os valores de Fe apresentados nas Tabelas 3.1 e 3.2 se tratam das médias dos teores ocorrentes em todas as posições estudadas (Pst1 a Pst5) de cada perfil e representam a tendência geral de cada um deles entre as várias feições, sendo a feição mosqueado, intermediária entre matriz e plintita.

3.4.2 Formas de ferro presentes nas diversas feições

Considerando que é o elemento Fe o principal agente do processo redox, formando plintitas por acumulação após ser segregado e transportado em processos de oxirredução (Daniels et al., 1978; Gong, 1999; Moreira & Oliveira, 2008), nesta seção os estudos foram direcionados ao mesmo, com base na Tabela 3.3 e Figura 3.4. Conforme observado em ambos os perfis de solo e por todas as formas de determinação utilizadas, os teores de Fe são sempre maiores na feição plintita, seguidos daqueles da feição mosqueado, e por fim, na feição matriz do solo, o que sugere de início, que em se tratando de um solo submetido a processos de oxirredução, a feição plintita está se formando por acumulação de Fe proveniente das feições mosqueado e matriz do solo, conforme sugere a literatura (Duarte et al., 2000; Anjos et al., 2007; Tanner & Khalifa, 2010; WRB, 2015). Avaliando-se os valores da Figura 2.4 e considerando-se o alcance de cada tipo de determinação,

depreende-se que a diferença entre os valores de Fet e Fes refere-se ao Fe contido em minerais primários dentro de cada uma das frações, tendo-se assim, na feição plintita cerca de 14,48% em P1 e 28,48% $[(1-(Fes/Fet))*100]$ em P2 do elemento ferro dentro deste tipo de mineral.

Considerando que os teores de Fe determinados pelo DCB (Fed) se referem ao quantitativo de Fe presente na forma de compostos “livres” ou não estruturais (óxidos e hidróxidos), conforme IBGE (2015), cristalinos ou amorfos, entende-se que este valor é o quantitativo de Fe presente nas feições que poderiam se formar no solo em consequência de um processo redox comum como preconiza a literatura (Singh & Gilkes, 1992; Díaz-Ortega et al., 2011) para promover a formação de plintitas ou mosqueados. Considerando também que os valores determinados por ataque sulfúrico (Fes) são referentes ao Fe presente em todos os componentes minerais das frações finas do solo (argila e silte), tanto silicatados secundários quanto oxídicos (Fe pedogênico), a diferença entre os dois valores revela o quantitativo de Fe presente apenas em minerais secundários silicatados (Fe extraído pelo ataque sulfúrico menos o Fe extraído pelo DCB).

Nesse sentido, verifica-se que das 141,67 g kg⁻¹ de Fe (Fes) presentes na feição plintita do P1, 91,53 g kg⁻¹ {correspondentes a 64,60% $[(Fes-Fed)/Fes]*100]$ } encontra-se na estrutura de minerais silicatados secundários e apenas 35,40% $[(1-(Fed/Fes))*100]$ se encontra na forma oxídica que é a parte eventualmente acumulada por processo redox (Tabela 3.3 e Figura 3.4). No caso do P2, das 112,45 g kg⁻¹ de Fe (Fes) presente na feição plintita, 65,24 g kg⁻¹, correspondentes a 58,02% encontra-se na estrutura de minerais silicatados secundários e apenas 41,98% se encontra na forma oxídica. Dessa forma, apenas 35,40% do Fe presente nas plintitas do P1 e 41,98% no P2 encontram-se na forma de óxidos cristalinos ou amorfos, que podem ou não, terem sido formados em consequência dos processos de oxirredução a que estão submetidos os solos. Segundo FAO (1998), Jamagne (1978) e Soil Survey Staff (2014) os processos de oxirredução estão entre os processos pedológicos mais comuns nos solos.

Dentre os elementos mais atuantes nesse processo, o elemento Fe é um dos mais importantes (Trolard et al., 1993; Fiedler & Sommer, 2004). Para tanto, uma vez na solução do solo, sob condição hidromórfica temporária, o Fe pode ser movido e atingir um nível ou zona onde será oxidado (Laveuf et al., 2012), podendo ser imobilizado na forma de concreções ferruginosas (Allen & Hajek, 1989; McKenzie, 1989; Van Breemen, 1988). No entanto, há que se considerar também que o material de origem dos solos da planície do

rio Araguaia se trata de sedimentos argiloarenosos de natureza colúvio-aluvionar (RadamBrasil, 1981), que poderiam, com grande probabilidade, conter previamente o elemento Fe nestas formas oxídicas (Fed e Feo). Portanto, deste montante de Fe detectado, certamente boa parte é, total ou parcialmente herdado do material de origem.

Desse modo, a maior parte de Fe presente em todas as feições redoximórficas encontra-se incluso na estrutura de minerais primários e de alguns derivados destes. Em P1, esse montante é de 79,94% na matriz, de 73,31% no mosqueado e de 69,73% na plintita $[(1-(Fed/Fet))*100]$ (Tabelas 3.1 e 3.3). De forma similar em P2, 72,76% na matriz, 69,77% no mosqueado e 69,97% na plintita.

3.4.3 Identificação dos minerais presentes nas diferentes feições

Em se considerando ser o material de origem destes solos, sedimentos de natureza colúvio-aluvionar provenientes da alteração de rochas das adjacências, portadoras de micas, entende-se serem os minerais micáceos identificados na sua forma mais íntegra, herdados integralmente do material de origem, sendo que os seus derivados (vermiculitas e micas-illitas) podem tanto terem sido formados localmente quanto transportados, em parte ou no seu todo. Micas “verdadeiras” são minerais primários e embora ocorram em solos, são formadas no processo de formação de rochas (Resende et al., 2005) ou, mais especificamente no processo de cristalização do magma, enquanto os minerais micáceos identificados nos DRX's (Figura 3.5), são formados por alteração na estrutura das micas verdadeiras, quase sempre com perda de alguns elementos como o potássio (illitas) e por perda de potássio associado à introdução de polímeros de alumínio em suas camadas (VHEs). Por sua vez, todos os demais constituintes minerais identificados, inclusive os oxídicos (Figuras 3.5 e 3.6), podem pelo menos em parte, terem sido também objeto de transporte, já que o material de origem foi transportado mais ou menos intemperizado.

Por se tratar de um ambiente de dissolução nos tempos atuais, determinado pelo seu regime hídrico, é de se esperar que os minerais micáceos ocorram simultaneamente em diversos estágios de decomposição, coexistindo espécies identificadas ora como micas verdadeiras e algumas de suas formas derivadas (illitas, vermiculitas e VHEs). Conforme pode ser observado na Figura 2.5, em algumas feições redoximórficas como na matriz do solo, onde há maior concentração de argilominerais em razão do processo maior de decomposição, é possível que coexistam as formas vermiculita (V) e VHE, a se julgar o

comportamento dos picos na faixa 1,40 a 1,43 nos tratamentos K. Em trabalho de Moura (2015), realizado nas proximidades de P2, foram identificadas micas primárias na fração silte, e illitas e VHEs na fração argila.

Minerais do grupo das micas e seus derivados também foram detectados em Plintossolos do estado do Maranhão (Anjos et al., 1995, 2007), na bacia sedimentar do Solimões (Lima et al., 2006), em ferricretes no Oeste do Egito (Tanner & Khalifa, 2010) e sobre material laterítico no Norte de Taiwan (Lin, 1991; Wada, 2004).

3.4.4 Dinâmica do elemento ferro na feição plintita em diferentes posições dos perfis de solo

Pelos dados das Figuras 3.7 e 3.8, é possível observar que não há uma distribuição regular ou lógica nos quantitativos de Fe, quer na determinação Fes (forma de argilominerais + forma oxídica), quer apenas na forma oxídica cristalina ou não cristalinae (Fed) (Figuras 2.9 e 2.10) que possam mostrar uma tendência de acumulação ou de movimentação de Fe proveniente de reações de oxirredução, nem horizontal e nem verticalmente nos perfis de solo. Estes resultados são diferentes dos encontrados por Anjos et al. (1995), ao avaliarem amostras de solos em todos os horizontes plínticos; de Coelho & Vidal-Torrado (2003), quando se avaliaram amostras provenientes dos horizontes plínticos e petroplínticos; e de Anjos et al. (2007) em amostras coletadas de cada horizonte, nas quais detectaram incremento de Fed em profundidade.

Avaliando as Figuras 3.7 e 3.8, a variação dos teores de Fe, Si e Al determinados por ataque sulfúrico, presentes na fração fina dos solos (argila e parte do silte) de cada feição, fica bem evidente que os teores de Fe em ambos os perfis têm comportamento regular na feição matriz, sendo crescentes partindo da posição Pst2 de P1 e da posição Pst1 (topo) de P1 para a posição de base Pst5. Tal fato pode indicar que está havendo perda de Fe do topo com consequente acumulação na parte mais basal da zona plíntica dentro desta feição, em razão de processos redox, o que geralmente é admitido por vários autores (Daniels et al., 1978; Soil Survey Staff, 2014; Santos et al., 2018), mas também pode indicar migração de argila silicatada portadora de Fe pelo processo de argiluviação, ou ainda, pode indicar que simplesmente está havendo deterioração de minerais que apresentam Fe, com saída deste elemento da parte superior desta zona. Nas demais feições (mosqueado e plintita) de ambos os perfis, não se observa comportamento semelhante, não

havendo nenhuma sequência ininterrupta em valores, em qualquer direção ou sentido, que possa ser considerada regular ou que possa sugerir alguma tendência de acumulação ou concentração de Fe (Fes), por qualquer das razões mencionadas acima.

Considerando-se os demais constituintes analisados, observa-se no P1 (Figura 3.7), que os teores de Si em maioria são crescentes também do topo para a base da zona plíntica, em todas as feições, enquanto os teores de Al também aumentam na mesma direção, mas em proporção bem menor do que Si. Este fato resulta em valores de relação Ki também crescentes neste mesmo sentido do topo para a base da zona plíntica, mostrando que todas as feições são mais intemperizadas na parte superficial, o que indica seguramente que há uma frente de intemperização ou de decomposição bastante acentuada, no sentido topo para a base, promovendo perda de Si e Fe entre outros elementos constituintes. Esse fato não descarta possível e pequena acumulação localizada de Fe oxídico pelo processo redox, mas praticamente descarta a possibilidade de estar havendo migração significativa de algum tipo de argila silicatada com presença de Fe (argiluviação). Análises granulométricas dos perfis destes solos elaboradas por Martins et al. (2018a, b) revelam não haver acréscimo de argila significativo dentro da desta considerada “zona plíntica” ou zona de ocorrência de plintitas destes perfis, o que reforça a inviabilização desta possibilidade de argiluviação.

Por sua vez no P2 (Figura 3.8), embora com teores de Fe também mais elevados na base da feição matriz, o comportamento dos elementos Si e Al na fração argila, não mostram ou sugerem uma frente única de intemperização no perfil com direção ou posição definida como acontece no perfil P1, tampouco sugerem processo de argiluviação. Sugerem, sim, um processo de degradação adirecional, que está acontecendo simultaneamente com alguma acumulação localizada de Fe na forma oxídica.

Considerando-se exclusivamente os dados provenientes do ataque sulfúrico, é possível verificar que ambos os perfis estão submetidos a um processo geral de decomposição de minerais silicatados, principalmente com liberação de Fe e Si mais acentuada na feição matriz, intermediária nos mosqueados e menor na feição plintita, a se considerar os teores de Fe ainda presentes nas mesmas. Com base apenas nos valores presentes na feição matriz, percebe-se uma maior intensidade de intemperização em sua porção superior. Vale salientar ainda que a feição mosqueado, considerada intermediária neste processo, ocorre apenas nas partes mais inferiores da “zona plíntica”, indicando que

na porção superior, possivelmente, já foi totalmente intemperizada e passou a integrar a feição matriz.

Analisando-se as Figuras 3.9 e 3.10, nota-se primeiramente considerável variabilidade ou irregularidade na disposição dos valores de Fed nas diferentes posições estudadas, na feição plintita, ou seja, não há uma distribuição ou disposição regular que mostre ou sugira alguma tendência de sentido ou de posição, de segregação ou de acumulação exclusiva desta forma de Fe, consequente de um processo de natureza redox. Por outro lado, é possível observar uma associação bem estreita dos valores de Fed com os valores detectados pelo ataque sulfúrico (Fes), ou seja, em amostras com maior concentração de Fed há também maior concentração de Fes, o que possibilita associar mais adequadamente os maiores teores de óxidos (Fed) à maior presença de argilominerais que apresentam Fe na fração fina de cada feição, que por estarem em maiores concentrações, disponibilizam também maiores teores de Fed ao se intemperizarem, do que a prováveis acumulações localizadas de óxidos pelo processo redox.

Os valores médios da relação Fed/Fes na plintita de 0,35 em P1 e 0,42 em P2 (Tabela 3.3) sugerem uma reserva de ferro em outros grupos de minerais, podendo ser liberado da estrutura cristalina a partir do intemperismo (Cornell & Schwertmann, 1996; Anjos et al., 2007). Esses valores mostram que apenas uma parte do Fe considerado pedogênico (Fes) se encontra sob a forma de óxidos (35% e 42%, respectivamente), enquanto a maior parte se encontra na estrutura cristalina dos minerais secundários (vermiculitas, VHEs e illitas). Portanto, se dentro deste quantitativo de ferro (Fed), alguma parte se deve à acumulação por via redox, supõe-se que aconteça de forma muito desorganizada e em quantidades muito pequenas, sem uma tendência principal para algum sentido ou direção.

3.4.5 Mecanismos de formação das feições redoximórficas

Com base nos resultados obtidos e já discutidos, é possível estabelecer ou propor alguns mecanismos de formação das feições redox nos perfis de solo estudados. Os teores de Fe detectados em todas as formas empregadas mostraram-se maiores na feição plintita, intermediários na feição mosqueado e menores na feição matriz do solo (Figura 3.4). Estes dados estão em concordância com a teoria de que, plintitas são materiais ricos em Fe,

quando comparado com matriz e mosqueado (Daniels et al., 1978; Soil Survey Staff, 1999; Tanner & Khalifa, 2010; Díaz-Ortega et al., 2011; Santos et al., 2018).

Ao se analisar e avaliar possíveis acumulações de Fe oxídico por conta de processos redox (ítem 3.4.4) quer formando as formas com maiores teores de Fe (mosqueados e plintitas) quer contribuindo parcialmente para a sua formação, não foram encontradas evidências de pontos ou tendências de acumulação de Fe significativas nesta forma mas, por outro lado, se observou claro processo de intemperização das feições plintita, que perdem Fe e outros elementos, se transformando sequencialmente em mosqueados e matriz.

Observando-se exclusivamente o comportamento do conteúdo de Fe nas diferentes feições e posições (Tabela 3.3 e Figuras 3.7, 3.8, 3.9 e 3.10), é possível estabelecer que a matriz é a feição mais decomposta e mais exaurida no que concerne a minerais e elementos formadores, principalmente Fe, e que os teores mais elevados de Fe nas posições de base desta feição indicam que a decomposição se dá primeiramente na sua porção superior e vai se aprofundando. A presença de mosqueados apenas nas posições mais inferiores estudadas reforça esta teoria. Por sua vez, os teores nas diferentes posições da feição plintita não mostram uma tendência de sentido ou direção desta intemperização, possibilitando pensar que no caso da deterioração desta feição, outros fatores como presença de canais ou micro canais diversos (raízes, organismos, causas pedogênicas), que determinam caminhos preferenciais para a movimentação da água, certamente determinam o comportamento diferenciado das frentes de intemperização em meio à massa da feição inicial como um todo (Figura 3.11). Martins et al. (2018a, b) observaram em solos desta planície, variações consideráveis no comportamento físico de feições plintita, refletindo diferenças em sua constituição, o que atribuíram à diferentes graus de maturidade destas feições.



Figura 3.11. Detalhe de tubos de fluxo de água “pipe” presentes nos horizontes plínticos dos perfis P1 e P2.

Quando verificadas as formas em que o Fe se encontra nas diversas feições, em média, com base nos dados químicos das Tabelas 3.1 e 3.3 e por resultados de DRX da Figura 3.5, foi detectado que a maior parte do Fe presente na feição plintita {69,73% em P1 e 69,97% em P2, $[(1-(\text{Fed}/\text{Fet})) \cdot 100]$ (Tabelas 3.1 e 3.3)} está em forma de minerais primários e secundários, no caso mica e derivados, que não são formados no processo de oxirredução. Portanto é uma feição que nestes solos tem a maior parte do Fe presente, comprovadamente em formas não oxídicas, ou seja, não são formadas exclusivamente como consequência deste processo, conforme é apontado pela literatura (Soil Survey Staff, 2014; Eze et al., 2014; Santos et al., 2018).

Por fim, a relação Feo/Fed muito uniforme e muito baixa em todas as feições (Tabela 3.3), e teores de Feo baixos em todas as posições dentro dos perfis e em todos os perfis (Figuras 3.9 e 3.10), possibilita ponderar que eventuais transformações, quer sejam de formação de novos minerais por redox, ou por decomposição de minerais remanescentes, estão se dando num ritmo bastante regular no tocante a intensidade e velocidade, considerando que a quantidade de Fe cristalino se mantém bem elevada em relação aos amorfos em todas as situações. Anjos et al. (1995) estudando solos com plintita no estado do Maranhão observaram resultados dessa relação entorno de 0,03 na feição plintita, indicando a prevalência de formas cristalinas.

Também os dados distintos e desconexos de teores de Fe (Fes, Fed e Feo) verificados nas plintitas em todas as posições dos perfis (Figuras 3.9 e 3.10) e mesmo dentro de uma mesma posição, bem como a grande variabilidade de características como seu grau de dureza, expresso pelas forças de compressão aplicadas necessária para a sua quebra ou ruptura (Martins et al., 2018a) são mais facilmente entendidos, considerando estar havendo decomposição generalizadas destas, que prováveis acumulações localizadas de Fe oxídico.

Por todas estas razões, é razoável entender a formação destas feições redoximórficas nestes solos, como resultado de um grande processo de decomposição do seu material de origem depositado nestas planícies (sedimentos colúvio-aluvionar), sendo as feições plintitas resquícios deste material, que se encontra em constante intemperização, liberando Fe, Si e outros elementos móveis que saem do sistema pela água de drenagem.

3.5 CONCLUSÕES

Os teores de ferro em todas as formas determinadas são sempre maiores na feição plintita, intermediários na feição mosqueado e menores na feição matriz do solo.

A maior parte de Fe presente em todas as feições redoximórficas encontra-se incluso na estrutura de minerais primários e de seus derivados (vermiculitas, VHES e illitas). Em P1, esses montantes são da ordem de cerca 79,94% na matriz, de 73,31% no mosqueado e de 69,73% na plintita. Em P2, 72,76% na matriz, 69,77% no mosqueado e 69,97% na plintita.

Apenas parte do ferro presente (cerca de 35,40% em P1 e 41,98% em P2) encontra-se detectado na forma de óxidos como goethita e hematita que teriam possibilidade de serem formados em processos de oxirredução.

As feições mosqueado e plintita estudadas não são produto do processo clássico de segregação, mobilização e acumulação de ferro como consequência de processos de oxirredução. Se formaram ou surgiram como resultado de um processo de intemperização relativamente lento e constante do seu material de origem, que é paulatinamente decomposto em meio aquoso, liberando boa parte de seus componentes, entre eles, o ferro e elementos mais móveis como as bases e o silício, que saem do sistema pela água de drenagem, podendo alguma pequena parte eventualmente se recombinar para a formação de novos minerais menos complexos, como caulinitas e óxidos.

A feição matriz do solo ora se apresenta sem vestígios de minerais primários (exceto quartzo) e ora apresenta valores muito baixos, demonstrando ser a feição mais intemperizada dentre todas.

3.6 REFERÊNCIAS

ALEXANDER, L. T.; CADY, J. G. **Genesis and hardening of laterite in soils**. Washington: United States Department of Agriculture, 1962. 90 p. (Technical bulletin, n. 1282).

ALLEN, B. L.; HAJEK, B. F. Mineral occurrence in soil environments. *In*:. **Minerals in soil environments**. Madison: 2, 1989. p. 199-278.

ANJOS, L. H. C.; FRANZMEIER, D. P.; SCHULZE, D. G. Formation of soil with plinthite on a toposequence in Maranhão State, Brazil. **Geoderma**, Amsterdam, v. 64, n. 1, p. 257-279, 1995.

ANJOS, L. H. C.; PEREIRA, M. G.; PÉREZ, D. V.; RAMOS, D. P. Caracterização e classificação de Plintossolos no município de Pinheiro - MA. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 31, n. 5, p. 1035-1044, 2007.

BIRKELAND, P.W. **Pedology, weathering and geomorphological research**. New York. Oxford University Press, 1974. 300 p.

BRAVARD, S.; RIGHI, D. Podzols in Amazonia. **Catena**, Amsterdam, v. 17, n. 1, p. 461–475, 1990.

BUCHANAN, F. **A journey from madras through the countries of Mysore, Canara and Malabar**. 2 ed. East Indian Company, London, 1807, p. 436-461.

BUOL, S. W.; SOUTHARD, R. J.; GRAHAM, R. C.; McDANIEL, P. A. **Soil genesis and classification**. 6. ed. Iowa: John Wiley & Sons, 2011. 560 p.

BROWN, G.; BRINDLEY, G. W. X-Ray diffraction procedures for clay mineral identification. In: BRINDLEY, G.W.; BROWN, G. (ed.). **Cristal structures of clay minerals and their x-ray identification**. Mineralogical Society, London, 1980. v. 5, Cap. 5, p. 305-360.

CARDOSO, M. R. D.; MARCUZZO, F. F. N.; BARROS, J. R. Classificação climática de Köppen-Geiger para o Estado de Goiás e o Distrito Federal. **Acta Geográfica**, Boa Vista, v. 8, n. 1, p. 40-55, 2014.

COELHO, M. R.; VIDAL-TORRADO, P. Caracterização e gênese de perfis plínticos desenvolvidos de arenito do Grupo Bauru. I - Química. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 27, n. 1, p.483-494, 2003a.

CHAUVEL, A.; LUCAS, Y.; BOULET, R. On the genesis of the soil mantle of the region of Manaus, Central Amazonia, Brazil. **Experientia**, Basel, v. 43, n. 1, p. 234–241. 1987.

COELHO, M. R.; VIDAL-TORRADO, P. Caracterização e gênese de perfis plínticos desenvolvidos de arenito do Grupo Bauru – I. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 27, n. 1, p. 483-494, 2003.

CORINGA, E. A. O.; COUTO, E. G.; PEREZ, X. L. O.; VIDAL-TORRADO, P. Atributos de solos hidromórficos no Pantanal Norte Matogrossense. **Acta Amazonica**, Manaus, v. 42, n. 1, p. 19-28, 2012.

CORNELL, R. M.; SCHWERTMANN, U. **The iron oxides; structure, properties, reactions, occurrence and uses**. Weinheim, VCH, 1996. 573p.

DANIELS, R. B.; PERKINS, H. F., HAJEK, B.F., GAMBLE, E.E. Morphology of discontinuous phase plinthite and criteria for its field identification in the southeastern

United States. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 42, n. 1, p. 944-949, 1978.

DÍAZ-ORTEGA, J.; SOLLEIRO-REBOLLEDO, E.; SEDOV, S. Spatial arrangement of soil mantle in Glacis de Buenavista, Mexico as a product and record of landscape evolution. **Geomorphology**, Amsterdam, v. 135, n. 1, p. 248-261, 2011.

DONAGEMA, G. K.; CAMPOS, D. V. B.; CALDERANO, S. B.; TEIXEIRA, W. G.; VIANA, J. H. M. **Manual de métodos de análise de solos**. 2. ed., Embrapa Solos. 2011.

DUARTE, M. N.; CURI, N.; PÉREZ, D. V.; KAMPF, N.; CLAESSEN, M. E. C. Mineralogia, química e micromorfologia de solos de uma microbacia nos tabuleiros costeiros do Espírito Santo. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 35, n. 1, p. 1237-1250, 2000.

DUBROEUCQ, D.; VOLKOFF, B. From Oxisols to Spodosols and Histosols: evolution of the soil mantles in the Rio Negro basin (Amazonia). **Catena**, Amsterdam, v. 32, n. 1, p. 245-280, 1998.

ESWARAN, H.; CONINCK, E.; VARGHESE, T. Role of plinthite and related forms in soil degradation. **Advances Soil Science**, v. 11, n. 1, p. 109-127, 1990.

EZE, P. N.; UDEIGWE, T. K.; MEADOWS, M. E. Plinthite and its associated evolutionary forms in soils and landscapes: a review. **Pedosphere**, v. 24, n. 1, p. 153-166, 2014.

FAO. **World reference base for soil resources**, Rome. 1998, 91p.

FIEDLER, S.; SOMMER, M. Water and redox conditions in wetland soils - their influence on pedogenic oxides and morphology. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 68, n. 1, p. 326-335, 2004.

GALLAHER, R. N.; PERKINS, H. F.; TAN, K. H. Classification, composition, and mineralogy of iron glaebules in a southern coastal plain soil. **Soil Science**, v. 117, n. 1, p. 155-164, 1974.

GARCIA, C. H. P.; LIMA, H. N.; SILVA, F. W. R.; JUNIOR, A. F. N.; TEIXEIRA, W. G.; MACEDO, R. S.; TAVARES, S. G. Chemical properties and mineralogy of soils with plinthite and petroplinthite in Iranduba (AM), Brazil. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 37, n. 4, p. 936-946, 2013.

GONG, Z. T (ed.). Theory, methodology and application of Chinese soil taxonomy. In: CHINESE. **Science Press**, Beijing. 1999.

GRAY, J. M.; MURPHY, B. W. **Parent material and soils**: a guide to the influence of parent material on soil distribution in eastern Australia. Sydney: Department of Land and Water Conservation, 1999. 122 p. (Technical Report nº. 45).

IBGE - Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Manual técnico de pedologia**. 3. ed. Rio de Janeiro: Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística, 2015. 430 p. (Manuais Técnicos em Geociências, n. 4).

JACKSON, M. L (2 ed.). **Soil chemical analysis**: advanced course, second ed. parallel press. Madison, 1975. 895 p.

JAMAGNE, M. Les processus pédogénétiques dans une séquence évolutive progressive sur formations limoneuses loessiques en zone tempérée froide et humide. **Comptes Rendus Hebdomadaires des Séances de l'Académie des Sciences**, v. 286, n. 1, p. 25–27. 1978.

LAVEUF, C.; CORNU, S.; GUILHERME, L. R. G.; GUERIN, A.; JUILLOT, F. The impact of redox conditions on the rare earth element signature of redoximorphic features in a soil sequence developed from limestone. **Geoderma**, Amsterdam, v. 170, n. 1, p. 25–38, 2012.

LIMA, H. N.; MELLO, J. W. V.; SCHAEFER, C. E. G. R.; KER, J. C.; LIMA, A. M. N. Mineralogy and chemistry of three soils along a topossequence from the upper Solimões Basin, western Amazonia. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 30, n. 1, p. 59-68, 2006.

LIN, Y.S.; LIN, Y.W.; WANG, Y.; CHEN, Y.G.; HSU, M.L.; CHIANG, S.H.; CHEN, Z.S. Relationships between topography and spatial variations in groundwater and soil morphology within the Taoyuan–Hukou Tableland, Northwestern Taiwan. **Geomorphology**, Amsterdam, v. 90, n. 1, p. 36–54, 2007.

LIN, S.F. **A preliminary red soil study on terraces in Taoyuan– Hukou area**. Master Thesis, National Taiwan University, Taipei (in Chinese). 1991.

MARANHÃO, D. D. C. **Feições ferruginosas de solos do Vale do Araguaia, Bioma Cerrado, Goiás, Brasil**. 2018. 173 f. Tese de Doutorado. Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, Seropédica, RJ. 2018.

MARTINS, A. P. B.; SANTOS, G. G.; OLIVEIRA, V. A.; MARANHÃO, D. D. C.; COLLIER, L. S. Hardening and stability of plinthic materials of the Araguaia River floodplain under different drying treatments. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 42, e0170190, 2018a.

MARTINS, A.P.B.; SANTOS, G.G.; OLIVEIRA, V.A.; MARANHÃO, D.D.C., Collier, L.S. Reversibility of the hardening process of plinthite and petroplinthite in soils of the Araguaia river floodplain under different treatments. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 42, e0170191. 2018b.

MASON, B. **Princípios de geoquímica**. São Paulo: Universidade de São Paulo. 1971. 403 p.

MCKENZIE, R.M. Manganese oxides and hydroxides. *In*: DIXON, J.B., WEED, S.B. (ed.). **Minerals in soil environments**. ed. Madison: SSSA Book Series, 1989. v. 1, cap. 9. p. 439–465.

MELLO, J. W. V.; PEREZ, D.V. Equilíbrio químico das reações no solo. *In*: MELO VF, ALLEONI LRF (ed.). **Química e mineralogia do solo: conceitos básicos**. Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2009, p. 151-249.

MOORE, D. M.; REYNOLDS, R. C. **X-Ray Diffraction and Identification and Analysis of Clay Minerals**. 2 ed. Oxford, Oxford University Press, 1997, 400 p.

MOREIRA, H. L.; OLIVEIRA, V. A. Evolução e gênese de um Plintossolo Pétrico concrecionário eutrício argissólico no município de Ouro Verde de Goiás. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 32, n. 1, p. 1683-1690, 2008.

MOURA, D. B. **Caracterização de Plintossolos Argilúvicos na Planície do rio Araguaia**. 2015. 94 f. Dissertação (Mestrado em Agronomia: Solo e Água). –Escola de Agronomia, Universidade Federal de Goiás, Goiânia, 2015.

OLIVEIRA, V.A. **Estudo da relação com o substrato litológico, fertilidade potencial e grau de intemperismo dos principais Latossolos do Planalto Central Goiano**. 1998, 164 f. Tese (Doutorado) – Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Universidade Estadual Paulista, Rio Claro, 1998.

OSHER, L. J.; BUOL, S. W. Relationship of soil properties to parent material and landscape position in eastern Madre de Dios, Peru. **Geoderma**, Amsterdam, v. 83, n. 1, p. 143–166, 1998.

PAYTON, R. W.; CHRISTIANSSON, C.; SHISHIRA, E. K.; YANDA, P.; ERIKSSON, M. G. Landform, Soils and Erosion in the North-Eastern Irangi Hills, Kondoa, Tanzania. **Geografiska Annaler. Series A . Physical Geography**, Stockholm, v. 74, n. 2-3, p. 65, 1992.

RADAMBRASIL. **Folha SD. 22 Goiás: geologia, geomorfologia, pedologia, vegetação e uso potencial da terra**. Rio de Janeiro: Ministério das Minas e Energia, Secretaria Geral, 1981. 640 p (Levantamento de recursos naturais, 25).

RESENDE, M.; CURI, N.; KER, J. C.; REZENDE, S. B (ed.). **Mineralogia de Solos Brasileiros: Interpretação e Aplicações**. Lavras: Editora UFLA, 2005. 192p.

ROQUIN, C.; FREYSSINET, P.H.; ZEEGERS, H.; TARDY, Y. Element distribution patterns in laterites of southern Mali: consequence for geochemical prospecting and mineral exploration. **Applied Geochemistry**, Oxford, v. 5, n. 1. p. 303-315, 1990.

SANTOS, H. G.; JÚNIOR, W. C.; DART, R. O.; ÁGLIO, M. L. D.; SOUZA, J. S.; PARES, J. G.; FONTANA, A.; MARTINS, A. L. S.; OLIVEIRA, A. P. **O novo mapa de solos do Brasil: legenda atualizada**. 2. ed. Rio de Janeiro: Embrapa Brasileira de Pesquisa Agropecuária, 2011. 67 p. (Documentos, 130).

SANTOS, H. G.; JACOMINE, P. K. T.; ANJOS, L. H. C.; OLIVEIRA, V.A.; LUMBRERAS, J. F.; COELHO, M. R.; ALMEIDA, J. A.; ARAÚJO FILHO, J. C.; OLIVEIRA, J. B.; CUNHA, T. J. F. **Sistema Brasileiro de Classificação de Solos**. 5. ed. Brasília: Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária, 2018. 355 p.

SCHOENEBERGER, P. J.; WYSOCKI, D. A.; BENHAM, E. C.; SOIL SURVEY STAFF. **Field book for describing and sampling soils**: version 3.0. Lincoln, NE: Natural Resources Conservation Service, National Soil Survey Center, 2012. 298 p.

SCHWERTMANN, U.; KÄMPF, N. Óxidos de Fe jovens em ambientes pedogenéticos brasileiros. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.7, n. 1, p. 251-255, 1983.

SINGH, B.; GILKES, R. I. Properties and distribution of iron oxides and their association with minor elements in the soils of south-western Australia. **Journal Soil Science**, Sydney, v. 43, n. 1, p. 77-98, 1992.

SINGH, B.; GILKES, R. J. Nature and properties of iron rich glaeboles and mottles from some south-west Australian soils. **Geoderma**, Amsterdam, v. 71, n. 1, p. 95-120, 1996.

SOIL SURVEY STAFF. Department of Agriculture. Natural Resources Conservation Service. Soil Survey Staff. **Soil Taxonomy**: a basic system of soil classification for making and interpreting soil surveys. 2.ed. 1999. 869p. (USDA. Agriculture Handbook, 436).

SOIL SURVEY STAFF. **Keys to soil taxonomy**. 12. ed. Washington: United States Department of Agriculture, Natural Resources Conservation Service, 2014. 372 p.

TARDY, Y. *Pédrologie des laterites et des sols tropicaux*. **Masson**: Paris, 1993, 459 p.

TANNER, L. H.; KHALIFA, M. A. Origin of ferricretes in fluvial-marine deposits of the Lower Cenomanian Bahariya Formation, Bahariya Oasis, Western Desert, Egypt. **Journal of African Earth Science**, Oxford, v. 56, n. 1. p. 179–189, 2010.

TEIXEIRA, P. C.; DONAGEM, G. K.; FONTANA, A.; TEIXEIRA, W. G. **Manual de Métodos de Análise de Solos**. 3. ed. Rio de Janeiro: Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária, 2017. 575 p.

TROLARD, F.; SOULIER, A.; CURMI, P. The solid iron forms in acid hydromorphic environments— a partitional approach by selective dissolution. **Comptes Rendus de l'Académie des Sciences Série II**, Paris, v. 316, n. 10, p. 1463–1468, 1993.

VAN BODEGOM, P.; REEVEN, J. V.; VAN DER GON, H. A. C. D. Prediction of reducible soil iron content from iron extraction data. **Biogeochemistry**, Dordrecht, v. 64, n. 1, p. 231-245, 2003.

VAN BREEMEN, N. Effects of seasonal redox processes involving iron on the chemistry of periodically reduced soils. In: STUCKI, J.W.; GOODMAN, B.; SCHWERTMANN, U. (ed.). **Iron in Soils and Clay Minerals**. D. Reidel Publishing Company, Dordrecht, The Netherlands, p. 797–809, 1988.

VEPRASKAS, M. J.; WILDING, L. P.; DREES, L. R. Aquic conditions for soil taxonomy: concepts soil morphology and micromorphology. *In*: RINGROSE-VOASE, A. J.; HUMPHREYS, G. S. (ed.). **Soil micromorphology**: studies in management and genesis. Elsevier: Amsterdam. 1994. p. 117-131.

VEPRASKAS, M. J. **Redoximorphic features for identifying aquic conditions**. North Carolina Agricultural Research Service. 2015. 29 p. (Technical Bulletin, nº 301).

VERDADE, F. D. A. C. Análise química total. *In*: MONIZ, A.C. (ed.) **Elementos de Pedologia**. São Paulo: Polígono, p. 209-221, 1972.

WADA, N. **Composition change of soil clay minerals and free iron oxides with terrace development in North Taiwan**. Master Thesis, Meiji University, Tokyo, 2004.

WRB. World Reference Base for Soil Resources -. International soil classification system for naming soils and creating legends for soil maps. **Food and Agriculture Organization of the United Nations**. Rome: IUSS/ISRIC/FAO, 2015. 106p.

ZHAO, X. R., WU, H. Y., SONG, X. D., YANG, S. H., DONG, Y., YANG, J. L., ZHANG, G. L. Intra-horizon differentiation of the bacterial community and its co-occurrence network in a typical Plinthic horizon. **Science of the Total Environment**, Amsterdam, v. 678, n. 1, p. 3692-3701, 2019.

4. PROVÁVEIS CAUSAS DO ENDURECIMENTO DE FEIÇÕES REDOXIMÓRFICAS EM PLINTOSSOLOS DA REGIÃO CENTRAL DO BRASIL

RESUMO: O objetivo deste estudo foi investigar as possíveis causas ou condicionamentos do maior endurecimento ou da consistência mais endurecida da feição plintita, particularmente relacionadas a formas e quantitativos de ferro, tanto na condição úmida quanto seca, considerando serem as variações no grau de consistência destas feições, fenômeno de grande importância no comportamento dos solos da planície do Rio Araguaia – Brasil, em virtude da sua larga utilização agrícola. As feições do solo foram coletadas em cinco posições dos perfis onde se detectava horizontes plínticos iniciais, centrais e de base. As amostras separadas de matriz, mosqueados e plintita sob condições sob diferentes tratamentos foram quebradas pelo aparelho Instron e trituradas sob a forma de pó e realizadas as determinações químicas por fluorescência de raios-X (FRX), ataque ácido sulfúrico (H_2SO_4), ditionito-citrato-bicarbonato de sódio (DCB), oxalato-ácido de amônio e mineralogia por difratometria de raios-X. A maior dureza das feições plintita dos solos está diretamente relacionada ao teor de ferro oxídico contido em sua fração fina. Os óxidos de ferro são os elementos responsáveis pela promoção e manutenção do endurecimento das feições. A ocorrência de cores (amareladas e avermelhadas) das feições mosqueado e plintita, está estreitamente associada a relação Fed/Fes com valores na ordem de pelo menos 0,35. A presença da feição plintita, com os quesitos de cor e dureza plenamente satisfeitos, se estabeleceu nos casos estudados com uma combinação dos seguintes fatores: condição de sazonalidade do regime hídrico; teores absolutos de Fed de pelo menos 40 g kg^{-1} associados a uma relação Fed/Fes de pelo menos 0,35 e valores de Fes iguais ou superiores a 100 g kg^{-1} , associados a uma relação Fes/Fet de pelo menos 0,70.

Palavras-chave: dureza da plintita, força de compressão, goethita, hematita, óxidos de ferro.

ABSTRACT: The aim of this study was to investigate the possible causes or conditions of the greatest hardening or the most hardened consistency of the plintite feature, particularly related to forms and amounts of iron, both in the wet and dry condition, considering that the variations in the degree of consistency of these features are, phenomenon of great importance in the behavior of the soils of the Araguaia River floodplain - Brazil, due to its wide agricultural use. The soil features were collected in five positions of the profiles where initial, central and base plinthic horizons were detected. The separate samples of matrix, mottled and plinthite under conditions under different treatments were broken by the Instron apparatus and ground into powder and chemical determinations were made by X-ray fluorescence (FRX), sulfuric acid attack (H_2SO_4), dithionite- sodium citrate- bicarbonate (DCB), ammonium oxalate and mineralogy by X-ray diffraction. The greater hardness of the plintite features of the soils is directly related to the content of oxidic iron contained in its fine fraction. Iron oxides are the elements responsible for promoting and maintaining the hardening of features. The occurrence of colors (yellowish and reddish) of the mottled and plintite features is closely associated with the Fed/Fes ratio with values in the order of at least 0.35. The presence of the plintite feature, with the requirements of color and hardness fully satisfied, was established in the cases studied with a combination of the following factors: condition of seasonality of the water regime; absolute levels of Fed of at least 40 g kg^{-1} associated with a Fed/Fes ratio of at least 0.35 and Fes values equal to or greater than 100 g kg^{-1} , associated with a Fes/Fet ratio of at least 0.70.

Keywords: plintite hardness, compression force, goethite, hematite, iron oxides.

4.1 INTRODUÇÃO

A plintita, termo derivado de laterita, originalmente definida em trabalho de Buchanan (1807) é uma feição redoximórfica constituída da mistura de argila, rica em ferro (Fe), ou Fe e alumínio (Al), pobre em carbono orgânico, com grãos de quartzo e outros minerais que ocorre sob a forma de mosqueados vermelhos, vermelho-amarelados e vermelho-escuros (Daniels et al., 1978; Soil Survey Staff, 2014; IBGE, 2015; Santos et al., 2018). Segundo estes autores, a gênese dessas feições ocorre em ambiente úmido pela segregação de Fe, importando em mobilização, transporte e concentração final dos compostos de Fe no perfil do solo. Conforme a literatura supracitada a feição plintita, que em condições naturais é branda, cortável com a faca ou quebrável com a mão, tem consistência firme em condição úmida, e endurece de forma irreversível quando submetida a ciclos repetidos de hidratação e secagem, tornando-se de consistência dura ou muito dura quando seca.

Segundo a literatura especializada, o endurecimento irreversível da feição plintita tem sido atribuído ao maior conteúdo de Fe e Al em relação às feições não endurecidas (matriz do solo e mosqueado) e a seu maior grau de cristalinidade (Driessen & Dudal, 1991; Santos & Batista, 1996; Martins et al., 2018a; Santos et al., 2018), contribuindo na formação e estabilização estrutural dos solos (Momoli & Cooper, 2016). Os óxidos presentes nas feições que contribuem para o endurecimento da plintita são comumente hematita, goethita, óxidos fracamente cristalizados e hidróxido de Al (Lal & Stewart, 1990; Soil Survey Staff, 2010, 2014).

Para Beauvais & Colin (1993), a ferruginização inicial é primeiramente goethítica nos estádios iniciais de formação da plintita, onde e se torna progressivamente hematítica durante os processos de oxidação e endurecimento dessa feição. Em pesquisas de Coelho & Vidal-Torrado (2003) estudando glêbulas plínticas, houve predomínio de goethita na sua constituição, ocorrendo também a hematita em proporções consideráveis. Já em trabalhos de Anjos et al. (1995) e Miguel et al. (2013) estudando solos com plintitas no Maranhão e Rio Grande do Sul, respectivamente, os autores detectaram predominância da hematita em detrimento da goethita.

Nesse contexto, tratamentos de umedecimento e secagem para avaliação do endurecimento das feições redoximórficas, principalmente da plintita, em solos da planície do Rio Araguaia foram realizados por Martins et al. (2018a). Nos estudos destes autores,

além de confirmarem o endurecimento irreversível da feição plintita, constataram também no âmbito de um mesmo horizonte de um mesmo perfil a coexistência de feições plintita e mosqueados muito distintas em termos de grau de endurecimento e de características como cor e teores de ferro.

A hipótese deste estudo sustenta que o endurecimento das feições redoximórficas é influenciado principalmente pelos quantitativos dos óxidos de Fe hematita e goethita.

Portanto, o objetivo deste estudo foi investigar as possíveis causas ou condicionamentos do maior endurecimento ou da consistência mais endurecida da feição plintita, particularmente relacionadas a formas e quantitativos de ferro, tanto na condição úmida quanto seca, considerando serem as variações no grau de consistência destas feições, fenômeno de grande importância no comportamento dos solos da planície do Rio Araguaia – Brasil, em virtude da sua larga utilização agrícola.

4.2 MATERIAL E MÉTODOS

4.2.1 Localização da área de estudo

O estudo foi realizado em dois perfis de solos (P1 e P2) situados nas planícies de inundação do Rio Araguaia, distrito de Luiz Alves, município de São Miguel do Araguaia (Figura 4.1). Adicionalmente, foram utilizados para efeito comparativo, um outro perfil (P4) com condição de dureza das feições plintita muito distintas, situado na planície do rio João Leite, no município de Terezópolis de Goiás, proximidades da cidade de Goiânia, e também amostras de petroplintita com dureza muito elevada, de um perfil de Plintossolo Pétrico Litoplântico (P3), situado nas proximidades da planície do rio Araguaia, também no município de Luiz Alves, todos no estado de Goiás, Brasil. As coordenadas geográficas do perfil P1 são: 13°14'38,17"S e 50°33'16,97" W, altitude de 218 m; do perfil P2: 13°12'17,75"S, 50°31'28,61"W, altitude de 216 m; do perfil P3: 13°15'03,70"S, 50°31'46,90"W, altitude de 225 m; e do perfil P4: 16°28'30,40"S, 49°06'42,60"W, altitude de 753 m. Segundo Köppen Classification System, o clima da região é Aw, definido como tropical com estação seca no inverno. A precipitação pluvial média anual está entre 1800 e 2000 mm, com temperatura média anual variando de 25 a 26 °C (Cardoso et al., 2014).

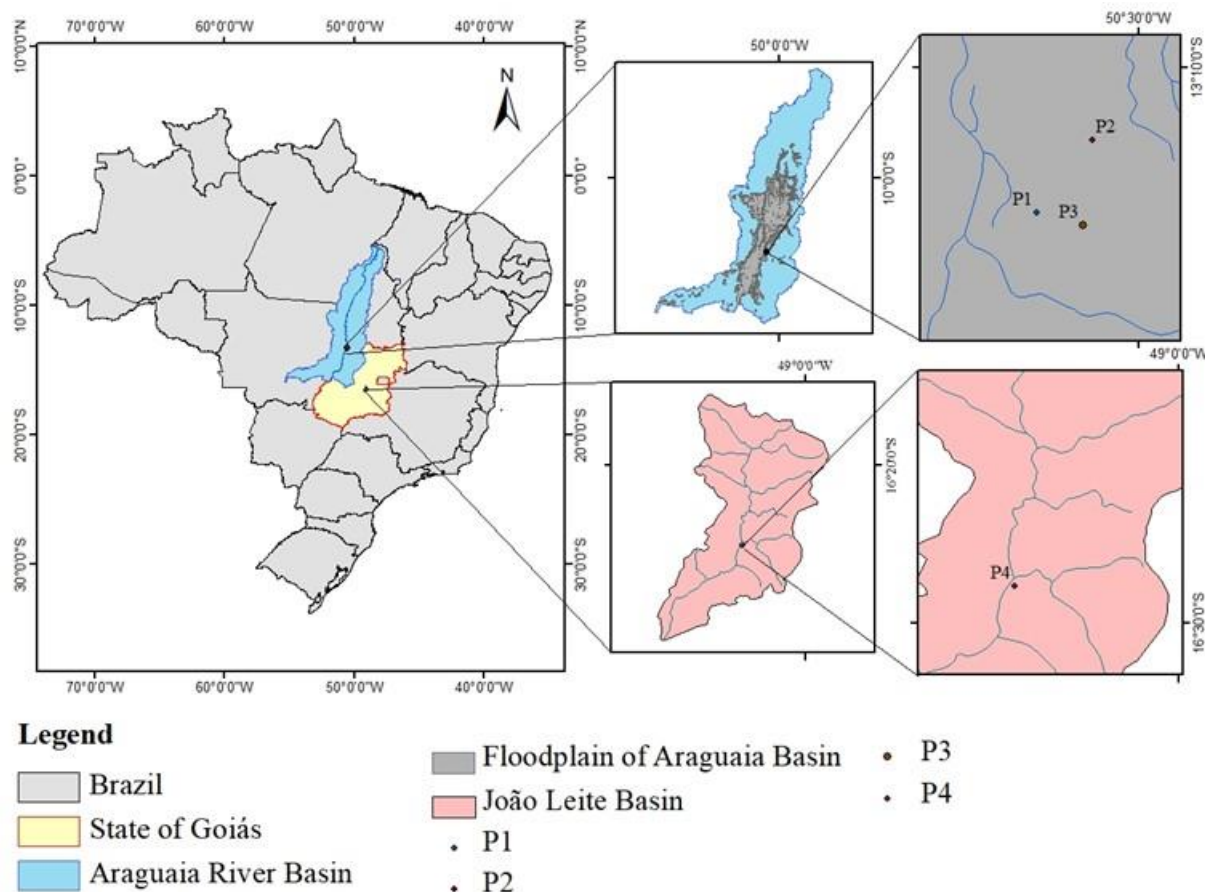


Figura 4.1. Localização dos perfis de solo na planície do rio Araguaia e rio João Leite, Brasil.

Os perfis de solo foram selecionados, caracterizados e classificados por Martins et al. (2018), como: P1 e P2 - Plintossolos Argilúvicos Distróficos típicos, P3 - Plintossolo Pétrico Concrecionário típico e P4 – Plintossolo Argilúvico Eutrófico típico (Santos et al., 2018) and: P1 and P2 - Stagnic Plinthosol (Clayic, Orthodystric, Humic, Vetic), P3 - Endopetric Plinthosol (Clayic, Orthodystric, Fractic, Ochric), and P4 - Stagnic Plinthosol (Drainic, Oligoeutric, Loamic, Ochric) by World Reference Base for Soil Resources (WRB, 2015). Os perfis P2, P3 e P4 correspondem aos perfis P3, P5 e P6, respectivamente, no trabalho original de Martins et al. (2018). Para caracterização analítica de rotina, utilizou-se os métodos especificados por Donagema et al. (2011). Segundo RadamBrasil (1981), o material de origem que forma os perfis P1 e P2 são sedimentos aluvio-coluvionares da Cobertura Sedimentar do Bananal; o material de origem que forma P3 pertence ao Grupo Estrondo, e por fim, o material de origem que forma P4 trata-se também de sedimentos aluvio-coluvionares, como os P1 e P2.

O relevo local que se encontram os perfis P1 e P2 é caracterizado como plano com presença de murundus e a vegetação natural é de Campo Cerrado. Naturalmente, estes perfis mantêm-se submersos na estação chuvosa, enquanto na estação seca, o lençol freático se situa a cerca de 1,80 m da superfície. O relevo local de P3 é suave ondulado e o perfil foi coletado em corte de estrada e se encontra sob vegetação de Cerrado. Por fim, o relevo em que encontra-se o perfil P4 é suave ondulado com presença de murundus, com domínio de vegetação do tipo cerradão e remanescentes de pastagem de braquiária. As feições redoximórficas em P1, P2 e P4 foram coletadas nos horizontes plínticos iniciais ou superior, no horizonte plíntico principal e nos horizontes plínticos de base ou inferior, totalizando cinco conjuntos de amostras, conforme esquema da Figura 4.2. Em P3, coletou-se amostras na forma de blocos contínuos de petroplinta, sem definição e marcação de posições. De cada posição (Pst) amostrada foram separadas as diferentes feições redoximórficas.

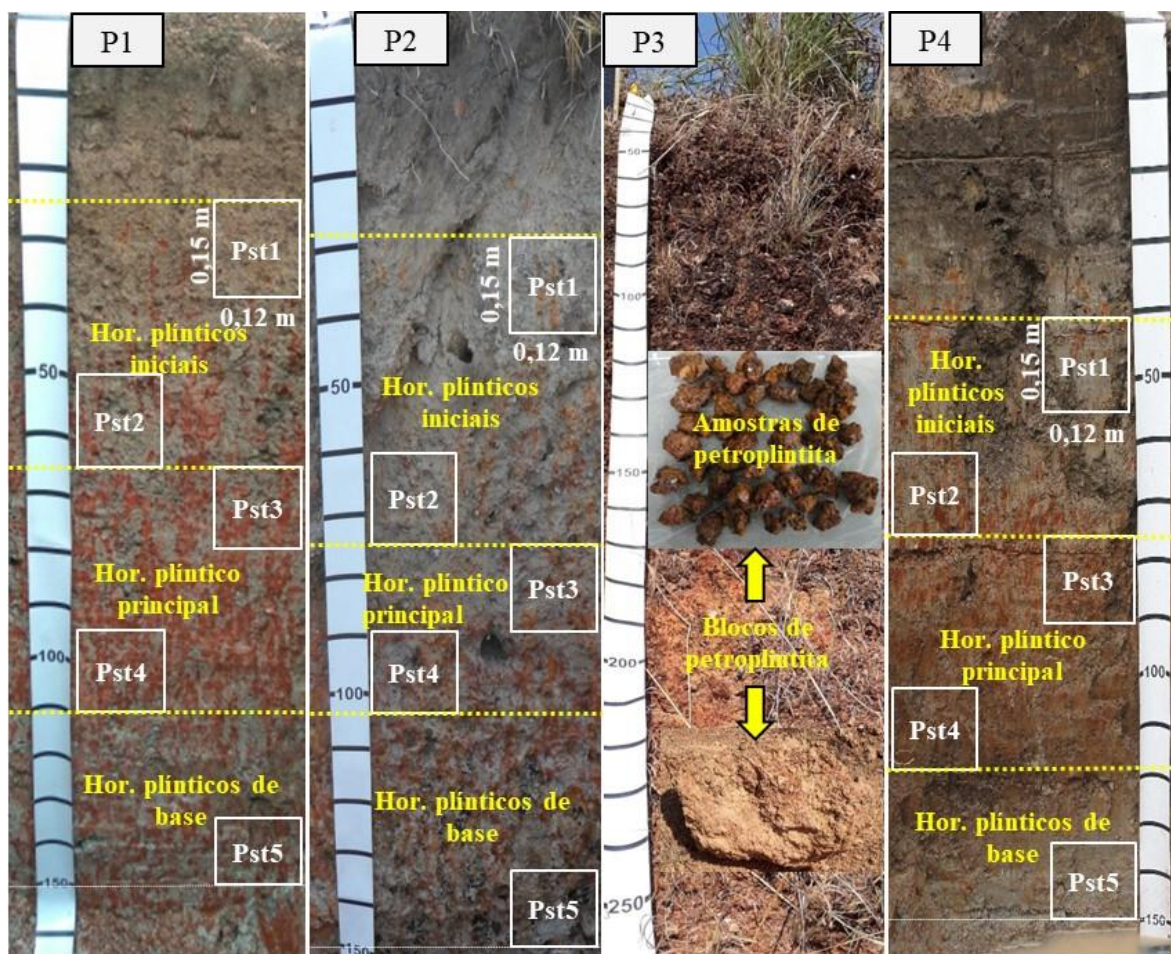


Figura 4.2. Esquema de coleta das feições redoximórficas nos perfis de solo P1, P2, P3 e P4. Pst: posição.

4.2.2 Seleção de locais, amostragens e preparação das feições redoximórficas para análises

As diferentes posições para amostragem de matriz do solo, mosqueado e plintita ao longo dos perfis P1, P2 e P4 foram definidas com o objetivo de avaliar as possíveis variações espaciais (horizontais ou verticais) quanto a acumulação de Fe e endurecimento da plintita em relação às demais feições redoximórficas, dentro de cada perfil. No caso das amostras de petroplintita contidas em horizonte litoplântico de P3, três amostras homogêneas de petroplintita foram coletadas de forma aleatória, na forma de blocos contínuos (concreção laterítica "canga"), cujo critério de distinção era dureza considerável (consistência muito dura na amostra seca), com um peso médio de cada bloco de aproximadamente 400 g por amostra, nos horizontes Bfc1 e Bfc2, em profundidades de 0,09 a 1,03 m. Em laboratório, os blocos contínuos de petroplintitas foram fragmentados com martelo pedológico para se obter padronização, quanto ao tamanho e volume, formando um conjunto de 10 amostras por tratamento, conforme Martins et al. (2018a, b). As amostras de plintita do P4 foram coletadas apenas na posição superior direito (Pst1) e posição inferior esquerdo (Pst2) dos horizontes plânticos superiores, não sendo esta feição identificada no campo em quantidade suficiente para realização das análises necessárias nas demais posições.

Todas as posições (Pst) amostradas foram demarcadas sob auxílio de um quadro amostrador metálico com dimensões de 0,12 m x 0,15 m x 0,15 m (largura, altura e comprimento), o que resultou em amostras com volume em cada posição de aproximadamente 0,0027 m³. A partir de então, as feições foram separadas considerando o critério consistência (IBGE, 2015; Santos et al., 2018) para cada posição amostrada.

Em cada perfil, obtiveram-se cinco conjuntos de matriz (15 amostras), três conjuntos de mosqueados em P1, dois conjuntos de mosqueados em P2 e cinco conjuntos de mosqueados em P4 (10 amostras). Já para as plintitas, obteve-se 120 amostras de plintita (cinco conjuntos (50 amostras) em P1 e P2 e dois conjuntos (20 amostras)) em P4. No total, foram avaliadas 145 amostras de feições redoximórficas (13 conjuntos em P1, 12 conjuntos em P2 e 12 conjuntos em P4).

Em todas as amostras individualizadas de plintita foi testada a resistência à compressão necessária à sua desagregação, utilizando-se o equipamento universal de testes mecânicos Instron® (modelo 3367, Grove City, Estados Unidos), com força aplicada em

Newton (N), necessária à desagregação (Martins et al., 2018a). Para cada amostra foi registrada a força máxima aplicada, expressa em Newton (N), quando o equipamento comprimia ou quebrava pelo menos 40% da altura inicial das amostras das feições redoximórficas. Para possibilitar a comparação entre as plintitas, a força aplicada foi associada ao volume do material testado, mensurados com auxílio de paquímetro digital, tomando-se três medidas (largura, altura e comprimento) conforme Martins et al. (2018a). O volume de cada amostra de petroplintita (10 amostras no total) foram padronizadas a um volume aproximado de 7,00 cm³, por constatar feição estabilizada quanto a sua dureza.

Todas as amostras separadas em conjuntos das feições matriz do solo e mosqueado, bem como dos conjuntos separados por dureza da feição plintita foram trituradas e homogeneizados em almofariz de ágata e utilizadas para as diversas determinações químicas e mineralógicas de cada perfil de solo. A petroplintita em condição natural, também seguiu os mesmos procedimentos da plintita para obtenção de material para as análises requeridas.

4.2.3 Análise de espectrometria de fluorescência de raios-X

Na fração fina obtida da plintita, procedeu-se análises por espectrometria de fluorescência de raios-X (FRX) para avaliação do teor total de Fe (Fet). Utilizou-se duas gramas de cada amostra por posição amostrada dos perfis, moídas até passarem em peneira com malha 0,053 mm e acondicionadas em porta amostras padrão, com fundo revestido com filme poliéster “mylar” de 3,6 µm e dispostas em um carrossel removível, com capacidade de 10 amostras. Para esta análise, foram procedidas duas leituras por amostra, tendo realizado média no final para cada elemento do solo. Para mensurar os elementos químicos presentes na plintita, fez-se uma média geral de todos os locais amostrados.

4.2.4 Análise por ataque ácido sulfúrico

Para avaliação do elemento Fe (Fes) solúvel ou presente na estrutura de minerais secundários (Verdade, 1972), procedeu-se extração com ácido sulfúrico em amostras preparadas de matriz do solo, mosqueado, plintita e petroplintita. Para esta determinação, as amostras foram solubilizadas com ácido sulfúrico (H₂SO₄) na proporção de 1:1 conforme Teixeira et al. (2017).

4.2.5 Análise para extração de ferro (fed e feo) e alumínio (ald e alo): ditionito-citrato-bicarbonato de sódio e oxalato ácido de amônio

Para a extração do elemento Fe por ditionito-citrato-bicarbonato de sódio (Fed) e pelo oxalato ácido de amônio (Feo), procederam-se as análises (Teixeira et al., 2017) em matriz, mosqueado e plintita em amostras naturais de todas as posições de cada perfil e petroplintita (amostra única composta), também em condição natural. Apenas nas amostras de plintita, realizou-se análises de Fed e Feo em tratamentos submetidos a umedecimento e secagem de todas as posições.

4.2.6 Análise por difração de raios-X

A mineralogia das feições matriz do solo, mosqueado e plintita foi determinada por difração de raios-X (DRX) na fração fina das amostras naturais (argila + silte) oriundas de uma amostra composta não tratada e não orientada do horizonte diagnóstico principal (Pst 3 e Pst 4) dos perfis P1, P2 e P4. Especificamente em P1 e P2, utilizou-se uma amostra de TFSA, denominada como “Soil” para fins comparativos com as demais feições. Em seguida, seguiu-se metodologia de Teixeira et al. (2017) e as amostras foram processadas em um sistema Miniflex II, difratômetro de raios-X de bancada fabricado pela Rigaku, usando radiação Cu K α (0.1540598 nm), operado a 30kV e 15 mA, com filtro de Ni para supressão de K β , e detecção com um cintilador de NaI, janela de Be, monocromador de grafite. As condições de análise de rotina foram processadas no intervalo de 4 a 60° (2 θ), a uma velocidade de 0.02° seg (2 θ).

Para comparação da mineralogia da fração argila presente nas plintitas em condições naturais (apenas P1 e P2) nas posições Pst 3 e Pst 4, foram determinadas por difração de raios-X usando um difratômetro Shimadzu XRD 6000 operado com Cu K α a 40 kV e 30 mA e um monocromador de grafite. As amostras da fração argila foram pré-tratadas e desferrificadas usando a solução de DCB (Jackson, 1975). Realizou-se tratamentos de saturação usando potássio (K) e magnésio (Mg) na forma de microagregados orientados de argila (Jackson, 1975) a uma velocidade de 0,7° min (2 θ) e dentro de uma faixa de 3 a 35° (2 θ). As amostras saturadas com K (KCl 1 mol L⁻¹) foram submetidas a tratamentos térmicos sucessivos (25, 350 e 550 °C), e as amostras saturadas com Mg (MgCl₂ 1 mol L⁻¹) foram analisadas à temperatura ambiente

Para interpretação dos DRX e identificação dos minerais presentes nas feições, utilizou-se os critérios baseados no espaçamento interplanar (d) e no comportamento do pico de difração, conforme apresentado em Jackson (1975), Brown & Brindley (1980) e Moore & Reynolds (1997) e comportamento frente aos tratamentos (natural, umedecido e secagem).

4.2.7 Análise estatística

Os cálculos do erro padrão das médias (EP+-) dos teores médios de ferro obtidos em conjuntos de amostras de feições redoximórficas em condições naturais por diferentes métodos de análises foram obtidos utilizando a ferramenta de “análise descritiva” do programa Microsoft Excel 2010. Para confecção de figuras e tabelas, também se utilizou o programa Microsoft Excel 2010.

4.3 RESULTADOS

4.3.1 Difractogramas de raios-X (DRX) obtidos em amostras naturais das feições redoximórficas

Na Figura 4.3 são apresentados os DRX obtidos em amostras de pó, das posições de amostragem Pst3 e Pst4 dos perfis P1, P2 e P4. Nos DRX dos perfis P1 e P2, são mostrados os principais óxidos de ferro presentes no solo (TFSA) e nas feições matriz do solo, mosqueado e plintita da planície do rio Araguaia, com destaque para hematita (Hm) e goethita (Gh). Os DRX do perfil P4 mostram os principais minerais presentes nas feições matriz do solo e mosqueado da planície do ribeirão João Leite, destacando-se a caulinita (K), gibbsita (Gb), goethita (Gh) e hematita (Hm).

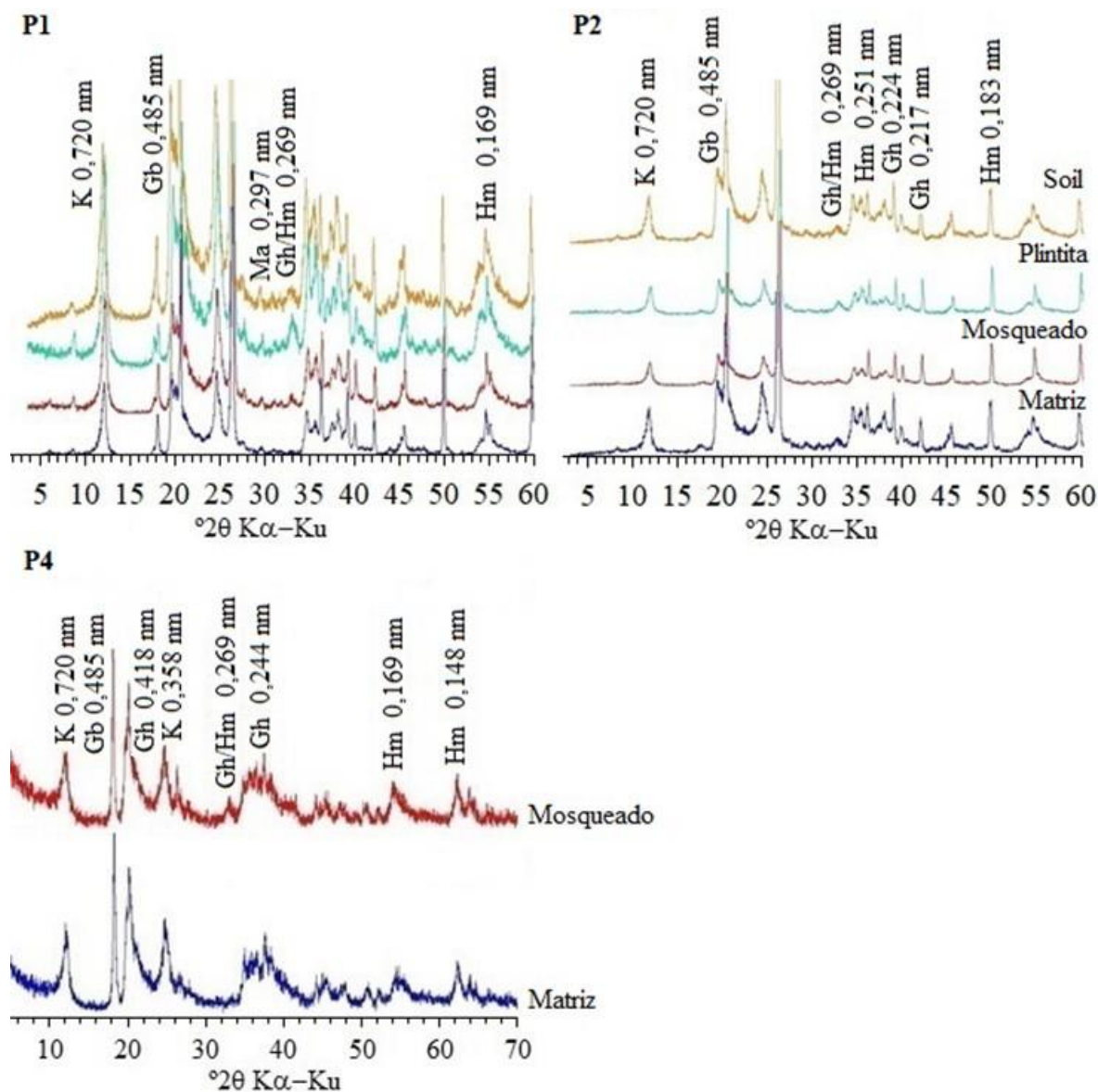


Figura 4.3. Difratomogramas de raios-X obtidos em amostras naturais das frações argila+silte na forma de pó, da matriz, do mosqueado, da plintita e da TFSA (soil), coletadas nas posições Pst3 e Pst4 dos perfis.

A Figura 4.4 mostra os DRX obtidos em amostras desferrificadas de plintita dos perfis P1 e P2 da planície do rio Araguaia, após submetidas a testes de força de compressão. Os DRX do perfil P1 mostram os principais minerais presentes na feição plintita, com destaque para vermiculita (V), caulinita (K) e gibbsita (Gb). No perfil P2, foram detectados nos DRX de amostras de plintita, os minerais vermiculita (V), mica (M), caulinita (K) e gibbsita (Gb).

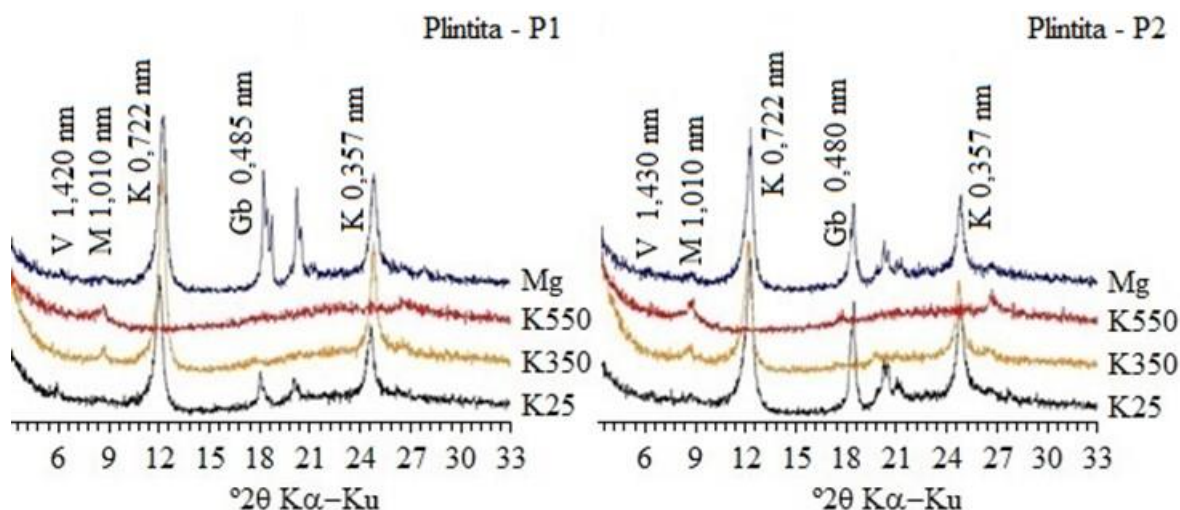


Figura 4.4. Difratomogramas de raios-X da argila em amostras orientadas, tratadas com potássio a 25, 350 e 550 °C e saturadas com magnésio à temperatura ambiente, de plintitas das posições Pst3 e Pst4 dos perfis P1 e P2, da planície do rio Araguaia.

4.3.2 Teores e formas de ferro detectados nas feições redoximórficas em função da força de compressão aplicada e dos tratamentos de umedecimento e secagem

A Tabela 4.1 mostra os dados quantitativos médios de ferro, determinados pelos diversos métodos de análise, em conjuntos de amostras das feições redoximórficas dos quatro perfis de solos, bem como alguns aspectos de consistência das amostras determinados a campo por ocasião da sua coleta e descrição. Dentre as feições redoximórficas, são destacados respectivamente os teores de Fet, Fes e Fed mais elevados na petroplintita (P3) com 603,89, 215,00 e 69,80 g kg⁻¹). Neste cenário, o menor valor de Feo (0,50 g kg⁻¹) e das relações Fed/Fes e Feo/Fed (0,33 e 0,01) foram obtidas na petroplintita de P3, condizentes com a consistência extremamente firme e extremante dura desta feição.

Tabela 4.1. Teores médios de ferro obtidos em conjuntos de amostras de feições redoximórficas em condições naturais por diferentes métodos de análises.

Feições	Formas de ferro e suas relações ⁽¹⁾							Consistência	
	Fet	Fes	Fed	Feo	Fes/ Fet	Fed/ Fes	Feo/ Fed		
	g kg ⁻¹				-	-	-	Úmida	Seca
P1 - PLINTOSSOLO ARGILÚVICO Distrófico típico (Santos et al., 2018) / Plinthosol (WRB, 2015)									
Matriz	47,05±1,51	40,60±1,44	9,44±1,31	0,30±0,04	0,86	0,23	0,03	Friável	Lig. dura
Mosqueado	87,56±6,38	63,00±4,00	23,37±1,59	0,58±0,09	0,72	0,37	0,02	Friável	Lig. dura
Plintita	165,65±9,58	141,67±7,90	50,14±1,07	1,61±0,15	0,86	0,35	0,03	Firme/ muito firme	Dura/ muito dura
P2 - PLINTOSSOLO ARGILÚVICO Distrófico típico (Santos et al., 2018) / Plinthosol (WRB, 2015)									
Matriz	36,89±7,97	38,20±3,72	10,05±1,93	0,26±0,04	1,04	0,26	0,03	Friável	Lig. dura
Mosqueado	79,38±5,05	62,00±3,00	24,00±2,00	0,44±0,01	0,78	0,39	0,02	Friável	Lig. dura
Plintita	157,23±4,80	112,45±4,99	47,21±1,32	1,56±0,14	0,71	0,42	0,03	Firme/ muito firme	Dura/ muito dura
P3-PLINTOSSOLO PÉTRICO Concrecionário típico (Santos et al., 2018) / Plinthosol (WRB, 2015)									
Petroplintita	603,89	215,00	69,80	0,50	0,36	0,33	0,01	Ext. firme	Ext. dura
P4-PLINTOSSOLO ARGILÚVICO Eutrófico típico (Santos et al., 2018) / Plinthosol (WRB, 2015)									
Matriz	54,49±3,12	47,40±3,28	8,99±0,95	0,78±0,08	0,87	0,19	0,09	Friável	Dura
Mosqueado	125,97±19,11	83,80±9,73	32,20±5,27	2,39±0,21	0,67	0,38	0,07	Friável	Dura
Plintita	176,65±6,83	92,67±15,81	49,27±3,74	5,36±0,40	0,53	0,53	0,11	Friável/ firme	Dura/ muito dura

⁽¹⁾Fet: ferro obtido por fluorescência de raios-X; Fes: ferro extraído por ataque ácido sulfúrico; Fed: ferro extraído por ditionito-citrato-bicarbonato de sódio; Feo: ferro extraído por oxalato ácido de amônio.

Dentre as diferentes determinações, pelas figuras 4.5, 4.6 e 4.7, os maiores valores de dureza medidos, se alinham melhor com a determinação Fed, ou seja, nas amostras que apresentaram maior dureza medida, são maiores os valores de Fed nos três perfis.

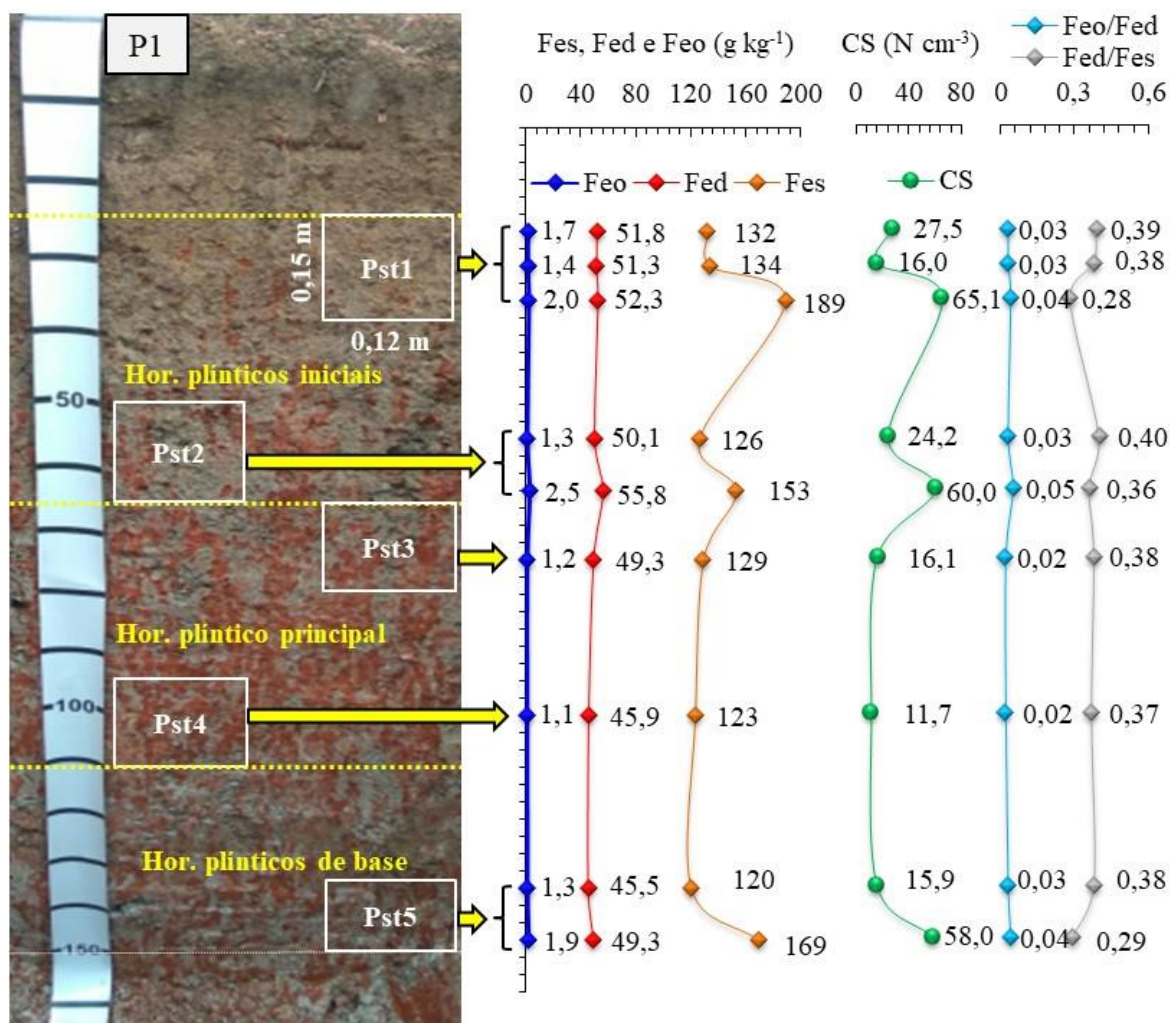


Figura 4.5. Teores de ferro (Fe) dos horizontes plínticos: inicial, principal e de base, obtidos por diferentes metodologias em amostras de plintitas após submetidas à forças de compressão (CS). Fes: ferro extraído por ataque ácido sulfúrico; Fed: ferro extraído por ditonito-citrato-bicarbonato de sódio; Feo: ferro extraído por oxalato ácido de amônio. Após realizado os testes de força de compressão por posição (Pst), alguns conjuntos de amostras não ofereceram quantidade de material suficiente para realização das análises dos teores de ferro.

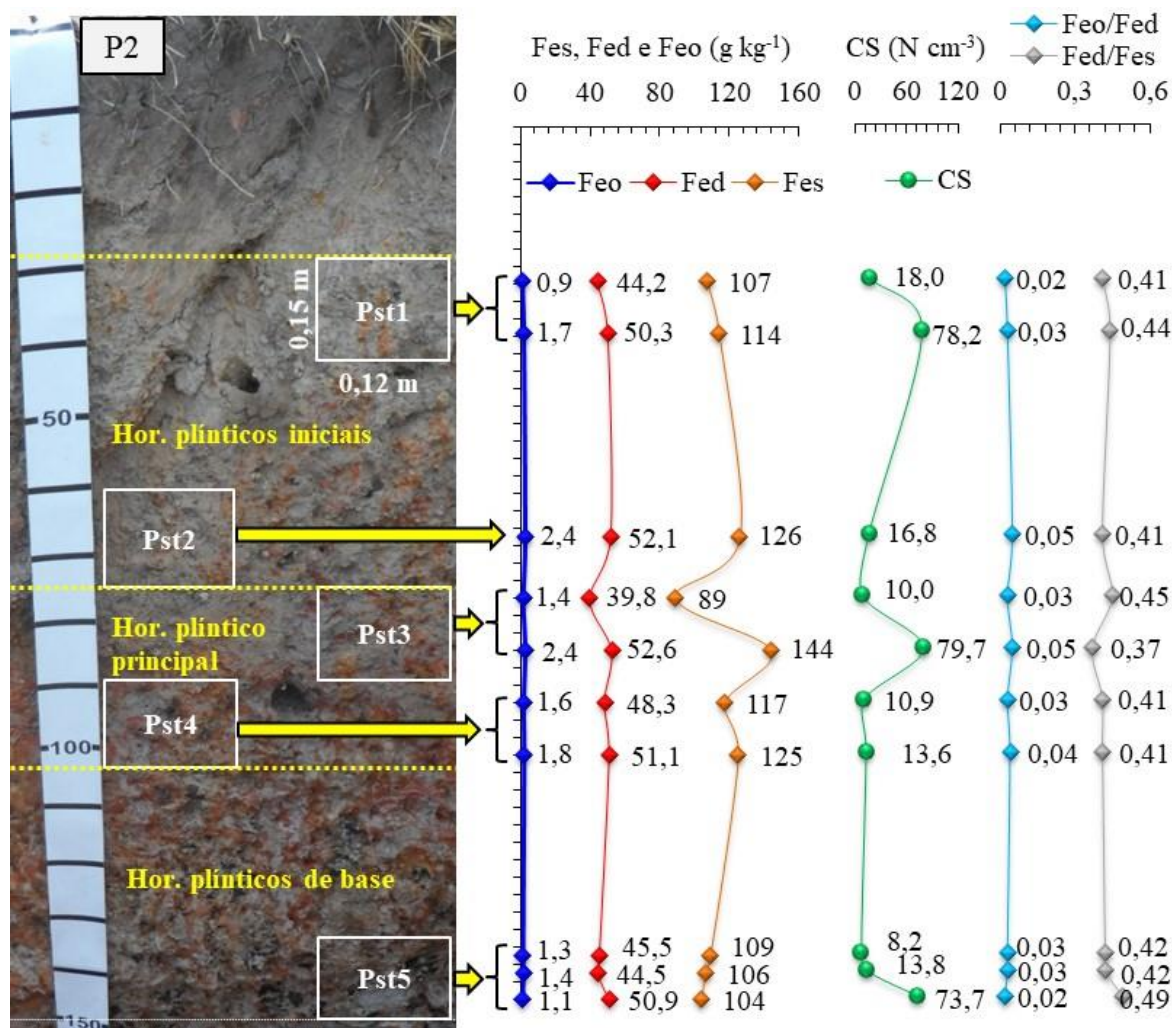


Figura 4.6. Teores de ferro (Fe) dos horizontes plínticos: inicial, principal e de base, obtidos por diferentes metodologias em amostras de plintitas após submetidas à forças de compressão (CS). Fes: ferro extraído por ataque ácido sulfúrico; Fed: ferro extraído por ditionito-citrato-bicarbonato de sódio; Feo: ferro extraído por oxalato ácido de amônio. Após realizado os testes de força de compressão por posição (Pst), alguns conjuntos de amostras não ofereceram quantidade de material suficiente para realização das análises dos teores de ferro.

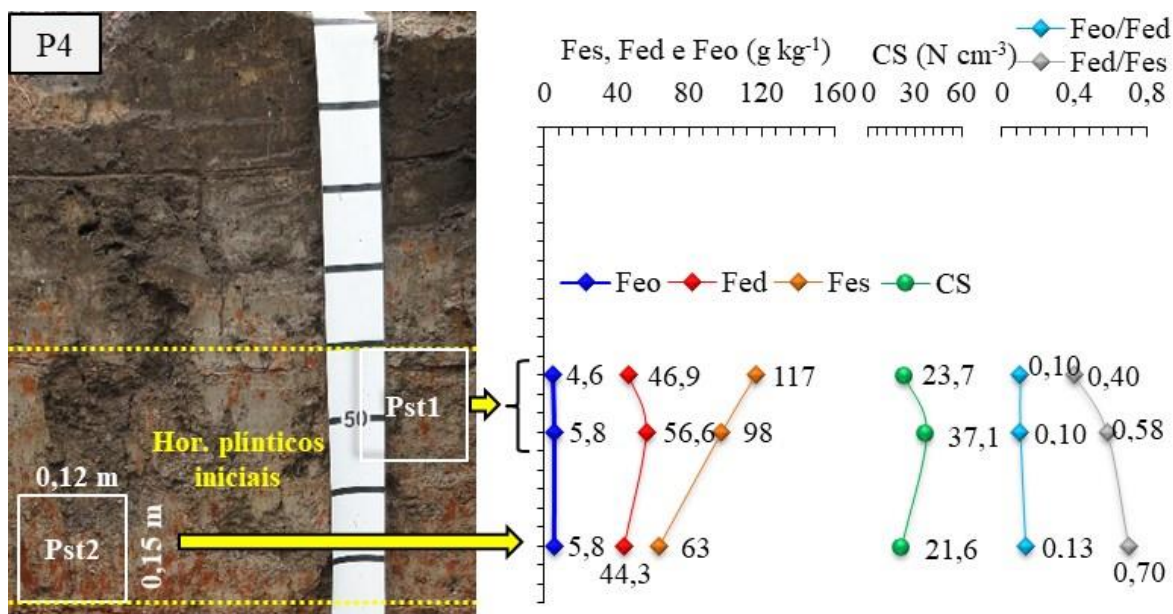


Figura 4.7. Teores de ferro (Fe) dos horizontes plínticos: inicial, principal e de base, obtidos por diferentes metodologias em amostras de plintitas após submetidas à forças de compressão (CS). Fes: ferro extraído por ataque ácido sulfúrico; Fed: ferro extraído por ditionito-citrato-bicarbonato de sódio; Feo: ferro extraído por oxalato ácido de amônio. Após realizado os testes de força de compressão por posição (Pst), alguns conjuntos de amostras não ofereceram quantidade de material suficiente para realização das análises dos teores de ferro.

4.4 DISCUSSÃO

4.4.1 Prováveis causas do endurecimento de algumas feições redoximórficas

De início é importante deixar claro que plintitas são definidas como um corpo distinto de material, que além de outras características peculiares, apresenta consistência na classe firme ou muito firme em condição úmida e dura ou muito dura em condição seca (Soil Survey Staff, 2014; IBGE, 2015; Santos et al., 2018). Conforme IBGE (2015) e Santos et al. (2018), a plintita quando em condição de campo pode ser individualizada do seu material circundante, que geralmente se trata da feição matriz, característica esta que é utilizada como um recurso para confirmação de sua identificação em campo (IBGE, 2015). Importante lembrar também que estas mesmas referências literárias mencionam, com grande ênfase, a questão da irreversibilidade deste estado de dureza, que em condição úmida se mostra com consistência branda, diferenciada, ou seja, mais endurecida que o material envolvente e que não se esboroa, ou não diminui o endurecimento quando

submersa em água. Também deixam claro que este material, ao se ter ressecamento vigoroso e prolongado, assume uma consistência dura ou muito dura que não é revertida sob novas condições de hidratação (Soil Survey Staff, 2014; IBGE, 2015; Santos et al., 2018). Via de regra, atribuem esta característica de endurecimento à presença de consideráveis quantidades de óxidos de ferro.

Há, no caso das plintitas, duas situações distintas, sendo uma o fato de a mesma se mostrar naturalmente mais endurecida que o material circundante em condição úmida e de não se desfazer ao ser introduzida em água, e outra que é quando o material é submetido à secagem acentuada ou vigorosa, mudar a consistência de forma relativamente drástica e não retornar à condição inicial após novos molhamentos, que são justamente as situações que diferenciam a plintita de outros materiais de solos.

É oportuno lembrar que muitos outros solos, principalmente argilosos, atendem perfeitamente a estas condições de consistência em amostras úmidas e secas, porém distinguem-se de plintitas justamente por terem esta consistência reversível quando submetidas a processos de molhamento acentuado. Há, portanto o efeito da presença da água, que determina diferenças na consistência natural dos solos (IBGE, 2015; Santos et al., 2018), e que também atua no caso dos solos estudados, certamente com participação mais expressiva no grande diferencial da consistência apresentado nas amostras secas, mas seguramente não é responsável pelas características de irreversibilidade apresentada em ambas as condições de umidade.

O que se buscou nesta oportunidade, foi avaliar a influência do conteúdo de ferro, das formas presentes e de suas relações e, por meio de comparação entre feições de diferentes consistências na condição úmida, estabelecer os parâmetros quantitativos, que estão determinando as diferenças de dureza atual, pressupondo-se que sejam também responsáveis pela sua manutenção, ou seja, pela sua irreversibilidade. Mosqueados de maneira geral, são locais ou ocorrências dentro da massa do solo com cores distintas, que podem acontecer por diferentes razões, com variações em tamanho e quantidade (Santos et al., 2013; IBGE, 2015). Plintitas ocorrem em solos submetidos à alternância do regime hídrico em pelo menos alguma fase de sua existência. Mosqueados e plintitas de solos com regime hídrico alternado têm cores desde amareladas a avermelhadas, variando em tonalidades e combinações de ocorrência (Soil Survey Staff, 2014; IBGE, 2015; Santos et al., 2018).

Dentre os métodos de determinação utilizados para os teores de ferro, o método químico empregando extrator de oxalato de amônio, o quantifica na forma amorfa, contabilizando geralmente óxidos não ou mal cristalizados, do tipo ferrihidrita e mesmo, ferro na forma iônica Fe^{2+} em solução (Feo); a determinação empregando extrator de ditionito-citrato-bicarbonato de sódio (DCB) quantifica o ferro nas formas livres (óxidos) (Fe^{2+}) e em estado cristalino (Fed), representadas nestes solos principalmente por hematitas e goethitas (Figura 3) junto à formas menos cristalinas; a determinação empregando como extrator o ácido sulfúrico, quantifica as formas de ferro constituintes das frações finas do solo (argila + parte do silte), nestes perfis representadas pelos tanto por óxidos quanto por argilominerais do tipo vermiculitas, VHEs e micas (illitas) (Figura 4.4), principalmente. Por fim, a determinação por FRX quantifica o total de ferro presente nas amostras (Fet), em todas as suas formas de ocorrência (Teixeira et al., 2017), incluindo-se aí, micas que no presente caso geralmente ocorrem na fração silte, conforme detectado em estudo de Moura (2015) nas proximidades do perfil P2.

4.4.2 Influência da presença, quantidade e formas de ferro no processo de endurecimento das feições redoximórficas

Observando os dados da Tabela 4.1, é possível verificar que a assertiva que associa maior dureza ou simplesmente dureza das feições plintita e petroplintitas à maiores teores de ferro encontra amplo respaldo, considerando os teores de ferro determinados por todas as análises realizadas em comparação com os teores das demais feições que não endurecem, o que é plenamente concordante com os resultados verificados por vários outros autores (Daniels et al., 1978; Martins et al., 2018; Santos et al., 2018).

Também pelos dados da Tabela 4.1, nota-se que o perfil P4 se distingue dos perfis P1 e P2 no tocante à consistência em menor grau de sua feição plintita. Cabe observar que neste perfil, a feição plintita, além de ser mais comum na parte mais superficial (Pst1 e Pst2), foi mais difícil de ser identificada no campo em relação aos demais perfis de solo, por apresentar na maior parte das vezes, a mesma consistência ou diferença muito sutil para a consistência da feição matriz (úmida) do solo circundante. Porém, após secagem, apresentou consistência na classe dura, conforme definição de plintita em IBGE (2015) e Santos et al. (2018).

Comparando-se a constituição média das plintitas da Tabela 4.1 em todos os perfis, observa-se que os valores de Fet (ferro total) são muito próximos entre si, e inclusive ligeiramente superiores no P4, ou seja, não se verifica teor de Fet inferior neste perfil em associação à condição de menor dureza (consistência) da feição plintita. Por sua vez, os teores de Fes e Fed acompanham a consistência, sendo bem menores neste perfil, enquanto seus teores de Feo têm comportamento inverso e se mostram bem mais elevados. Tais resultados, de início, mostram não haver uma relação direta dos teores de ferro em sua forma Fet com o endurecimento apresentado pela feição plintita em todos os perfis, o que é observado no caso dos valores de Fes e Fed, possibilitando estabelecer que nos casos estudados, as plintitas de maior dureza têm teores maiores de Fed e Fes. Os valores absolutos do Feo em relação aos demais, comportam-se de maneira bem distinta no perfil P4, sendo bem maiores em todas as suas feições redoximórficas.

Examinando as relações entre as formas de ocorrência do Fe, que refletem a participação proporcional de cada uma num contexto mais amplo, na Tabela 4.1 observa-se a relação Fes/Fet, que expressa a participação de Fe na forma de minerais secundários presentes no ferro total, é mais elevada na feição plintita dos perfis P1 e P2, que têm a consistência mais dura em relação à plintita do P4, o que sugere que pode ser um indicador indireto do grau de endurecimento, pelo menos em algumas situações. Resumindo, nos solos estudados, as plintitas com maiores relações Fes/Fet tendem a serem mais endurecidas.

A relação Fed/Fes se mantém com valores equivalentes nas plintitas e nos mosqueados de todos os perfis (Tabela 4.1), devendo-se considerar que estas duas feições têm em comum, a presença de cores e distinguem-se entre si pela maior dureza da plintita, fato que possibilita então, associar melhor esta relação com a capacidade das feições de desenvolverem cores, do que com seu grau de dureza. Nos solos estudados, as feições redoximórficas coloridas ou cromadas, apresentam em comum, relação Fed/Fes maior ou igual a 0,35.

A relação Feo/Fed tem comportamento bem diferenciado das demais relações, pois se mostra uniforme nas três feições avaliadas de cada perfil, ou seja, há uma constância dos valores desta relação para as três feições (matriz do solo, mosqueado e plintita), fato que a princípio a desassocia da condição de consistência apresentada por cada uma delas. Entretanto, os seus valores absolutos são relativamente pequenos nos P1 e P2, na ordem de

0,03, e bem mais elevados em P4, entre 0,09 e 0,11, ou seja, com participação do Fe amorfo entre 9% e 11% do Fed.

Cabe observar que o perfil P4 distingue-se dos demais, também pelo grande potencial de endurecimento de todas as suas feições na condição seca (Tabela 4.1). Ou seja, mosqueados que em condição úmida apresentam-se na classe de consistência friável, endurecem após secagem e passam à classe de consistência dura, e plintitas que em condição úmida apresentam-se na classe de consistência friável intermediária para firme, em sua maioria (presentes da porção superior do perfil) e com pequena diferença em relação à matriz circundante, endurecem após secagem e passam à classe dura em maioria e dura intermediária para muito dura (algumas feições da porção superior do perfil), havendo também expressivo endurecimento da feição matriz após secagem completa. Resultados semelhantes também foram constatados por Martins et al. (2018a).

Considerando que o P4 tem a feição plintita com menor teor de Fed que os demais perfis e menor grau de endurecimento ou menor dureza em condição úmida, mas que endurece de forma considerável na condição seca, ou seja, apresenta grande potencial para endurecimento posterior em condição seca, parece razoável atribuir aos fatores teor de Feo e relação Feo/Fed mais elevados a responsabilidade por este potencial de endurecimento posterior, considerando que formas amorfas de Fe são instáveis e podem se cristalizar em condição mais seca e promover aumento do endurecimento, o que está concordante com o postulado por alguns autores (Driessen & Dudal, 1989; Lal & Stewart, 1990). Em síntese, teor de Feo e relação Feo/Fed mais elevados, não se mostram diretamente relacionados à dureza atual dos materiais, mas parecem estar estreitamente associados ao potencial de endurecimento das feições em condição de secagem acentuada. Com base nos dados médios de teores de Fe nas feições redoximórficas dos perfis (Tabela 4.1), depreende-se que o maior grau de dureza das plintitas está melhor relacionado aos teores absolutos de Fe na forma secundária (Fes) e na forma oxídica (Fed).

Considerando especificamente as feições caracterizadas como plintitas, que mostraram distintos graus de consistência ou dureza medidos indiretamente em laboratório, por meio de aplicação de força de compressão (CS) e os resultados de teores de ferro determinados por diferentes métodos (Figuras 4.5, 4.6 e 4.7) é possível verificar que as amostras que requereram maior força de compressão para sua ruptura, ou seja, as de maior dureza, estão melhor associadas aos teores de Fed, embora tenham sido verificadas boas relações com teores de outras formas de determinação, fatos que por si, corroboram a

assertiva de dureza associada a maiores teores de Fe (Singh & Gilkes, 1996; Soil Survey Staff, 2014; Martins et al., 2018a).

4.4.3 Influência do grau de cristalinidade dos componentes oxídicos no endurecimento ou na estabilidade das feições redoximórficas

A relação Feo/Fed (Tabela 4.1 e Figuras 4.5, 4.6 e 4.7) expressa também indiretamente o grau de cristalinidade dos componentes oxídicos dentro das diversas feições, com base na proporção entre componentes menos cristalinos e mais cristalinos, entendendo-se como cristalinos, minerais já relativamente estabilizados e cristalizados, no caso principalmente hematitas e goethitas (Figura 4.3) e amorfos as formas mais instáveis e portanto mais facilmente alteráveis (Santos & Batista, 1996; Inda Júnior & Kämpf, 2005; Dalmolin et al., 2005; IBGE, 2015). Nesse sentido, é possível observar que para os solos localizados na planície de inundação do rio Araguaia (P1 e P2), os valores desta relação são muito baixos e praticamente constantes em todas as feições, revelando um predomínio de cerca de 97% das formas mais cristalinas em relação às amorfas, a se considerar relação Feo/Fed (Tabela 4.1) com uma média de 0,03, enquanto no P4, esta relação apresenta valores bem mais elevados, por conta dos maiores valores das formas amorfas (Feo) detectadas, com uma participação média de cerca de 11% de Feo na feição plintita (Feo/Fed = 0,11). Estes dados possibilitam entender que os solos deste último ambiente se encontram em situação de maior dinamismo ou maior atividade de seus processos de transformação (quer sejam de acumulação ou decomposição), em relação aos da planície do rio Araguaia, fato que aparentemente também contribui para a presença de uma consistência mais dura da feição plintita destes solos em relação ao P4.

Nos DRX's mostrados nas Figuras 4.3 e 4.4, é possível verificar a presença de picos significativos das formas oxídicas, hematita e goethita, sendo a goethita a forma mais expressiva e com melhor cristalinidade na feição plintita, e que se torna menos cristalina nas feições mosqueados e matriz do solo. Formas amorfas não são detectáveis por esta determinação e não aparecem nos DRX's, mas ocorrem em todas as feições em pequenas proporções, tendo sido detectadas quimicamente (Tabela 4.1 e Figuras 4.5, 4.6 e 4.7) contabilizadas na determinação de Feo, variando nas proporções de cerca de 3% (relação Feo/Fed = 0,03) dos compostos oxídicos nos perfis P1 e P2, chegando a valores próximos de 11% no P4 (relação Feo/Fed = 0,11).

Relações muito baixas de Feo/Fed nos perfis P1 e P2, da ordem de 0,03, indicam também condição de maior estabilidade das feições plintita destes solos. Valores desta ordem de grandeza foram verificados em solos de boa drenagem (Inda Júnior & Kämpf, 2005; Miguel et al., 2013), onde não se verifica nenhum tipo de endurecimento, mesmo apresentando teores totais de ferro mais elevados do que os encontrados no presente estudo. Dados desta relação elaborados para amostras de petroplintitas (perfil P3) que são feições já totalmente endurecidas ou cristalizadas e estabilizadas (Tabela 4.1) são ainda menores que os solos da planície do rio Araguaia, o que é bastante razoável considerando que se trata de material muito duro a extremamente duro e já estabilizado em ambiente seco.

Tais observações possibilitam associar as relações Feo/Fed muito baixas ($< 0,07$, em média), como indicadoras de condição de estabilidade das feições redoximórficas, enquanto relações elevadas, acima de 0,08, indicam potencial para promoção do endurecimento, ou seja, o ferro amorfo (Feo) ajuda a manter o endurecimento pré-existente e é capaz de aumentá-lo na medida que as formas amorfas se estabilizam por oxidação e se cristalizam, passando a funcionar como novos agentes ligantes.

4.4.4 Causas do endurecimento das plintitas

Nos materiais estudados, as feições que atenderam plenamente as condições de cor e dureza estabelecidas para a sua caracterização como plintita em campo, nos P1 e P2 e apresentaram teores médios de Fed superiores a 45 g kg^{-1} , associados a teores de Fes superiores a 100 g kg^{-1} , relação Fes/Fet superior a 0,70 e relação Fed/Fes superior a 0,35, independentemente do quantitativo de ferro total (Fet), do quantitativo de Feo e da relação Feo/Fed, o que possibilita entender que a presença de Fe na forma oxídica atendendo este valor mínimo quando atendidas as demais condições, parece ser o fator determinante da existência de endurecimento das feições, conforme já sugerido por vários autores (Gallaher et al., 1974; Driessen & Dudal, 1991; Singh & Gilkes, 1996; Santos & Batista, 1996; Santos et al., 2018; Martins et al., 2018a).

É possível com base nos presentes dados, sugerir ou postular que o grau de dureza atual apresentado pelas plintitas não se associa exclusivamente a um destes indicadores (quantitativos de ferro ou uma de suas relações de participação), mas sim, à uma combinação de todos ou de parte deles, incluindo tanto valores mínimos absolutos quanto

participação proporcional mínima de algumas formas, e tudo, atrelado à condição ambiental favorável, particularmente apresentando sazonalidade da água do solo. Isto pode ser mais bem entendido quando se observa que isoladamente, muitos destes fatores apontados acima são satisfeitos em outros solos e não condicionam qualquer tipo de endurecimento. Latossolos, Nitossolos e Argissolos (Santos et al., 2018), por exemplo, em boa parte das vezes apresentam teores de Fes bem superiores a 100 g kg^{-1} e não alteram a sua consistência ou não endurecem de forma irreversível (Alleoni & Camargo, 1995; Inda Jr & Kampf, 2005). Latossolos oxídicos que atendem plenamente as condições de Fes, Fed e relação Fed/Fes, também não satisfazem a condição de consistência exigida para as plintitas. Relações Feo/Fed muito baixas são comuns em solos de boa drenagem (Pereira & Anjos, 1999; Inda Jr & Kampf, 2005; Miguel, 2013), assim como relações Feo/Fed com valores muito elevados o são em solos muito intemperizados (Alleoni & Camargo, 1995), no entanto, por serem de boa drenagem, também não apresentam endurecimento irreversível.

Importante salientar, que os resultados obtidos não apontam uma cronologia ou um mecanismo claro para justificar as diferenças de concentração de ferro, que estão condicionando as diferentes durezas entre as feições. Ou seja, não indicam se as feições que em condição natural são mais duras, o são em razão de um enriquecimento de formas de ferro oxídico como consequência de acumulação ou concentração dos processos redox comuns em solos destes ambientes, como sugere a literatura especializada (Daniels et al., 1978; Soil Survey Staff, 2014; WRB, 2015; Santos et al., 2018), ou se o são, por estar havendo destruição e perdas de ferro das feições mosqueado e matriz, que perdem consistência e se tornam menos duras.

4.5 CONCLUSÕES

A maior dureza das feições plintita dos solos está diretamente relacionada ao teor de ferro oxídico contido em sua fração fina. Os óxidos de ferro são os elementos responsáveis pela promoção e manutenção do endurecimento das feições.

A presença da feição plintita, com os quesitos de dureza plenamente satisfeitos, se estabeleceu nos casos estudados com uma combinação dos seguintes fatores: condição de sazonalidade do regime hídrico; teores absolutos de Fed de pelo menos 40 g kg^{-1}

associados a uma relação Fed/Fes de pelo menos 0,35 e valores de Fes iguais ou superiores a 100 g kg⁻¹, associados a uma relação Fes/Fet de pelo menos 0,70.

Relações Feo/Fed elevadas, acima de 0,07, são indicativas de feições mais instáveis e ao mesmo tempo, com maior potencial de endurecimento após secagem.

4.6 REFERENCIAS

ALLEONI, L. R. F.; CAMARGO, O. A. Óxidos de ferro e de alumínio e a mineralogia da fração argila desferificada de Latossolos ácricos. **Scientia Agrícola**, Piracicaba, v. 52, n. 3, p. 416-421, 1995.

ANJOS, L. H. C.; FRANZMEIER, D. P.; SCHULZE, D. G. Formation of soil with plinthite on a toposequence in Maranhão State, Brazil. **Geoderma**, Amsterdam, v. 64, n. 1, p. 257-279, 1995.

BEAUVAIS, A.; COLIN, F. Formation and transformation processes of iron duricrust systems in tropical humid environment. **Chemical Geology**, Amsterdam, v. 106, n. 1, p. 77-101, 1993.

BROWN, G.; BRINDLEY, G. W. X-Ray diffraction procedures for clay mineral identification. In: BRINDLEY, G.W.; BROWN, G. (ed.). **Cristal structures of clay minerals and their x-ray identification**. Mineralogical Society, London, 1980. v. 5, Cap. 5, p. 305-360.

BUCHANAN, F. **A journey from madras through the countries of Mysore, Canara and Malabar**. 2 ed. East Indian Company, London, 1807, p. 436-560.

CARDOSO, M. R. D, MARCUZZO, F. F. N.; BARROS, J. R. Classificação climática de Köppen-Geiger para o Estado de Goiás e o Distrito Federal. **Acta Geology**, v. 8, n. 1, p. 40-55, 2014.

COELHO, M. R.; VIDAL-TORRADO, P. Caracterização e gênese de perfis plínticos desenvolvidos de arenito do grupo bauru. I – Química. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 27, n. 1, p. 483-494, 2003.

DALMOLIN, R. S. D.; GONÇALVES, C. N.; KLANT, E.; DICK, D. P. Relação entre os constituintes do solo e seu comportamento espectral. Santa Maria, **Ciência Rural**, v. 35, n. 2, p. 481-489, 2005.

DANIELS, R. B.; PERKINS, H. F.; HAJEK, B. F.; GAMBLE, E. E. Morphology of discontinuous phase plinthite and criteria for its field identification in the southeastern United States. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 42, n. 1, p. 944-949, 1978.

DONAGEMMA, G. K.; CAMPOS, V. D. B.; CALDERANO, S. B.; TEIXEIRA, W. G.; VIANA, J. H. M. **Manual de métodos de análise de solo**. 2. ed. Rio de Janeiro: Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária, 2011. 230 p.

DRIESSEN, P. M.; DUDAL, R. **Lecture notes on de geograplay formation, properties and use of the major soils of the world**. Jul. 1989. Notas de aula. Agricultural University Wageningen – Katholieke Universiteit Leuven.

DRIESSEN, P. M.; DUDAL, R. **The major soils of the world**: lecture notes on their geography, formation, properties and use. Wageningen, Leuven: Wageningen University, Katholieke Universiteit Leuven, 1991. 310 p.

GALLAHER, R. N.; PERKINS, H. F.; TAN, K. H. Classification, composition, and mineralogy of iron glaebules in a southen coastal plain soil. **Soil Science**, Baltimore, v. 117, n. 3, p. 155-164, 1974.

IBGE - Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Manual técnico de pedologia**. 3. ed. Rio de Janeiro: Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística, 2015. 430 p. (Manuais Técnicos em Geociências, n. 4).

INDA JUNIOR, A. V.; KÄMPF, N. Avaliação de procedimentos de extração dos óxidos de ferro pedogênicos com ditionitocitrato- bicarbonato de sódio. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 27, n. 6, p.1139-1147, 2003.

INDA JUNIOR, A. V; KÄMPF, N. Goethite and hematite variability via reductive dissolution in soils from tropical and subtropical regions. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 29, n. 6, p. 851-866, 2005.

JACKSON, M. L. **Soil Chemical Analysis: Advanced Course**. 2 ed. Madison: Parallel Press, 1975. 930 p.

LAL, R.; STEWART, B. A. **Soil degradation: Advances in Soil Science**. ed. New York: Springer-Verlag, 1990. 360 p.

MARTINS, A. P. B.; SANTOS, G. G.; OLIVEIRA, V. A.; MARANHÃO, D. D. C.; COLLIER, L. S. Hardening and stability of plinthic materials of the Araguaia River floodplain under different drying treatments. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 42, e0170190, 2018a.

MARTINS, A. P. B.; SANTOS, G.G.; OLIVEIRA, V.A.; MARANHÃO, D. D. C.; Collier, L. S. Reversibility of the hardening process of plinthite and petroplinthite in soils of the Araguaia river floodplain under different treatments. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 42, e0170191, 2018b.

MIGUEL, P.; DALMOLIN, R. S. D.; PEDRON, F. A.; FINK, J. R.; MOURA-BUENO, J. M. Caracterização de plinthites e petroplinthites em solos da Depressão Central do Rio Grande do Sul. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 43, n. 6, p. 999-1005, 2013.

MOMOLI, R. S.; COOPER, M. Erosão hídrica em solos cultivados e sob mata ciliar. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 51, n. 9, p.1295-1305, 2016.

MOORE, D. M.; REYNOLDS, R. C. **X-Ray Diffraction and Identification and Analysis of Clay Minerals**. 2 ed. Oxford, Oxford University Press, 1997, 400 p.

MOURA, D. B. **Caracterização de Plintossolos Argilúvicos na Planície do rio Araguaia**. 2015. 94 f. Dissertação (Mestrado em Agronomia: Solo e Água). –Escola de Agronomia, Universidade Federal de Goiás, Goiânia, 2015.

PEREIRA, M. G.; ANJOS, L. H. C. Formas extraíveis de ferro em solos do estado do Rio de Janeiro. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 23, n. 2, p. 371-382, 1999.

RADAMBRASIL. **Folha SD. 22 Goiás**: geologia, geomorfologia, pedologia, vegetação e uso potencial da terra. Rio de Janeiro: Ministério das Minas e Energia, Secretaria Geral, 1981. 640 p (Levantamento de recursos naturais, 25).

SANTOS, M. C.; BATISTA, M. A. Avaliação física, química e mineralógica em solos plínticos da região Meio-Norte do Brasil, submetidos a teste de umedecimento e secagem. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 20, n. 1. p. 21-31, 1996.

SANTOS, H. G.; JACOMINE, P. K. T.; ANJOS, L. H. C.; OLIVEIRA, V.A.; LUMBRERAS, J. F.; COELHO, M. R.; ALMEIDA, J. A.; ARAÚJO FILHO, J. C.; OLIVEIRA, J. B.; CUNHA, T. J. F. **Sistema Brasileiro de Classificação de Solos**. 5. ed. Brasília: Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária, 2018. 355 p.

SINGH, B.; GILKES, R. J. Nature and properties of iron rich glaebules and mottles from some south-west Australian soils. **Geoderma**, Amsterdam, v. 71, n. 1, p. 95-120, 1996.

SOIL SURVEY STAFF. **Keys to soil taxonomy**. 11.ed. Washington, DC, USDA-Natural Resources Conservation Service, 2010. 346 p.

SOIL SURVEY STAFF. **Keys to soil taxonomy**. 12. ed. Washington: United States Department of Agriculture, Natural Resources Conservation Service, 2014. 372 p.

TEIXEIRA, P. C.; DONAGEMA, G. K.; FONTANA, A.; TEIXEIRA, W. G. **Manual de Métodos de Análise de Solos**. 3. ed. Rio de Janeiro: Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária, 2017. 575 p.

BROWN, G.; BRINDLEY, G. W. X-Ray diffraction procedures for clay mineral identification. In: BRINDLEY, G.W.; BROWN, G. (ed.). **Cristal structures of clay minerals and their x-ray identification**. Mineralogical Society, London, 1980. v. 5, Cap. 5, p. 305-360.

VERDADE, F. D. A. C. Análise química total. In: MONIZ, A.C. (ed.) **Elementos de Pedologia**. São Paulo: Polígono, p. 209-221, 1972.

WRB. World Reference Base for Soil Resources -. International soil classification system for naming soils and creating legends for soil maps. **Food and Agriculture Organization of the United Nations**. Rome: IUSS/ISRIC/FAO, 2015. 106p.

5. MICROMORFOLOGIA, CONSTITUIÇÃO QUÍMICA E FORMAÇÃO DE PLINTITAS EM PLINTOSSOLOS DA PLANÍCIE DO RIO ARAGUAIA

RESUMO – Os solos da planície do Rio Araguaia possuem abundância em feições plinticas que podem estar em estágios de formação ou degradação. O objetivo deste trabalho foi avaliar, com base em observações micromorfológicas da feição plintita, a presença e dinâmica de compostos oxídicos e, os estágios de formação e/ou degradação dessas feições nos solos. As feições redoximórficas, especialmente a plintita, foram avaliadas pela descrição de campo, micromorfologia, constituição química e mineralógica. Foram coletadas amostras em diversas posições nos perfis e procedido os métodos de cada análise específica. As feições plintitas presentes nos solos estudados não se formaram como consequência da acumulação de ferro proveniente de segregação da matriz, mas se tratam de resíduos ainda não decompostos do material terroso depositado nas planícies. As acumulações de ferro identificadas nestas feições pelo estudo micromorfológico são provavelmente formadas em tempos anteriores, imediatamente após a liberação do ferro das estruturas silicatadas e em condição distinta de umidade que possibilitaram a sua recombinação na forma de óxidos.

Palavras-chave: micropedologia, plintita, processos redox.

ABSTRACT - The soils of the Araguaia River plain have abundance in plural features that may be in stages of formation or degradation. The objective of this work was to evaluate, based on observations of the macro and micromorphology of the plintite feature, to the presence and dynamics of oxidic compounds, the stages of formation and / or degradation of these features in the soil. Redoxymorphic features, especially plinthite, were evaluated by field description, micromorphology, chemical and mineralogical makeup. Samples were collected at different positions in the profiles and the methods of each specific analysis were carried out. The plinthite features present in the studied soils were not formed as a consequence of the accumulation of iron from segregation of the matrix, but they are waste that have not yet weathered from the earthy material deposited on the plains. The accumulations of iron identified in these features by the micromorphological study are probably formed in earlier times, immediately after the release of iron from silicate structures and in a distinct moisture condition that allowed its recombination in the form of oxides.

Keywords: micropedology, plintite, redox processes.

5.1 INTRODUÇÃO

A plintita é uma feição redoximórfica constituída da mistura de argila, rica em ferro, ou ferro e alumínio, pobre em carbono orgânico, com grãos de quartzo e outros minerais que ocorre sob a forma de mosqueados vermelhos, vermelho-amarelados e vermelho-escuros (Soil Survey Staff, 2014; Santos et al., 2018). Segundo estes autores, a gênese dessas feições ocorre em ambiente úmido pela segregação de ferro, importando em mobilização, transporte e concentração final dos compostos de ferro no perfil do solo (Osher & Buol, 1998; Anjos et al., 2007).

Morfológicamente, a plintita possui diâmetro maior que 2 mm, podendo ser separada da matriz do solo e ocorrer sob as formas laminares, nodulares, esferoidais ou irregulares (Daniels et al., 1978). Plintitas são feições redoximórficas de coloração avermelhada, definidas como corpo distinto de material, que além de outras características peculiares, apresentam consistência na classe firme ou muito firme em condição úmida e dura ou muito dura em condição seca e quando em condição de campo pode ser individualizada do seu material circundante, que geralmente se trata da feição matriz (Soil Survey Staff, 2014; IBGE, 2015; Santos et al., 2018), o que é utilizado como um recurso para confirmação de sua identificação em campo (IBGE, 2015).

Em relação a aspectos micromorfológicos, Tardy et al. (1993) e Beauvais & Colin, (1993) sugerem que a plintita (nódulos) se encontra em estágio de degradação, ao constatarem nódulos irregulares e fracamente impregnados com cores amareladas e halos de alteração. Conforme descrito em Thomas (1994) e Tucker et al. (1994), nódulos em estágio de degradação são estáveis e relictuais, possuindo limites nítidos, podendo terem sido formados em ambientes mais secos que o atual. Além dessas condições, as temperaturas mais elevadas, altos conteúdos de oxigênio e atividade biológica em condições de lençol freático suspenso temporário anual, também podem acelerar o processo de degradação de nódulos por epissaturação (Vepraskas & Lindbo, 2012). Estes autores apontam que os halos de degradação formados nos nódulos ocorrem em função da dissolução da hematita, condicionando a formação de nódulos contemporâneos, devido ao processo de remobilização do ferro em zonas oxidadas.

Concomitantemente a isso, ocorrem nódulos fortemente impregnados com mudança abrupta da superfície do nódulo junto a matriz, o que leva a crer que os nódulos não estão sendo degradados (Wilson et al., 2013). Contudo, em estudos de caracterização de

Plintossolos da planície do Rio Araguaia-GO, Moura (2015) observa que o processo de plintização tem ocorrido na base dos perfis, enquanto a sua degradação ocorre por depleção nos horizontes superiores.

A principal hipótese deste estudo consiste em que as feições redoximórficas de Plintossolos das planícies do Rio Araguaia estão sendo formadas e degradadas simultaneamente em condições atuais, condicionadas principalmente pelos ciclos de redução e oxidação causados pela inundação natural e antropizada nestas áreas.

O objetivo deste trabalho foi avaliar, com base em observações micromorfológicas da feição plintita, em contrapartida à presença e dinâmica de compostos oxídicos presentes nas mesmas, os estágios de formação e/ou degradação dessas feições nos solos.

5.2 MATERIAL E MÉTODOS

5.2.1 Os solos

O estudo foi realizado em dois perfis de solos da planície do Rio Araguaia, distrito de Luiz Alves, município de São Miguel do Araguaia, estado de Goiás (Figura 5.1), sob as coordenadas geográficas 13°14'38,17"S e 50°33'16,97" W, altitude de 218 m (perfil P1) e 13°12'17,75"S, 50°31'28,61"W, altitude de 216 m (perfil P2). O clima da região é Aw conforme classificação de Köppen-Geiger e é definido como tropical com estação seca no inverno, precipitação pluvial anual média entre 1800 e 2000 mm e temperatura média anual variando de 25 a 26 °C. Os perfis de solo estudados foram selecionados, classificados e caracterizados rotineiramente no trabalho de Martins et al. (2018). Têm como material de origem sedimentos aluvio-coluvionares da cobertura sedimentar do bananal e ocorrem em condição de relevo plano (RadamBrasil, 1981).

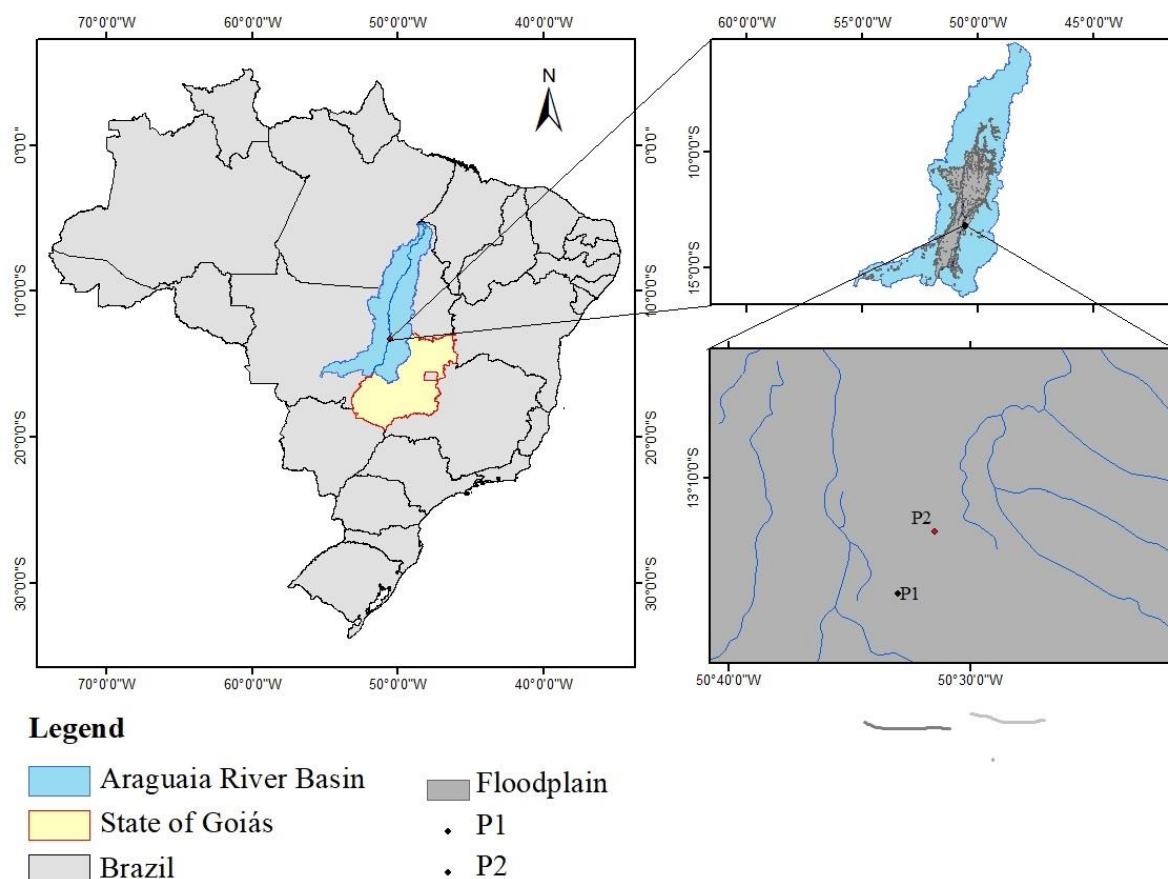


Figura 5.1. Localização dos perfis de solo na planície do Rio Araguaia, Goiás, Brasil.

5.2.2 Micromorfologia do solo

Para a realização dos estudos de micromorfologia foram adotados os procedimentos descritos em Castro et al. (2003) e Castro & Cooper (2019). Coletaram-se amostras indeformadas e orientadas de todos os horizontes e das transições entre eles, com auxílio de caixas de papel cartão branco de dimensões de 9x13x4 cm (largura, comprimento, altura). No P1, foi coletado um total de nove amostras, conforme a seguir: horizontes A, A/E, E, E/Btf1-Btf2, Btf1-Btf2, Btf1-Btf2/Btf3-Btf4, Btf3-Btf4, Btf3-Btf4/Btf5-Btf6 e Btf5-Btf6 e, no P2, um total de oito amostras conforme segue: horizontes A, A/AE, AE/E, E, E/Btf1-Btf2, Btf1-Btf2, Btf1-Btf2/Btf3-Btf4 e Btf3-Btf4 (Figura 5.2).

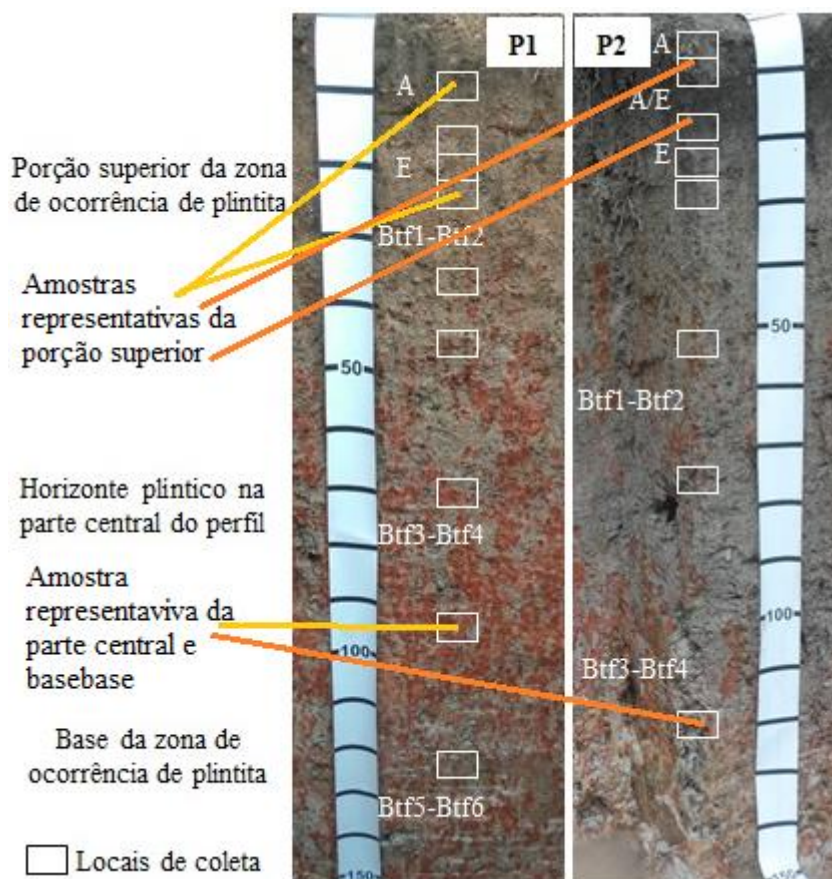


Figura 5.2. Esquema de coleta de amostras indeformadas para micromorfologia do solo nos perfis P1 e P2. Os detalhes apontam os locais de amostragem que representam a porção superior e base dos perfis.

Após as coletas as amostras foram secas durante 20 dias ao ar em temperatura ambiente, e em seguida, foram acondicionadas em estufa a 40 °C permanecendo por sete dias (Murphy, 1986), e por fim, as amostras foram colocadas em formas de plástico e dispostas em dessecador conectado a uma bomba pneumática, concluindo-se em três etapas de secagem de todas as amostras. As amostras foram impregnadas com uma mistura de reagentes nas seguintes proporções: um litro de resina poliéster arazim 1.0 mesh 00; um litro de monômero de estireno; cinco gramas de pigmento fluorescente tinopal OB e por fim, 18 gotas de catalizador butanox para a polimerização do poliéster final, sendo dissolvido com bastão de vidro em um béquer. Após a ascensão capilar e a polimerização, os blocos foram cortados, colados às lâminas de vidro próprias de tamanho médio (5 x 7 cm), fatiados, desbastados e polidos até cerca de 25 µm de espessura, para confecção das lâminas delgadas, conforme descrito em Castro (1985).

Todas as lâminas foram analisadas com emprego de lupa e microscópio polarizador da marca Zeiss®, modelo stemi V6, com câmera digital acoplada (Sony®, modelo DFW-

X700) e para o processamento de imagens, utilizou-se o sistema Visilog 5.4 Noesis 2001, do tipo usado em Petrografia. Após as análises das lâminas, descrição e fotografias de todas as feições redoximórficas (principalmente plintita) (Figura 5.3), constataram-se que as lâminas que pertenciam o horizonte A (0-0,17 m) e transição E/Btf1 (0,17-0,33 m) responderiam as mesmas informações da porção superior de P1 enquanto o horizonte de transição Btf4/Btf5 (0,65-1,10 m) representava as informações de toda a parte da porção central e base deste perfil, conferindo apenas três lâminas representativas do P1. De forma similar, no P2, os horizontes transicionais representativos da porção superior são: transição A/AE (0-0,18 m) e AE/E (0,18-0,29 m) enquanto o horizonte representativo da parte central e base deste perfil é Btf3/Btf4 (0,75-1,50 m). As demais lâminas foram descartadas.

A interpretação das imagens e as descrições micromorfológicas foram feitas seguindo os critérios estabelecidos por Bullock et al. (1985), sendo complementadas por Stoops (2003) e adaptados segundo Castro et al. (2003), com ênfase nas feições redoximórficas. As tabelas foram confeccionadas utilizando o programa Microsoft Excel 2010.

5.2.3 Constituição química e mineralógica das feições redoximórficas

5.2.3.1 Amostragem

Amostras das diferentes feições redoximórficas ocorrentes nos perfis foram coletadas dentro da zona de ocorrência de plintitas ("zona plíntica") conforme o esquema da Figura 5.3, objetivando avaliar, através de variações de seus teores, possíveis tendências de movimentação ou de eventuais locais de acumulação, em razão da atuação de processos de oxirredução.

No horizonte plíntico superior e no horizonte principal coletaram-se feições em duas posições: posição superior direito (Pst1 e Pst3) posição inferior esquerdo (Pst 2 e Pst 4). Por fim, no horizonte da base coletou-se apenas na posição 5 (Pst 5) (Figura 5.3).

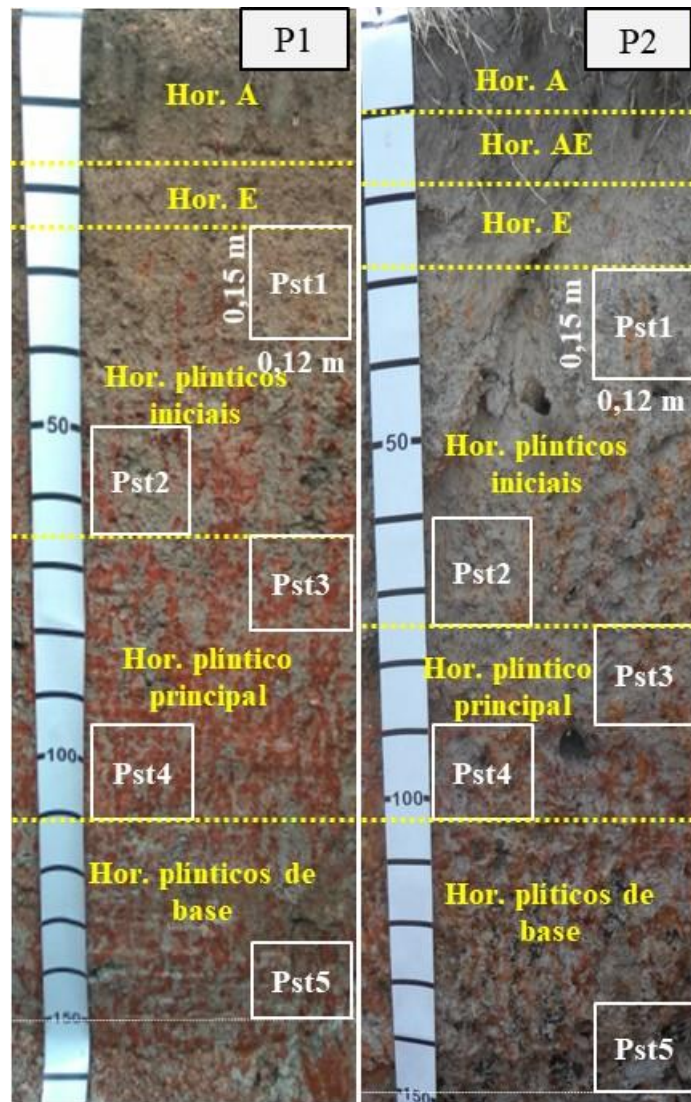


Figura 5.3. Esquema de coleta das amostras de feições redoximórficas para análise química (Posições “Pst1, Pst2, Pst3, Pst4 e Pst5”) e mineralogia Pst3 e Pst4.

Separaram-se manualmente as feições matriz (Figura 5.4A), mosqueado (Figura 5.4B) e plintita (Figura 5.4C) considerando os critérios clássicos para este fim (cor e consistência) recomendados pelos manuais técnicos (IBGE, 2015; Santos et al., 2018) para cada um das posições.



Figura 5.4. Feições redoximórficas de Plintossolos da planície do rio Araguaia. A: matriz do solo; B: mosqueado; C: plintita.

5.2.3.2 Testes de força de compressão

Em todas as amostras de plintita sob condições naturais (condições de campo), de ocorrência individualizada ou apenas fragmentos, foram feitos testes de dureza com base em aplicação de força de compressão, utilizando-se o equipamento universal de testes mecânicos (Instron®, modelo 3367, Grove City, Estados Unidos). Para cada amostra foi registrada a força máxima aplicada, expressa em Newton (N), quando o equipamento comprimia ou quebrava pelo menos 40% da altura inicial do material (amostra). Depois de realizadas todas as separações de interesse da feição plintita, os grupos separados, bem as amostras de mosqueados e matriz de cada posição, foram trituradas e homogeneizadas em almofariz de ágata, e em seguida, utilizadas para as diversas determinações químicas.

5.2.3.3 Análise por ataque ácido sulfúrico (Fes)

As amostras foram preparadas para extração com ácido sulfúrico objetivando identificar e quantificar os elementos macroconstituintes da fração fina dos solos (argila + parte do silte), principalmente silício (Si), alumínio (Al) e ferro (Fe), livres ou presentes na estrutura de minerais secundários (Verdade, 1972). Para esta determinação, as amostras foram solubilizadas com ácido sulfúrico (H_2SO_4) na proporção de 1:1 conforme Teixeira et al. (2017).

5.2.3.4 Análise por ditionito-citrato-bicarbonato de sódio (Fed) e oxalato ácido de amônio (Feo)

As amostras foram preparadas para extração do elemento Fe por ditionito-citrato-bicarbonato de sódio (Fed) e pelo oxalato ácido de amônio (Feo), procedendo-se as análises seguindo o método de Teixeira et al. (2017).

5.2.3.5 Análise por difração de raios-X

A mineralogia da fração argila nas diferentes feições do solo nas posições (Pst 3 e Pst 4) de ambos os perfis, foi determinada por difração de raios-X (DRX) usando um

difratômetro Shimadzu XRD 6000 operado com Cu K α a 40 kV e 30 mA e um monocromador de grafite. A fração argila foi analisada na forma de amostras de pó, registradas na faixa de 3 a 70° (2 θ) e em amostras pré-tratadas e desferrificadas usando a solução de DCB (Jackson, 1975). Foram realizados tratamentos de saturação usando potássio (K) e magnésio (Mg) na forma de microagregados orientados de argila (Jackson, 1975) a uma velocidade de 0,7° min (2 θ) e dentro de uma faixa de 3 a 35° (2 θ). As amostras saturadas com K (KCl 1 mol L⁻¹) foram submetidas a tratamentos térmicos sucessivos (25, 350 e 550 °C), e as amostras saturadas com Mg (MgCl₂ 1 mol L⁻¹) foram analisadas à temperatura ambiente, solvatadas com glicerol e depois analisadas a uma velocidade de 0,7° min (2 θ) dentro de uma faixa de 3 a 15° (2 θ).

Os critérios utilizados para interpretação dos DRX e identificação dos minerais presentes na fração argila foram baseados no espaçamento interplanar (d) e no comportamento do pico de difração em relação a saturação e tratamentos térmicos utilizados, conforme apresentado em Jackson (1975), Brown & Brindley (1980) e Moore & Reynolds (1997) e comportamento frente aos tratamentos.

4.2.4 Análise estatística

O erro padrão das médias presentes nas tabelas foi obtido dividindo-se o desvio padrão da amostra pela raiz quadrada do número de observações de cada feição redoximórfica. Os gráficos, tabelas e seus respectivos erros padrões, assim como as barras de erros com porcentagem (5% de significância) foram confeccionados utilizando o programa Microsoft Excel 2010.

5.3 RESULTADOS

5.3.1 Análise granulométrica

A análise granulométrica (textura) elaborada para os diversos horizontes dos solos encontra-se na Tabela 5.1. Por ela observam-se solos com muito pequeno gradiente textural, revelando pouca ou nenhuma movimentação de argila pelo clássico processo de argiluviação entre os diversos horizontes e também entre os horizontes que apresentam plintita.

Tabela 5.1. Distribuição granulométrica e classe textural dos solos.

Horizontes	Prof. m	AG	AF	Silte	Argila	CT ⁽²⁾	Cc g kg ⁻¹ 20-2 mm
Perfil 1 - PLINTOSSOLO ARGILÚVICO Distrófico típico (Santos et al., 2013)/Plinthosol (WRB, 2015)							
A	0,00-0,17	144	243	202	411	A	18
E	0,17-0,24	111	262	176	451	A	38
Btf1	0,24-0,33	104	244	181	471	A	84
Btf2	0,33-0,45	135	195	198	472	A	123
Btf3	0,45-0,65	115	218	236	431	A	98
Btf4	0,65-0,95	121	195	233	451	A	49
Btf5	0,95-1,10	142	154	232	472	A	72
Btf6	1,10-1,50 ⁺	109	121	256	514	A	44
Perfil 2 - PLINTOSSOLO ARGILÚVICO Distrófico típico (Santos et al., 2013)/Plinthosol (WRB, 2015)							
A	0,00-0,10	162	168	321	349	FAG	6
AE	0,10-0,18	174	162	295	369	FAG	33
E	0,18-0,29	137	230	223	410	A	110
Btf1	0,29-0,50	111	201	216	472	A	99
Btf2	0,50-0,75	129	211	189	471	A	151
Btf3	0,75-1,04	141	203	185	471	A	152
Btf4	1,04-1,50	117	176	236	471	A	101

AG: areia grossa; AF: areia fina; CT: classe textural; A: argila; FAR: francoarenosa; FAG: francoargilosa; F: franca; FAA: franco-argiloarenosa; AA: argiloarenosa; Cc: cascalhos. Tabela extraída de Martins et al. (2018).

5.3.2 Micromorfologia de feições redoximórficas

As descrições da micromorfologia elaborada em amostras representativas de horizontes de interesse dos solos estudados constam na Tabela 5.2. De modo geral, ambos apresentam características micromorfológicas similares no que diz respeito à distribuição, formação e degradação de nódulos.

Tabela 5.2. Descrição micromorfológica de amostras de horizontes representativos que apresentam feições redoximórficas de Plintossolos da planície do Rio Araguaia.

Perfil 1 - PLINTOSSOLO ARGILÚVICO Distrófico típico (Santos et al., 2013)/Plinthosol (WRB, 2015)					
Hor.	DR (G/F)	ME	MG	Fábrica-b	Feições pedológicas
A (0-0,17 m)	Porfírica/ gefúrica	Grãos com pontes e películas, alta pedalidade.	Quartzo de moderadamen te a bem selecionado.	Não detectado na lâmina	Nódulos típicos em processo de degradação por epissaturação, frequência de 15 a 30% na lâmina, forma irregular, limite nítido e grau de impregnação puro.
E/Btf1 (0,17-0,33 m)	Porfírica	Grãos com pontes e películas, alta pedalidade.	Quartzo de moderadamen te a bem selecionado.	Não detectado na lâmina	Nódulos típicos em processo de desprendimento e redução de tamanho do nódulo original, frequência de 15 a 30% na lâmina, forma irregular, limite nítido e grau de impregnação puro a moderadamente impregnado.

Tabela 5.2. Continuação.

Hor.	DR (G/F)	ME	MG	Fábrica-b	Feições pedológicas
Btf4/Btf5 (0,65-1,10 m)	Gefúrica	Blocos subangulares, alta pedalidade e parcialmente acomodado.	Quartzo moderadamente selecionado	Paralela e poroestriada	Acúmulo de ferro, mosqueados, formação de núcleos e posterior formação de nódulos bem desenvolvidos por endossaturação com frequência em área na lâmina superior a 70%, forma irregular, limite nítidos e difusos com moderado grau de impregnação. Presença de revestimentos de argiluviação com orientação/extinção forte estriada e contínua associada aos poros.
Perfil 2 - PLINTOSSOLO ARGILÚVICO Distrófico típico (Santos et al., 2013)/Plinthosol (WRB, 2015)					
A/AE (0-0,18 m)	Porfírica/gefúrica	Blocos subangulares, alta pedalidade e parcialmente acomodado.	Quartzo moderadamente selecionado e subarredondado	Não detectado na lâmina	Nódulos típicos raros e quartzo ferruginizado relictual com canais e câmaras, frequência na lâmina menor que 5%, forma irregular, com limite nítido e grau de impregnação puro.
AE/E (0,18-0,29 m)	Porfírica/gefúrica	Grãos com pontes e blocos subangulares, alta pedalidade e parcialmente acomodado.	Quartzo bem selecionado e subarredondado	Não detectado na lâmina	Nódulos com halo muito aderente e depleção de ferro com canais e câmaras, frequência na lâmina de 5 a 15%, forma irregular, com limite nítido do nódulo e halo difuso e grau de impregnação puro a fortemente impregnado
Btf3/Btf4 (0,75 1,50 m)	Gefúrica	Blocos subangulares, alta pedalidade e parcialmente acomodado.	Quartzo moderadamente selecionado e subarredondado	Paralela e poroestriada	Acúmulo de ferro, mosqueados, formação de núcleos, individualização de nódulos com frequência comum de 30 a 50% na lâmina, forma irregular e moderadamente impregnado.

Hor: Horizontes; DR: Distribuição relativa; G/F: Relação da fração grossa e fina; ME: Microestrutura; MG: Material grosso (quartzo); Fábrica-b: fábrica birrefringente.

Nas Figuras 5.5 e 5.6 são apresentadas micrografias das lâminas representativas dos perfis amostradas de forma normal e com nicóis cruzados. Por elas é possível observar as diferentes feições em diferentes estágios de formação nas posições de interesse dentro de cada perfil. Em ambos são constatadas áreas de acumulação de ferro ou de formação de núcleos, considerados processo da formação de plintitas, enquanto alguns revestimentos descontínuos de argila (argiluviação) são mostrados em amostra do P1.

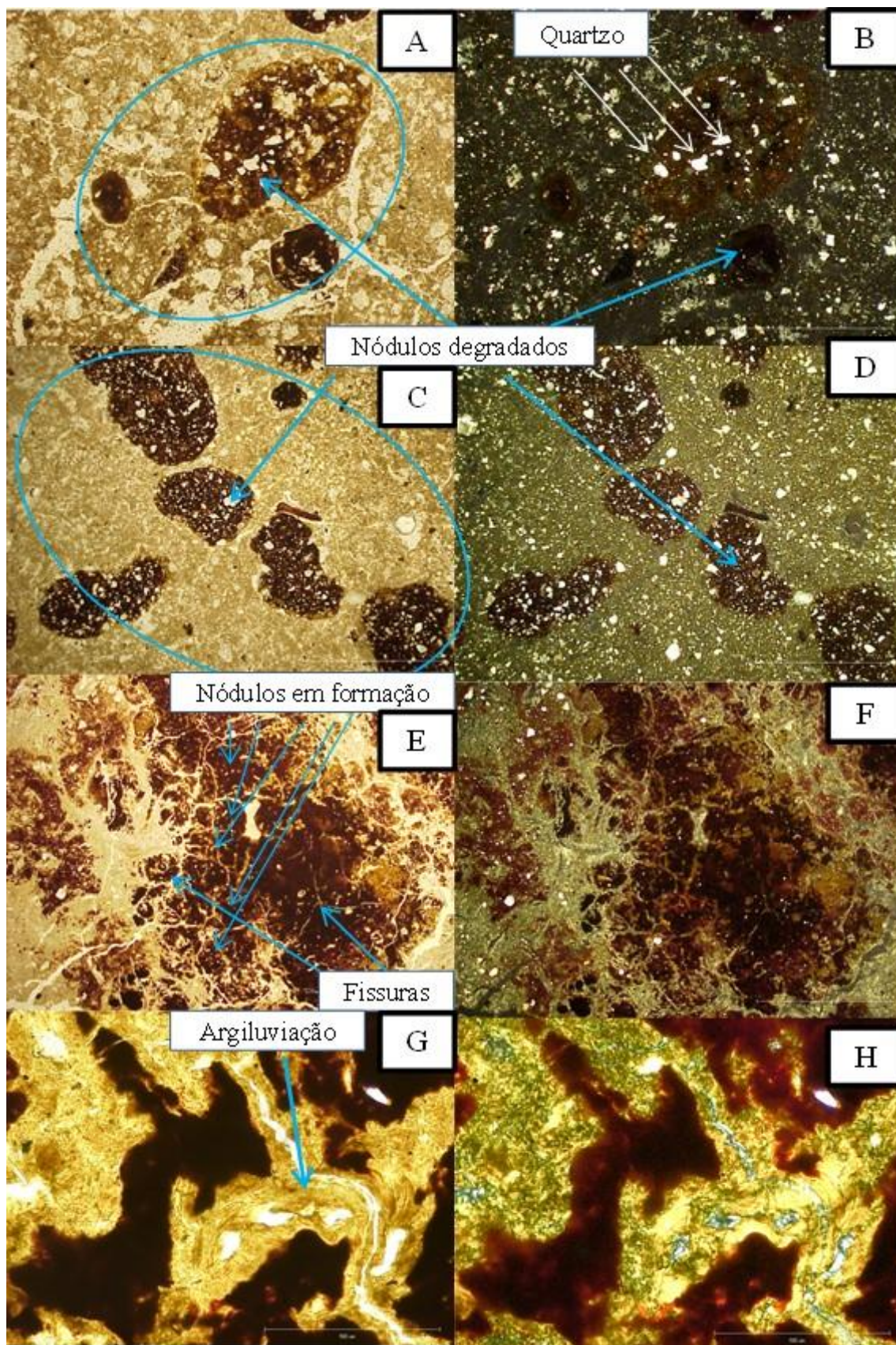


Figura 5.5. Micrografias de horizontes superficiais e subsuperficiais do perfil 1.
A=Desprendimento do nódulo por epissaturação do horizonte A (25x).

B=Micrografia anterior com nicóis cruzados, com detalhe de quartzo.
C=Geometria de um nódulo alongado que deu origem a nódulos menores por degradação pela epissaturação do horizonte de transição E/Btf1 (8x).
D=Micrografia anterior com nicóis cruzados. E=Formação de núcleos e origem da plintita do horizonte transicional Btf4/Btf5 (8x). F=Micrografia anterior com nicóis cruzados. G=Detalhe do horizonte de transição Btf4/Btf5 com argiluviação (100x). H=Micrografia anterior com nicóis cruzados.

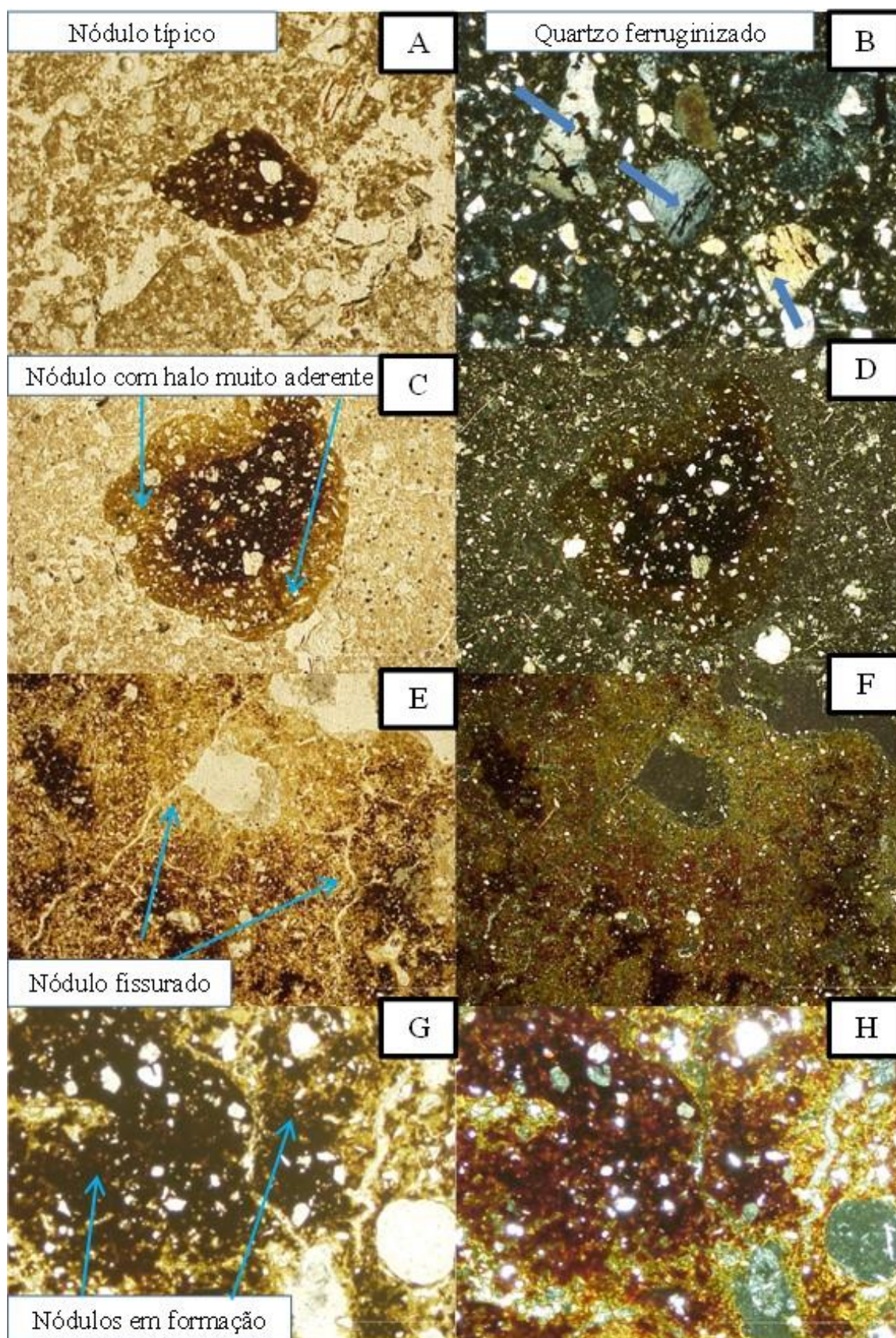


Figura 5.6. Micrografias de horizontes superficiais e subsuperficiais do perfil 2. A=Nódulo típico do horizonte de transição A/AE (25x). B=Grãos de quartzo

ferruginizado com ferro relictual no horizonte de transição A/AE (25x), com nicóis cruzados. C=Depleção de ferro do nódulo com halo muito aderente do horizonte de transição AE/E (20x). D=Micrografia anterior com nicóis cruzados. E=Nódulo argiloso fissurado no horizonte Btf1/Btf2 (16x). F=Micrografia anterior com nicóis cruzados. G=Formação de núcleos e posterior origem de plintita do horizonte Btf3/Btf4 (25x). H=Micrografia anterior com nicóis cruzados.

5.3.3 Determinações analíticas das formas de ferro

Na Tabela 5.3, constam teores médios do elemento ferro, determinados na forma de óxidos de alta e baixa cristalinidade, bem como a relação de proporcionalidade entre eles. Observa-se por ela que os valores de ferro são sempre mais elevados na feição plintita que nas demais, porém a relação Feo/Fed, que mostra a participação do ferro amorfo no total, é uniforme em todas.

Tabela 5.3 Teores médios de ferro das feições redoximórficas determinados por ditionito-citrato-bicarbonato de sódio (Fed) e oxalato ácido de amônio (Feo) e suas relações.

Feições	Fes	Fed	Feo	Fed/Fes	Feo/Fed
	(g kg ⁻¹)			-	-
Perfil 1 - PLINTOSSOLO ARGILÚVICO Distrófico típico (Santos et al., 2018) / Plinthosol (WRB, 2015)					
Matriz	40,60±1,44	9,44±1,31	0,30±0,04	0,23	0,03
Mosqueado	63,00±4,00	23,37±1,59	0,58±0,09	0,37	0,02
Plintita	141,67±7,90	50,14±1,07	1,61±0,15	0,35	0,03
Perfil 2 - PLINTOSSOLO ARGILÚVICO Distrófico típico (Santos et al., 2018) / Plinthosol (WRB, 2015)					
Matriz	38,20±3,72	10,05±1,93	0,26±0,04	0,26	0,03
Mosqueado	62,00±3,00	24,00±2,00	0,44±0,01	0,39	0,02
Plintita	112,45±4,99	47,21±1,32	1,56±0,14	0,42	0,03

Na Figura 5.7, estão os valores médios do elemento ferro extraídos por diferentes métodos nas feições redoximórficas dos perfis estudados. Os teores de ferro em todas as formas de determinações são sempre maiores na plintita em relação às demais feições redoximórficas.

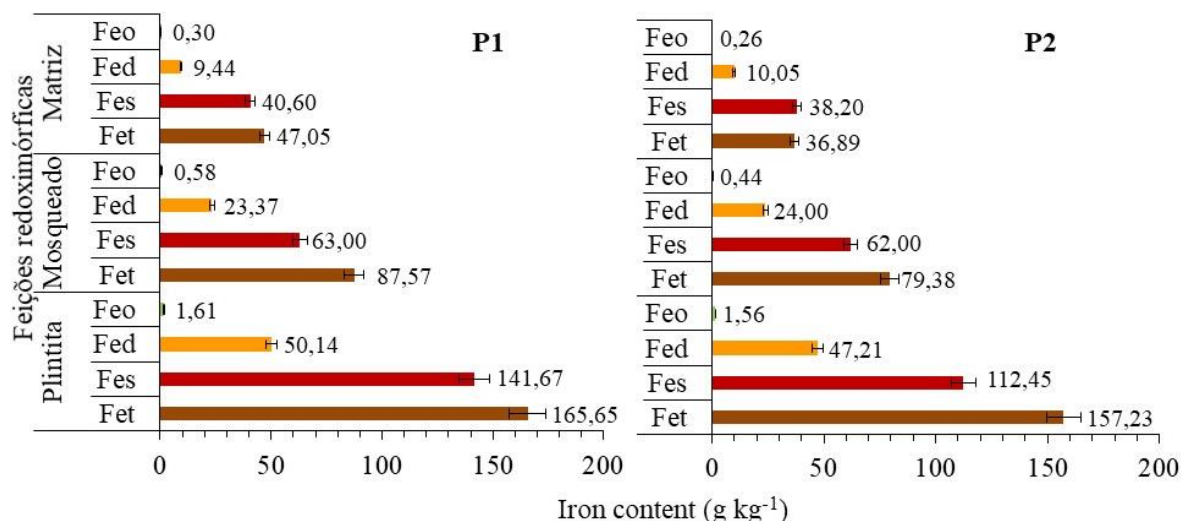


Figura 5.7. Valores médios do elemento ferro extraídos por diferentes métodos nas feições redoximórficas dos perfis estudados. Fet: fluorescência de raios-X; Fes: ataque ácido sulfúrico; Fed: ditionito-citrato-bicarbonato de sódio; Feo: oxalato ácido de amônio. As barras de erros referem-se à variabilidade amostral em porcentagem (5% de significância).

Na Figura 5.8 constam os percentuais de participação das diferentes formas de ferro, no conteúdo total de ferro de cada uma das diferentes feições redoximórficas.

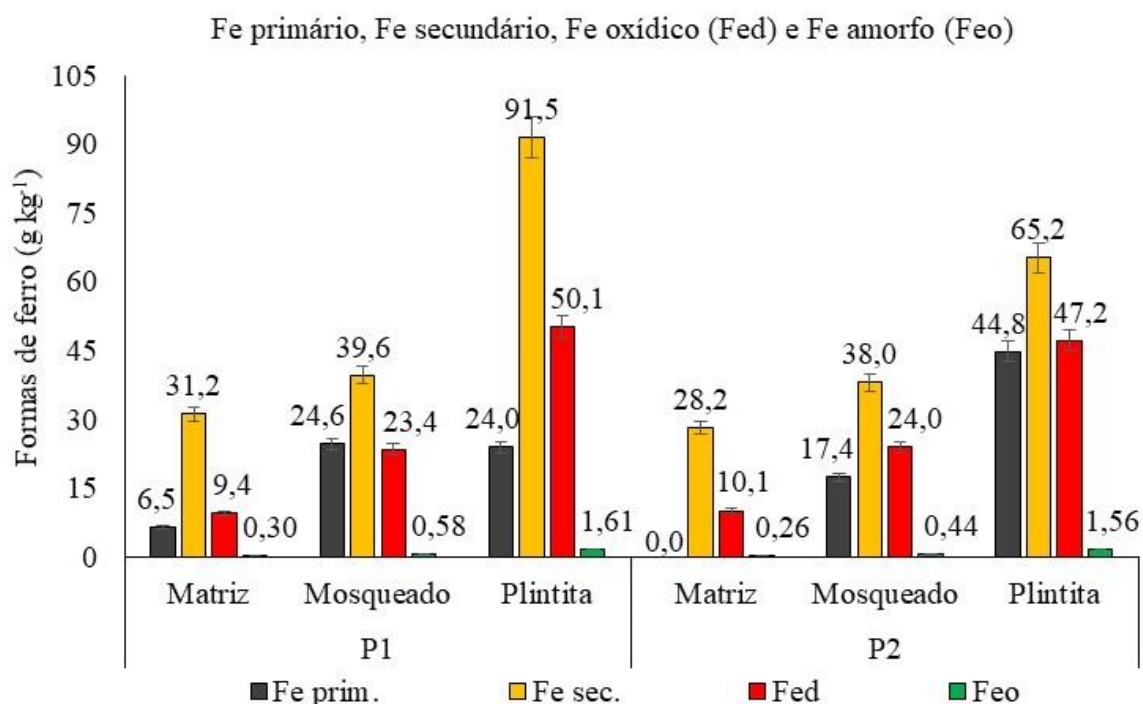


Figura 5.8. Valores médios das formas de ferro extraídas das feições matriz do solo, mosqueado e plintita. Fe prim.: ferro primário (Fet-Fes); Fe sec.: ferro secundário (Fes-Fed); Fed: ferro extraído por ditionito-citrato-bicarbonato de sódio (DCB); e Feo: ferro extraído por oxalato ácido de amônio, em g kg⁻¹.

As barras de erros referem-se à variabilidade amostral em porcentagem (5% de significância).

Na Tabela 5.4 estão apresentados os teores de ferro determinados na feição plintita, por diferentes métodos e relação entre alguns deles, bem como o grau de dureza detectado nas amostras através de testes de compressão.

Tabela 5.4. Teores de ferro⁽¹⁾ obtidos em conjuntos de amostras de plintita após separadas por dureza medida por testes de compressão (CS) nas diferentes posições de cada perfil de solo.

Posição de avaliação (Pst) ⁽²⁾	CS N cm ⁻³	Fet g kg ⁻¹	Fes g kg ⁻¹	Fed g kg ⁻¹	Feo g kg ⁻¹	Feo/Fed -
P1-PLINTOSSOLO ARGILÚVICO Distrófico típico (Santos et al., 2018) / Plinthosol (WRB, 2015)						
Pst1	27,49	184,60	132	51,8	1,66	0,03
Pst1	15,98	198,67	134	51,3	1,44	0,03
Pst1	65,10	n.a	189	52,3	2,03	0,04
Pst2	24,21	172,29	126	50,1	1,27	0,03
Pst2	60,00	n.a	153	55,8	2,52	0,05
Pst3	16,09	137,80	129	49,3	1,23	0,02
Pst4	11,69	151,67	123	45,9	1,13	0,02
Pst5	15,86	148,86	120	45,5	1,31	0,03
Pst5	58,00	n.a	169	49,3	1,92	0,04
Erro padrão (±)	7,28	9,57	7,90	1,07	0,15	0,003
P2-PLINTOSSOLO ARGILÚVICO Distrófico típico (Santos et al., 2018) / Plinthosol (WRB, 2015)						
Pst1	18,04	144,19	107	44,2	0,90	0,02
Pst1	78,17	n.a	114	50,3	1,66	0,03
Pst2	16,8	165,18	126	52,1	2,42	0,05
Pst3	10,00	171,44	89	39,8	1,36	0,03
Pst3	79,69	120,56	144	52,6	2,42	0,05
Pst4	10,90	n.a	117	48,3	1,56	0,03
Pst4	13,62	174,03	125	51,1	1,83	0,04
Pst5	8,17	158,34	109	45,5	1,29	0,03
Pst5	13,83	172,22	106	44,5	1,42	0,03
Pst5	116,26	151,88	n.a	48,6	1,59	0,03
Pst5	73,72	n.a	104	50,9	1,07	0,02
Erro padrão (±)	11,73	6,43	4,76	1,21	0,15	0,03

(1) Fes: ferro extraído por ataque ácido sulfúrico; Fed: ferro extraído por ditionito-citrato-bicarbonato de sódio; Feo: ferro extraído por oxalato ácido de amônio. (2) Após realizado os testes de força de compressão por posição (Pst), alguns conjuntos de amostras não ofereceram quantidade de material suficiente para realização das análises dos teores de ferro. n.a.: não avaliado.

As Figuras 5.9 e 5.10 a seguir mostram a variação em consistência (dureza) e quantitativo de ferro (Feo, Fed e Fes), apenas nas feições plintitas em várias posições

estudadas. Por elas se verifica grande variabilidade tanto em teores de ferro quanto em grau de dureza das amostras, tanto em uma mesma posição, quanto entre elas.

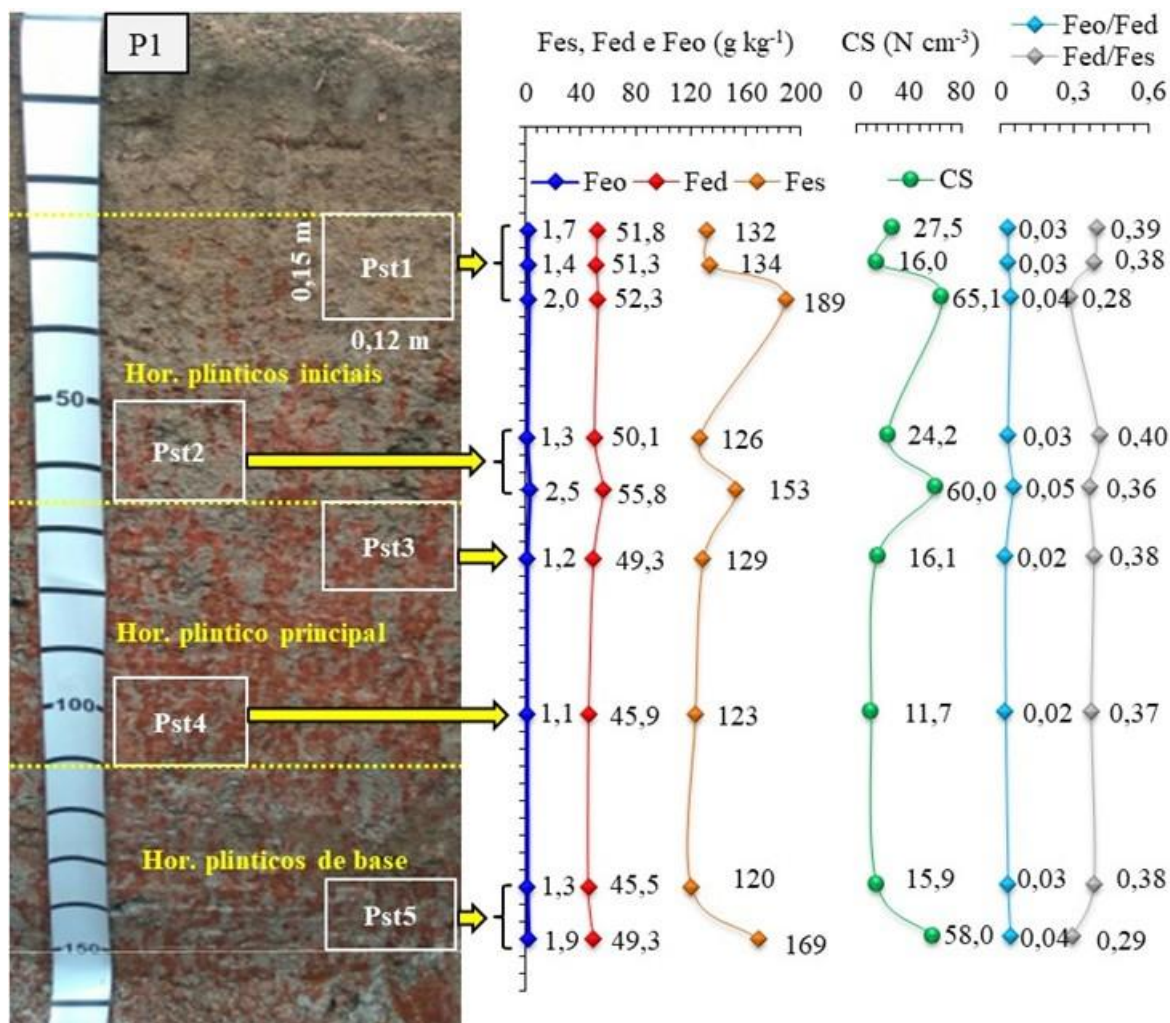


Figura 5.9. Teores médios de ferro obtidos por ataque ácido sulfúrico (Fes), ditionito-citrato-bicarbonato de sódio (Fed), oxalato-ácido de amônio (Feo) e relações Feo/Fed e Fed/Fes em conjuntos de amostras naturais de plintita após submetidas a testes de força de compressão (CS) em diferentes posições (Pst) do perfil P1.

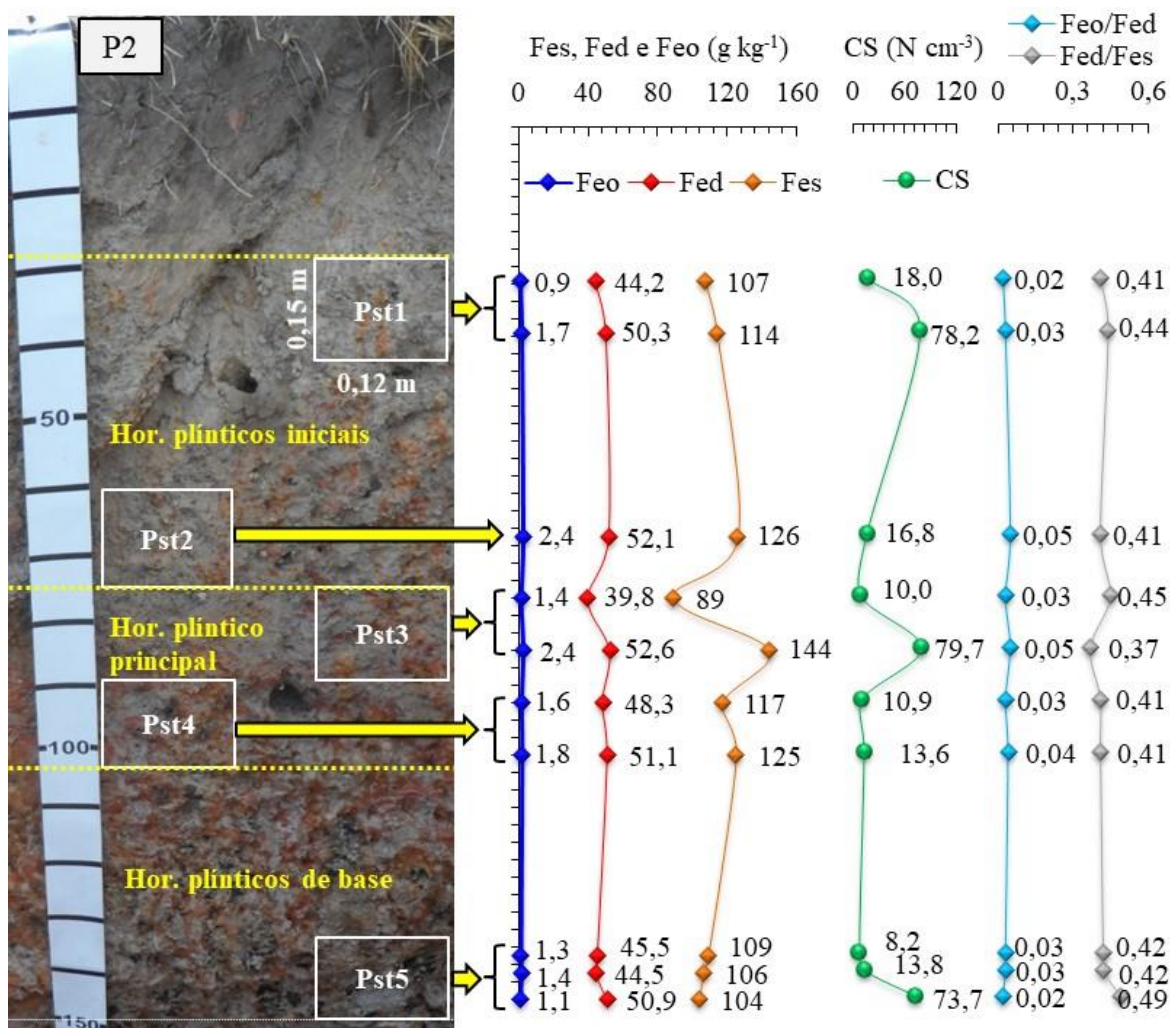


Figura 5.10. Teores de ferro obtidos por ataque ácido sulfúrico (Fes), ditionito-citrato-bicarbonato de sódio (Fed), oxalato-ácido de amônio (Feo) e relações Feo/Fed e Fed/Fes em amostras naturais de plintita após submetidas a testes de força de compressão (CS) em diferentes posições (Pst) do perfil P2.

5.3.4. Identificação dos minerais presentes nas diferentes feições

Na Figura 5.11 são apresentados os difratogramas de raios-X de amostras de argila desferrificadas, orientadas e tratadas, relativas a fração argila das feições redoximórficas e, por eles, verifica-se que em todas as feições foram constatados os argilominerais vermiculita (V), vermiculita com hidróxi nas entre camadas (VHE), mica (M) seguramente illitas, caulinita (K) e gibbsita (Gb).

Destaca-se que alguns argilominerais se mostram melhor expressos em apenas algumas das feições, provavelmente em razão de se apresentarem-se em concentração maior nas mesmas. No presente caso é registrada a ocorrência da VHE junto à vermiculita

(V) na feição matriz, baseado no comportamento dos picos, referentes aos tratamentos com potássio. Porém certamente coexistem as duas formas nas demais feições.

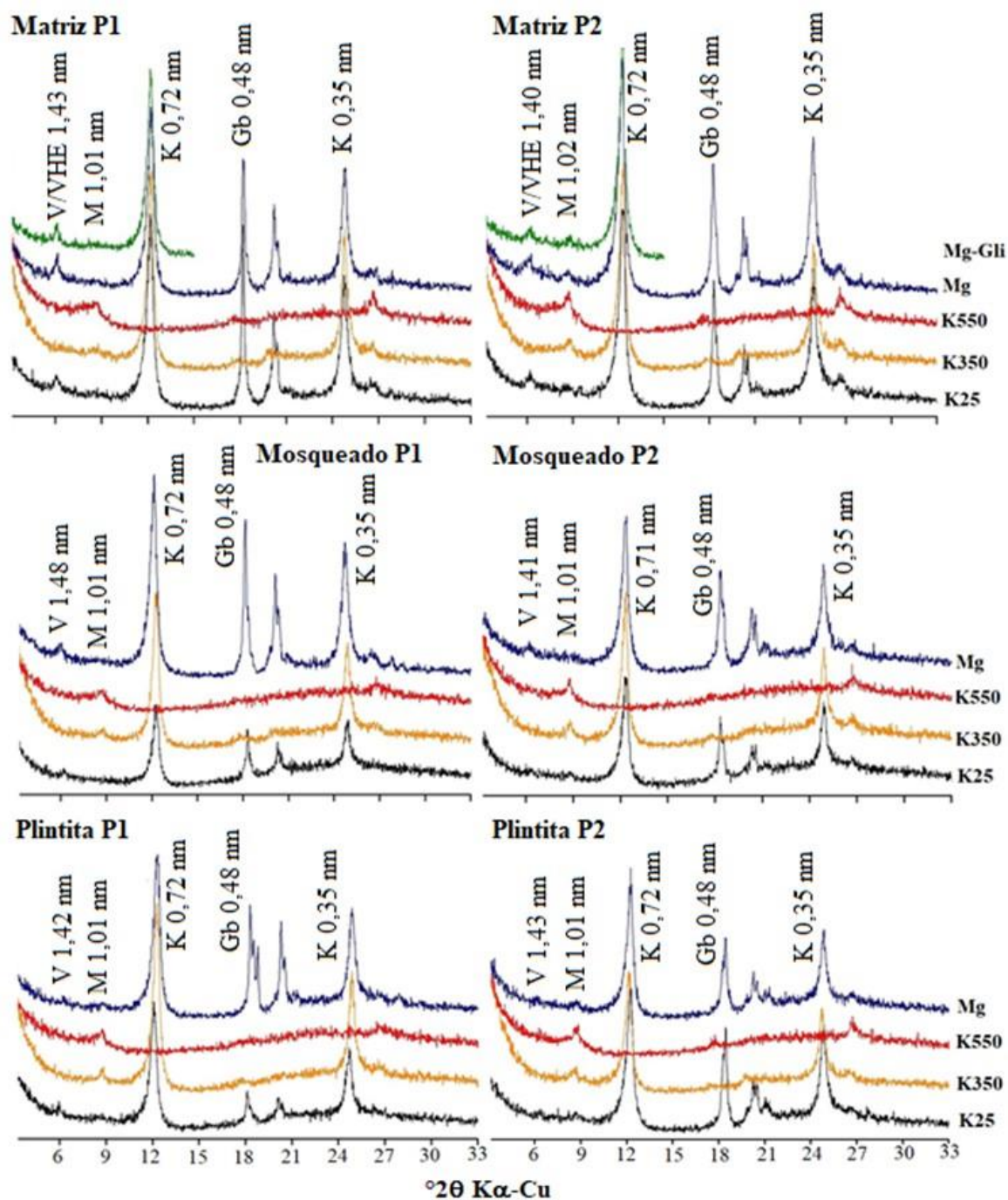


Figura 5.11. Difratomogramas de raios-X da fração argila desferrificadas, tratadas e orientadas das feições redoximórficas dos perfis. As amostras foram saturadas com potássio (K) à temperatura ambiente 25°C (K25), aquecidas a 350°C (K350) e 550°C (K550) e saturadas com magnésio (Mg) e magnésio+glicerol (Mg-Gli).

A Figura 12 mostra os difratogramas de raios-X (DRX) de amostras das diferentes feições na forma de pó, onde foi detectado predominantemente o óxido de Fe goethita em ambos os perfis. A hematita aparece de forma menos expressiva, mas vale realçar que em ambos os DRX, as duas formas apresentam sempre picos mais expressivos na feição plintita, seguidos da feição mosqueado e, por fim da feição matriz, o que é bem coerente com as quantidade de ferro oxidico (Fed e Feo) detectadas quimicamente (Figura 4.7).

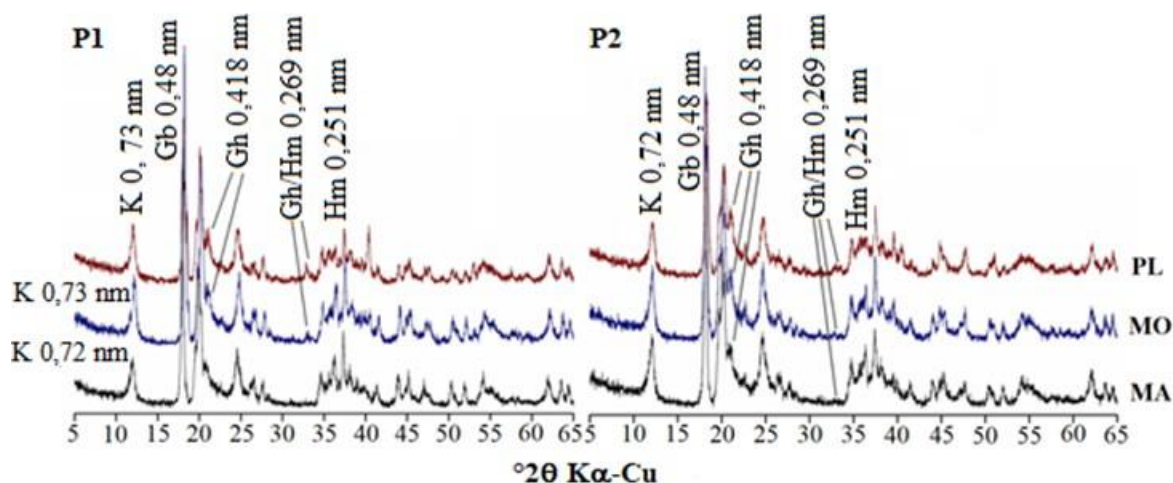


Figura 5.12. Difratogramas de raios-X de amostras em pó das feições redoximórficas dos perfis (P1 e P2). K: Kaolinite; Gb: Gibbsite; Gt: Goethite. MA: matrix; MO: mottled; PL: plinthite.

5.4 DISCUSSÃO

5.4.1 Disposição macromorfológica das feições redoximórficas nos perfis

Conforme pode ser observado na Figura 5.2, o arranjo espacial ou a posição de ocorrência das diferentes feições nos perfis é semelhante em ambos, sendo a matriz de cor acinzentada ou neutra, uma fase contínua que se inicia na porção superior dos perfis (horizontes E) e se estende para os horizontes subsuperficiais, enquanto as feições mosqueados e plintitas que são dotadas de cores mais ou menos avermelhadas, se distribuem em meio à matriz, e se apresentam em número e formato que se modificam à medida que aumenta a profundidade do solo. Especificamente nos horizontes A e E, não foram registradas nas descrições morfológicas (Martins et al., 2018) e nem foram detectadas significativamente por meio de análises granulométricas (Tabela 5.1), ocorrências de feições ou corpos redoximórficos na forma de plintitas ou nódulos em tamanho de cascalho.

De modo geral, na porção superior da zona de ocorrência, as feições plintita registradas nas descrições, se apresentam mais dispersas e de forma individualizada, com formato subarredondado determinado por exame macroscópico e, com fácil desprendimento da feição matriz circundante, que em ambos os perfis se situa na altura de 30 cm (Figura 5.13B). Da parte mais central para a base desta zona, essas feições começam a ocorrer de forma interligada e com mais difícil desprendimento da matriz (Figuras 5.13A e 5.13C), configurando-se aí uma massa distinta do restante, onde o arranjo das feições plintita e mosqueados é bem irregular e intrincado, no tocante à morfologia e à distribuição espacial. Encontram-se coexistindo na mesma posição, feições de plintita mais e menos endurecidas, mais e menos vermelhas, junto à feições de mosqueados e, todas, em meio à uma matriz que passa a ocupar menores espaços na medida em que as profundidades são maiores. Alguns autores, como Moura (2015) descrevem a presença de plintita em perfis desta região, como tendo ocorrência pouca na parte superficial de sua “zona de ocorrência”, passando a comum em seguida e chegando à classe abundante na parte mais inferior. Os mosqueados, por sua vez, têm ocorrência mais significativa nas porções mais inferiores dos perfis, coincidindo praticamente com a região onde as plintitas se mostram interligadas.

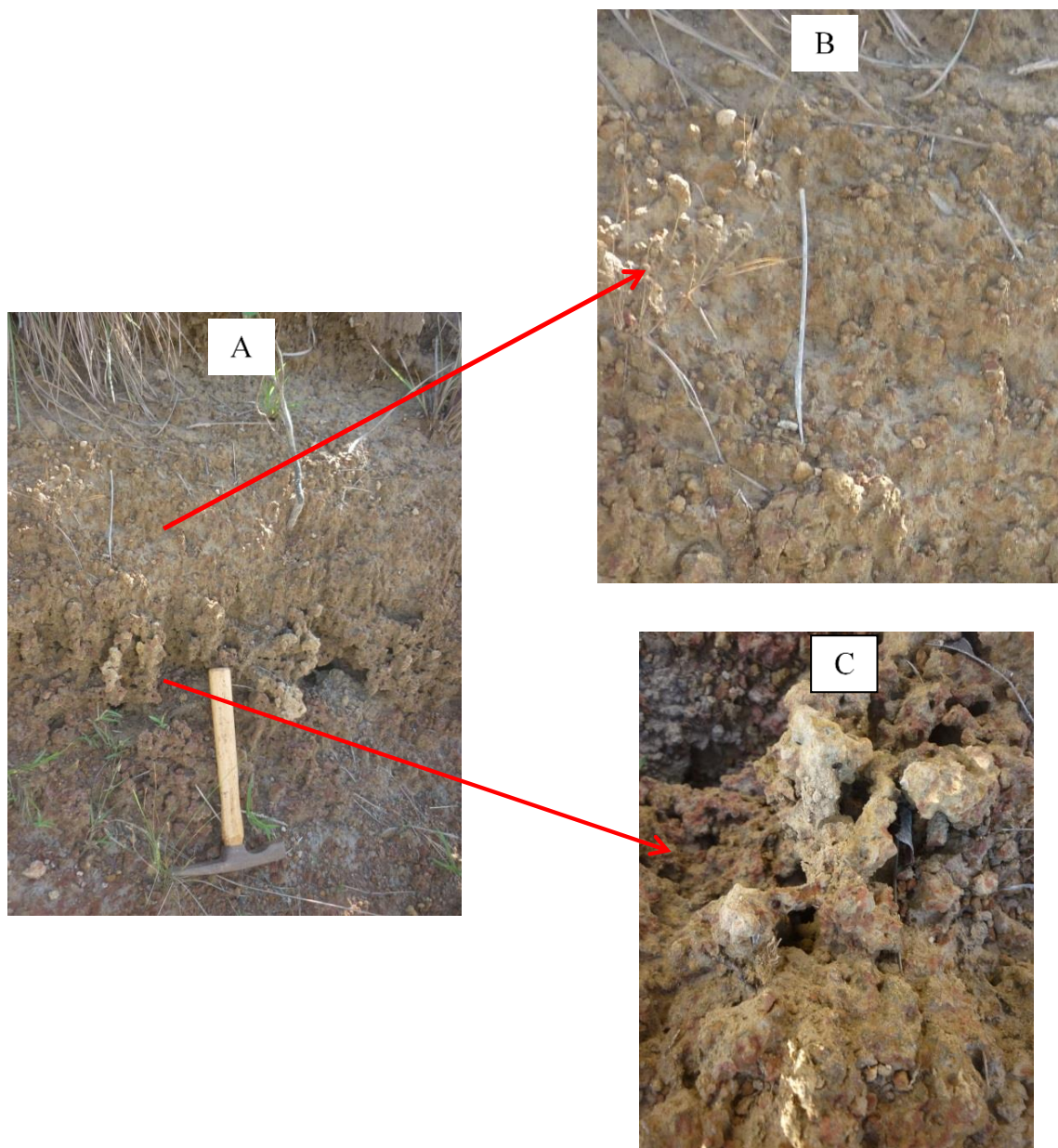


Figura 5.13. Esquema da distribuição de plintitas da Planície do Rio Araguaia. PL: plintita; MO: mosqueados; MA: matriz do solo. Perfil de solo em barranco de estrada (A), plintitas individualizadas (B) e plintitas interligadas (C).

5.4.2 Micromorfologia das feições redoximórficas nos perfis

Na Tabela 5.2 observa-se que nas lâminas que contemplaram os horizontes A (0-0,17 m) e E (0,17-0,33 m) do Perfil P1 e A/AE (0-0,18 m) e AE/E (0,18-0,29 m) do Perfil P2), foram identificados como feições pedológicas, nódulos típicos de forma irregular com limites nítidos, em estado de degradação ou de intemperização, estando as evidências retratadas por micrografias nas Figuras 5.4 e 5.5. Considerando que nestes horizontes

feições deste tipo não foram detectadas macroscopicamente de forma significativa na descrição morfológica de nenhum dos perfis, tampouco na análise granulométrica realizada à ocasião (Tabela 5.1) e, por estimativa, considerando-se as micrografias e a escala de aumento empregada (cerca de 25 vezes), presume-se terem tamanho equivalente à fração areia em maioria, que no presente, não foi objeto de caracterização isolada.

Embora com baixa frequência, os nódulos nestes horizontes são categorizados como irregulares e típicos e estão em processo de degradação por epissaturação, podendo terem sido transportados e herdados de um ambiente mais seco que o atual. Segundo Vepraskas & Lindbo (2012), a epissaturação é causada pela formação de lençol suspenso em ambiente mais reduzido nos macroporos entre-agregados e mais oxidado intra-agregados.

Essas feições por meio de microscopia são interpretadas como relictuais, por apresentarem limites nítidos e superfície lisa (Tucker et. al., 1994). Possivelmente, em tempos remotos, apresentavam-se como sendo única feição e, por meio da ação de ácidos oriundos da matéria orgânica do solo foram degradados (Figura 5.5A). As temperaturas mais elevadas, maiores conteúdos de oxigênio e atividade biológica em condições de lençol freático suspenso temporário anual, também podem acelerar o processo de degradação de nódulos por epissaturação (Vepraskas & Lindbo, 2012).

A Figura 5.5B mostra detalhes de quartzo no interior dos nódulos que poderiam sugerir instabilidade desta feição, contudo, como observado por Beirigo (2013) não estão presentes bordos serrilhados, halos de dissolução e desprendimento de fragmentos, conferindo estabilidade dessas feições neste horizonte nas condições hídricas atuais. Segundo Coelho; Vidal-Torrado; Ladeira, (2001), maiores concentrações de quartzo na areia fina, associada a alguns poros, evidencia uma possível dissolução dos grãos do esqueleto e um estado geral de desmonte da estrutura na porção superior dos perfis.

Do ponto de vista macroscópico, em descrição morfológica dos perfis, as feições assim identificadas, quando ocorrem em maior tamanho, equivalente ao de cascalhos (>2 mm de diâmetro), são denominadas concreções ferruginosas e, devido ao tamanho, costumam ser popularmente denominadas “chumbo de caça” quando arredondadas. Como pode ser visto na Figura 5.2, e, mosqueados nestes horizontes (A e E) inexistem.

Plintitas com formato macroscópico subarredondado, ocorrendo de forma individualizada, endurecida, irregular e de fácil desprendimento da matriz, ocorrem a partir do horizonte imediatamente inferior ao E (Figuras 5.2A e 5.2B). Quando caracterizadas

micromorfológicamente na amostra E/Btf1 (Tabela 5.2 e Figura 5.5C), são de certa forma, similares aos nódulos dos horizontes A e E, estando também em processo de degradação, associados a resquícios de nódulos minúsculos relictuais. Nesta tabela são também nódulos típicos, com limites bem nítidos, em processo de desprendimento e redução de tamanho do nódulo original.

Em seguida a esta ocorrência individualizada, observa-se macroscopicamente que há uma mudança gradual no arranjo das mesmas, na medida em que aumenta a profundidade de sua ocorrência nos perfis (Figura 5.13), estas ficam mais adensadas e interligadas. Tal arranjo assume muitas vezes um padrão variegado de cores, sendo difícil distinguir a feição dominante. Ressalta-se ainda que nestas posições mais inferiores, a plintita se apresenta por vezes com difícil desprendimento da matriz do solo, mas ainda assim coexistindo com feições bem endurecidas (Tabela 5.4).

Em escala micromorfológica, as lâminas Btf4/Btf5 (0,65-1,10 m) (Perfil P1) e Btf3/Btf4 (0,75-1,50 m) (Perfil P2) constantes da Tabela 5.2, são representativas de materiais destas posições. Em ambas são destacados o aspecto de acúmulo de ferro, de formação de mosqueados, formação de núcleos e posterior formação de nódulos bem desenvolvidos, que remetem a considerar que as feições plínticas nesta porção dos perfis, encontram-se atualmente em fase de formação, a se considerar que a gênese dessas feições se dá majoritariamente em ambiente úmido pela segregação de ferro, importando em mobilização, transporte e concentração final dos compostos de ferro no perfil do solo (Soil Survey Staff, 2014; Eze et al., 2014; Santos et al., 2018).

No decorrer da plintização, o ferro primeiro é dissolvido e migrado para posterior adensamento e acúmulo, formando a plintita (Figuras 5.4E e 5.5G). Em contrapartida, por ser um ambiente redutor, em segundo plano pode ocorrer redução de tamanho da plintita já formada devido à perda de ferro. Em seguida, quando o material ferruginoso é seco, de forma natural ocorre trincas/fissuras da plintita formada, caracterizada pela contração e expansão do material no ambiente. Por conseguinte, há predominância de formação de plintita neste horizonte, em detrimento à sua degradação. Segundo Beauvais & Colin (1993), o estágio inicial da ferruginização é goethítico tornando progressivamente hematítico durante os processos de oxidação e endurecimento das feições.

Resultados e conclusões semelhantes foram também apontados por Beirigo, (2008) e Moura, (2015), quando empregaram estudos micromorfológicos de feições plintitas para

investigar a gênese de Plintossolos do Pantanal Matogrossense e da planície do Araguaia, respectivamente.

5.4.3 Formas de ferro presentes nas diversas feições

Conforme pode ser observado na Figura 5.7, em ambos os perfis e por todas as formas de determinação utilizadas, os teores de Fe são sempre maiores na feição plintita, seguidos daqueles da feição mosqueado, e por fim, na feição matriz do solo, o que sugere de início, que em se tratando de um solo submetido a processos de oxirredução, a feição plintita está se formando por acumulação de Fe proveniente das feições mosqueado e matriz do solo, conforme sugere a literatura (Duarte et al., 2000; Anjos et al., 2007; Tanner & Khalifa, 2010; Soil Survey Staff, 2014; WRB, 2015; Santos et al., 2018). Considerando-se o alcance de cada tipo de determinação, é possível estimar a participação do ferro na constituição de cada feição, como apresentado na Figura 5.7, onde se verifica que na feição plintita de cada perfil, em média cerca de 13,71% em P1 e 28,05% em P2 [(Fe prim./Fet)*100], está presente na forma de minerais primários, cerca de 66,23% em P1 e 45,26% em P2 [(Fe sec./Fet)*100], encontra-se presente na estrutura de minerais secundários, constituintes da fração argila dos mesmos e determinados pelo ataque sulfúrico (Fes), enquanto na forma de óxidos de alta e baixa cristalinidade, detectados pelo DCB (Fed) e pelo oxalato (Feo), que poderia terem sido formados em consequência dos processos de oxirredução a que estão submetidos os solos, ocorre apenas cerca de 20,05% em P1 e 26,68% em P2 [(Fed/Fet)*100]. Em síntese, a maior parte de Fe presente em todas as feições redoximórficas encontra-se incluso na estrutura de minerais primários e de derivados destes.

5.4.4 Identificação dos minerais presentes nas diferentes feições

Nas análises de difração de raios-X (DRX) realizadas (Figuras 5.11 e 5.12) foram detectados minerais do grupo das micas, identificados como vermiculitas, VHEs e micas (illitas), além de argilominerais outros, como caulinita, gibbsita e óxidos de ferro (goethita e hematita).

Micas verdadeiras são minerais primários que embora ocorram em solos, são formadas nas rochas (Resende et al., 2005) ou, mais especificamente no processo de

cristalização do magma, enquanto os minerais micáceos identificados nos difratogramas, são formados por alteração na estrutura das micas verdadeiras, quase sempre com perda de alguns elementos como o potássio (illitas), ou por perda de potássio associado a introdução de polímeros de alumínio em suas camadas (VHEs), portanto ocorrem na fração fina destes solos e são minerais secundários, mas não são pedogênicos, ou seja, não se formaram no local por ação de algum processo pedogenético, como por exemplo pelo processo de oxirredução, são apenas transformações por perda de elementos, de micas verdadeiras.

Há que se considerar também que o material de origem dos solos desta planície, se trata de sedimentos argilo-arenosos de natureza colúvio-aluvionar (RadamBrasil, 1981), que poderiam, com grande probabilidade, conter o elemento Fe em todas as formas detectadas nos solos, antes mesmo de seu transporte.

5.4.5 Teores do elemento ferro na feição plintita em diferentes posições dos perfis

Pelos dados da Tabela 5.4 e pelas Figuras 5.9 e 5.10 é possível observar que não há uma distribuição regular ou lógica nos quantitativos de Fe, quer na determinação Fes (que contém as formas de argilominerais + forma oxidada), quer apenas na forma oxidada (Fed) que possam mostrar uma tendência de acumulação local ou de movimentação de Fe proveniente de reações de oxirredução, nem horizontal e nem verticalmente.

Avaliando-se as Figuras 5.9 e 5.10, que mostram as concentrações de Fed e Feo junto às de Fes, em feições plintitas com diferentes graus de dureza ou de consistência, medidas por testes de compressão, se observa primeiramente considerável variabilidade ou irregularidade na disposição dos valores de Fed nas diferentes posições estudadas e mesmo dentro delas, ou seja, não há uma distribuição ou disposição regular que mostre ou sugira alguma tendência, de sentido ou de posição, de segregação ou de acumulação exclusiva destas formas de ferro, que possa ser atribuída a um processo de natureza redox.

Por outro lado, é possível observar uma associação bem estreita dos valores de Fed com os valores detectados pelo ataque sulfúrico (Fes), ou seja, em amostras com maior concentração de Fed há também maior concentração de Fes, o que possibilita associar mais adequadamente os maiores teores de óxidos (Fed) à maior presença de argilominerais que apresentam Fe na fração fina de cada feição, que por estarem em maiores concentrações, ao se decomporem disponibilizam também maiores teores de Fed, do que as prováveis acumulações localizadas de óxidos pelo processo redox. Os valores médios da relação

Fed/Fes nesta tabela 0,36 em P1 e 0,42 em P2 (Tabela 5.4), mostram que apenas uma parte do Fe presente na fração fina do solo (Fes) se encontra sob a forma de óxidos (35,40 e 41,98%, respectivamente), enquanto a maior parte se encontra na estrutura cristalina dos minerais secundários (vermiculitas, VHEs e illitas).

Portanto, se dentro deste quantitativo de ferro oxídico (Fed) presente, alguma parte se deve à acumulação por via redox, supõe-se que aconteça de forma muito desorganizada ou casual e em quantidades muito pequenas, sem uma tendência principal para algum sentido ou direção.

5.4.6 Relações micromorfologia *versus* constituição química e condição atual da feição plintita

Os dados de micromorfologia (Tabela 5.2), em avaliação dos microprocessos ocorrentes no material do solo e principalmente nas feições plintita em diferentes posições estudadas de ambos os perfis (Figura 5.2) apontam que as feições isoladas da parte superior (Figura 5.13 B) se encontram em processo claro de degradação, enquanto as feições interligadas das partes mais central e inferior, por sua vez, se encontram em formação, principalmente por terem sido identificados nas mesmas, pontos de acumulação de óxidos de ferro, que é a condição ou o mecanismo de formação de plintitas, conclusão que está concordante com outros autores que estudaram solos desta mesma classe, nesta mesma planície e no Pantanal Matogrossense, respectivamente (Moura, 2015; Beirigo, 2008).

Os dados químicos e mineralógicos por sua vez, revelam com segurança que: a) as feições plintitas presentes não se formaram exclusivamente por acumulação de ferro pelo processo redox, e quando muito, receberam algum enriquecimento, em razão de apresentarem uma participação apenas minoritária de ferro na forma oxídica; b) as feições plintitas presentes não se formaram por simples acumulação de ferro proveniente da feição matriz, em razão de apresentarem em relação a esta feição, concomitantemente maiores teores de óxidos de ferro e de minerais silicatados (primários e secundários) não pedogênicos; c) as feições plintitas estudadas em todas as posições do perfil, não mostram nenhuma evidência de existência de algum ponto ou local de acumulação, ou, alguma tendência de movimentação ou de deposição de ferro na forma férrica ou de baixa cristalinidade, que possa ser atribuída ao processo redox. Diferentes concentrações nas

plintitas ocorrem de forma irregular e dispersa por todas as posições (Tabela 5.4), se mostrando diretamente associadas ao conteúdo de ferro presente na estrutura de outros minerais que estariam se degradando.

Mediante os fatos, a situação geral é entendida como existindo um grande e principal processo de dissolução ou intemperização do material sedimentar depositado nesta planície por ocasião de seu enchimento, e que se tornou o material originário destes solos. Esta dissolução se dá de forma relativamente lenta a se considerar entre outros indicadores a relação Feo/Fed muito baixa e igual em todas as feições redoximórficas estudadas (Tabela 5.3), equivalentes a valores determinados em vários outros solos de boa drenagem (Inda Júnior & Kampf, 2003), o que revela razoável estabilidade, com pequena e igual taxa de dissolução em todas as feições. Contribui para isto também a natureza dos minerais secundários e primários que apresentam ferro presentes nestas feições, que é de elevada estabilidade, sendo considerados não alteráveis ou de difícil alteração (IBGE, 2015; Santos et al., 2018). A dissolução do material na planície se dá também por diferentes frentes, determinadas pela dinâmica das águas de inundação da planície como um todo, sendo bem mais expressiva no sentido topo para a base, como consequência da ação primeira das águas de inundação que geralmente ocorrem por transbordamento das calhas rasas dos rios antes mesmo da elevação normal do nível freático, e inundam a planície mantendo-a submersa até o final do período chuvoso, mas com uma dinâmica própria, movimentando-se de forma relativamente rápida e lateralmente. Por sua vez, as águas do freático se movimentam mais expressivamente no sentido vertical.

Quanto aos pontos de acumulação de óxidos de ferro determinados pela micromorfologia em feições de plintita, é uma situação considerada normal, pelo fato de as mesmas conterem cerca de 30% do ferro presente na forma de óxidos (Figuras 5.6 e 5.7). No processo de intemperização, os silicatos desfazem a sua estrutura e liberam os elementos químicos constituintes, que em parte se perdem em solução e em parte podem se recombinar. Conforme Driessen & Dudal (1989), o primeiro processo de endurecimento da plintita envolve a cristalização de compostos de Fe amorfos com a consequente formação de agregados de minerais de óxidos de Fe, especialmente goethita, e o segundo processo, ocorre a desidratação de goethita para cristalização de hematita.

A questão que se apresenta é que, pelos dados químicos e mineralógicos, se configura uma decomposição generalizada do material terroso destes solos no tempo atual, sendo que a maioria absoluta dos elementos liberados (bases, ferro, silício) na

intemperização que é bem lenta, sai do sistema. Acredita-se que no regime hídrico atual, o volume de água e a velocidade de sua movimentação lateral principalmente, promove a remoção quase completa dos elementos liberados, sem permitir a sua recombinação localmente.

Os óxidos de ferro presentes nas feições plintita identificados microscopicamente, são possivelmente formados em um tempo anterior ao atual, ou pelo menos em um tempo anterior ao atual regime hídrico da planície, provavelmente transportados junto ao restante do material de origem. É, portanto uma questão de temporalidade.

5.5 CONCLUSÕES

As feições plintitas presentes nos solos estudados não se formaram como consequência da acumulação de ferro proveniente de segregação da matriz, mas se tratam de restos ainda não decompostos do material terroso depositado nas planícies.

As acumulações de ferro identificadas nestas feições pelo estudo micromorfológico são provavelmente formadas em tempos anteriores, imediatamente após a liberação do ferro das estruturas silicatadas e em condição distinta de umidade que possibilitaram a sua recombinação na forma de óxidos, provavelmente com menor movimentação de águas.

5.6. REFERÊNCIAS

ANJOS, L. H. C.; PEREIRA, M. G.; PÉREZ, D. V. RAMOS, D. P. Caracterização e classificação de Plintossolos no município de Pinheiro-MA. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 31, p. 1035-1044, 2007.

BEIRIGO, R. M. **Formação e degradação de feições redoximórficas em solos do Pantanal-MT**. 2013. 125 f. Tese (Doutorado em Solos e Nutrição Mineral de Plantas) - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2013.

BROWN, G.; BRINDLEY, G. W. X-Ray diffraction procedures for clay mineral identification. In: BRINDLEY, G.W.; BROWN, G. (ed.). **Cristal structures of clay minerals and their x-ray identification**. Mineralogical Society, London, 1980. v. 5, Cap. 5, p. 305-360.

BULLOCK, P.; FEDOROFF, N.; JONGERIUS, A.; STOOPS, G.; TURSINA, T. **Handbook for soil thin section description**. Wolverhampton, England: Waine Research Publications, 1985. 152 p.

BEAUVAIS, A.; COLIN, F. Formation and transformation processes of iron duricrust systems in tropical humid environment. **Chemical Geology**, Amsterdam, v. 106, n. 1, p. 77-101, 1993.

CASTRO, S. S. Impregnação de amostras de solo para confecção de lâmina delgada. B. **Inf. SBCS**, Viçosa, v. 10, p. 44, 1985.

CASTRO, S. S.; COOPER, M.; SANTOS, M. C.; VIDAL-TORRADO, P.; CURTI, N.; MARQUES, J. J.; GUILHERME, L. R. G.; LIMA, J. M.; LOPES, A. S.; ALVAREZ V, V. H. Micromorfologia do solo: bases e aplicações. **Tópicos em ciência do solo**, Viçosa, v. 3, 2003.

CASTRO, S. S.; COOPER, M. **Fundamentos de micromorfologia de solos**. Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2019. 240 p.

COELHO, M. R.; VIDAL-TORRADO, P.; LADEIRA, F. S. B. Macro e micromorfologia de ferricretes nodulares desenvolvidos de arenito do Grupo Bauru, Formação Adamantina. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 25, n. 1, p. 371-385, 2001.

DANIELS, R. B.; PERKINS, H. F.; HAJEK, B. F.; GAMBLE, E. E. Morphology of discontinuous phase plinthite and criteria for its field identification in the southeastern United States. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 42, n. 6, p. 944-949, 1978.

DUARTE, M. N.; CURTI, N.; PÉREZ, D. V.; KAMPF, N.; CLAESSEN, M. E. C. Mineralogia, química e micromorfologia de solos de uma microbacia nos tabuleiros costeiros do Espírito Santo. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 35, n. 1, p. 1237-1250, 2000.

DRIESSEN, P. M.; DUDAL, R. **Lecture notes on de geograplay formation, properties and use of the major soils of the world**. Jul. 1989. Notas de aula. Agricultural University Wageningen – Katholieke Universiteit Leuven.

EZE, P. N.; UDEIGWE, T. K.; MEADOWS, M. E. Plinthite and its associated evolutionary forms in soils and landscapes: a review. **Pedosphere**, Beijing, v. 24, n. 2, p. 153-166, 2014.

IBGE - Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Manual técnico de pedologia**. 3. ed. Rio de Janeiro: Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística, 2015. 430 p. (Manuais Técnicos em Geociências, n. 4).

INDA JUNIOR, A.V.; KÄMPF, N. Avaliação de procedimentos de extração dos óxidos de ferro pedogênicos com ditionitocitrato- bicarbonato de sódio. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 27, n. 6, p. 1139-1147, 2003.

JACKSON, M. L. **Soil Chemical Analysis: Advanced Course**. 2 ed. Madison: Parallel Press, 1975. 930 p.

MARTINS, A. P. B.; SANTOS, G. G.; OLIVEIRA, V. A.; MARANHÃO, D. D. C.; COLLIER, L. S. Hardening and stability of plinthic materials of the Araguaia River floodplain under different drying treatments. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 42, e0170190, 2018.

MOORE, D. M.; REYNOLDS, R. C. **X-Ray Diffraction and Identification and Analysis of Clay Minerals**. 2 ed. Oxford, Oxford University Press, 1997, 400 p.

MOURA, D. B. **Caracterização de Plintossolos Argilúvicos na Planície do rio Araguaia**. 2015. 94 f. Dissertação (Mestrado em Agronomia: Solo e Água). –Escola de Agronomia, Universidade Federal de Goiás, Goiânia, 2015.

MURPHY, C. P. **Thin section preparation of soils and sediments**. Berkhamsted: A.B. Academic Publications, 1986. 149p.

OSHER, L. J.; BUOL, S. W. Relationship of soil properties to parent material and landscape position in eastern Madre de Dios, Peru. **Geoderma**, Amsterdam, v. 83, n. 1-2, p. 143-166, 1998.

RADAMBRASIL. **Folha SD. 22 Goiás**: geologia, geomorfologia, pedologia, vegetação e uso potencial da terra. Rio de Janeiro: Ministério das Minas e Energia, Secretaria Geral, 1981. 640 p (Levantamento de recursos naturais, 25).

RESENDE, M.; CURI, N.; KER, J. C.; REZENDE, S. B (ed.). **Mineralogia de Solos Brasileiros**: Interpretação e Aplicações. Lavras: Editora UFLA, 2005. 192p.

SANTOS, R. D.; SANTOS, H. G.; KER, J. C.; ANJOS, L. H. C.; SHIMIZU, S. H. **Manual de descrição e coleta de solo no campo**. 7. ed. Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2015. 101 p.

SANTOS, H. G., JACOMINE, P. K. T., ANJOS, L. H. C., OLIVEIRA, V.A., LUMBRERAS, J. F., COELHO, M. R., ALMEIDA, J. A., ARAÚJO FILHO, J. C., OLIVEIRA, J. B., CUNHA, T. J. F. **Sistema Brasileiro de Classificação de Solos**. 5. ed. Brasília: Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária, 2018. 355 p.

SOIL SURVEY STAFF. **Keys to soil taxonomy**. 12. ed. Washington: United States Department of Agriculture, Natural Resources Conservation Service, 2014. 372 p.

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

TARDY, Y., BOEGLIN, J., NOVIKOFF, A. AND ROQUIN, C. Petrological and geochemical classification of laterites. In: PROCEEDINGS OF THE 10TH INTERNATIONAL CLAY CONFERENCE., 18–23., 1993, Adelaide, Australia. p. 481–486. **Conference** „Adelaide, Australia, 1993. Disponível em: https://horizon.documentation.ird.fr/exl-doc/pleins_textes/pleins_textes_6/b_fdi_45-46/010007746.pdf

TEIXEIRA, P. C.; DONAGEM, G. K.; FONTANA, A.; TEIXEIRA, W. G. **Manual de Métodos de Análise de Solos**. 3. ed. Rio de Janeiro: Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária, 2017. 575 p.

TANNER, L. H.; KHALIFA, M. A. Origin of ferricretes in fluvial-marine deposits of the Lower Cenomanian Bahariya Formation, Bahariya Oasis, Western Desert, Egypt. **Journal African Earth Science**, Oxford, v. 56, n. 1. p. 179-189, 2010.

THOMAS, M. F.. **Geomorphology in the tropics**: a study of weathering and denudation in low latitudes. Chichester: John Wiley & Sons Ltd, 1994, 460 p.

TUCKER, R. J.; DREES, L. R.; WILDING, L. P. Signposts old and new: active and inactive redoximorphic features; and seasonal wetness in two Alfisols of the gulf coast region of Texas, U.S.A. *In*: RINGROSE-VOASE, A. J.; HUMPHREYS, G. S. (ed.). **Soil micromorphology**: studies in management and genesis. Amsterdam: Elsevier, 1994. v. 22, p. 99-106.

VEPRASKAS, M. J.; LINDBO, D. L. Redoximorphic features as related to soil hydrology and hydric soils. *In*: LIN, H. (ed.). **Hydropedology**: synergistic integration of soil science and hydrology. Amsterdam: Elsevier, 2012. p. 143-172.

VERDADE, F. D. A. C. Análise química total. *In*: MONIZ, A.C. (ed.) **Elementos de Pedologia**. São Paulo: Polígono, p. 209-221, 1972.

WILSON, C. A.; CLOY, J. M.; GRAHAM, M. C.; HAMLET, L. E. A microanalytical study of iron, aluminium and organic matter relationships in soils with contrasting hydrological regimes. **Geoderma**, Amsterdam, v. 202–203, n. 1, p. 71–81, 2013.

WRB. World Reference Base for Soil Resources -. International soil classification system for naming soils and creating legends for soil maps. **Food and Agriculture Organization of the United Nations**. Rome: IUSS/ISRIC/FAO, 2015. 106p.

6 CONCLUSÕES GERAIS

A maior parte de ferro presente em todas as feições redoximórficas encontra-se na forma de minerais primários (micas) cerca de 14,48% em P1 e 28,48% em P2, sendo que o ferro presente em minerais secundários (vermiculitas, VHES e illitas) alcançam valores da ordem de 64,60% em P1 e 58,02% em P2, enquanto apenas parte (cerca de 35,40% em P1 e 41,98% em P2) encontra-se detectado na forma de óxidos como goethita e hematita que teriam possibilidade de serem formados em processos de oxirredução.

As feições mosqueado e plintita presentes nestes solos não são produto do processo clássico de segregação, mobilização e acumulação de ferro como consequência de processos de oxirredução. Se formaram ou surgiram nos mesmos como resultado de um processo de intemperização relativamente lento e constante do seu material de origem, que estão sendo decompostos em meio aquoso liberando boa parte de seus componentes, entre eles, o ferro e elementos mais móveis como as bases e o silício, que saem do sistema pela água de drenagem, podendo alguma pequena parte deles se recombinar para a formação de novos minerais menos complexos, como caulinitas e óxidos.

A maior dureza das feições plintita dos solos está diretamente relacionada ao teor de ferro oxídico contido em sua fração fina. Os óxidos de ferro são os elementos responsáveis pela promoção e manutenção do endurecimento das feições.

A presença da feição plintita, com os quesitos de cor e dureza plenamente satisfeitos, se estabeleceu nos casos estudados com uma combinação dos seguintes fatores: condição de sazonalidade do regime hídrico; teores absolutos de Fed de pelo menos 40 g kg⁻¹ associados a uma relação Fed/Fes de pelo menos 0,35 e valores de Fes iguais ou superiores a 100 g kg⁻¹, associados a uma relação Fes/Fet de pelo menos 0,70.

As acumulações de ferro identificadas nestas feições pelo estudo micromorfológico são provavelmente formadas em tempos anteriores, imediatamente após a liberação do ferro das estruturas silicatadas e em condição distinta de umidade que possibilitaram a sua recombinação na forma de óxidos, provavelmente com menor movimentação de águas.