



**MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DA AMAZÔNIA - UFRA
DOUTORADO EM AGRONOMIA**

RIKELLY SOUZA SOUZA

**GÊNESE E COMPORTAMENTO FÍSICO- HÍDRICO DE SOLOS
CONSTRUÍDOS EM MINA DE BAUXITA NO SUDOESTE PARAENSE**

**BELÉM
2018**

RIKELLY SOUZA SOUZA

**GÊNESE E COMPORTAMENTO FÍSICO- HÍDRICO DE SOLOS
CONSTRUÍDOS EM MINA DE BAUXITA NO SUDOESTE PARAENSE**

Tese apresentada à Universidade Federal Rural da Amazônia, como parte das exigências do Curso de Doutorado em Agronomia para obtenção do título de Doutora.

Orientador: Prof. Dr. Mário Lopes Júnior.
Co-Orientador: Prof. Dr. Norberto Cornejo Noronha.

2018

Souza, Rikelly Souza

Gênese e comportamento físico- hídrico de solos construídos em mina de bauxita no sudoeste paraense / Rikelly Souza Souza. – Belém, 2018. 141 f.

Tese (Doutorado em Agronomia / Área de Concentração - Manejo e Conservação de Recursos Ambientais) – Universidade Federal Rural da Amazônia, 2018.

Orientador: Prof. Dr. Mário Lopes Junior.

1. Recuperação do Solo. 2. Áreas Degradadas por Bauxita. 3. Solos – Comportamento Físico-Hídrico. 4. Pedogênese do Solo. 5. Solos Alterados. I. Lopes Junior, Mário (orient.) II. Título.

CDD – 631.64

RIKELLY SOUZA SOUZA

**GÊNESE E COMPORTAMENTO FÍSICO- HÍDRICO DE SOLOS
CONSTRUÍDOS EM MINA DE BAUXITA NO SUDOESTE PARAENSE**

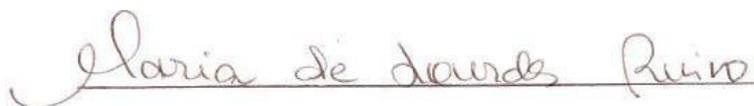
Tese apresentada à Universidade Federal Rural da Amazônia, como parte das exigências do Curso de Doutorado em Agronomia para obtenção do título de Doutora.

Data de Aprovação: 29 de novembro de 2018.

BANCA EXAMINADORA



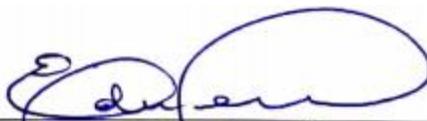
Prof. Dr. Norberto Cornejo Noronha – Coorientador
UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DA AMAZÔNIA- UFRA



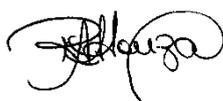
Dra. Maria de Lourdes Pinheiro Ruivo – 1º Examinador
MUSEU PARAENSE EMÍLIO GOELDI



Dra. Livia Gabrig Turbay Rangel – 2º Examinador
UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DA AMAZÔNIA- UFRA



Dr. Eduardo Jorge Maklouf Carvalho – 3º Examinador
EMBRAPA AMAZÔNIA ORIENTAL- EMBRAPA



Dra. Regilene Angélica da Silva Souza – 4º Examinador
UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DA AMAZÔNIA- UFRA

À Deus e Maria, sempre presentes em minha vida.
À minha filha Valentina, luz que me ilumina,
aquece e alegra todos os meus dias.

Dedico.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente à Deus e Nossa Senhora de Nazaré pela vida, saúde e motivação para esta conquista e conquistas futuras.

À minha família, em especial minha mãe Ioneide pelo apoio, compreensão e incentivo nestes anos; aos meus irmãos Rick e Rickson.

Ao meu esposo Adnauer pelo amor, paciência, dedicação, incentivo e companheirismo sempre presente em minha vida.

À Vera e Dida que deram todo suporte para minha filha o que me permitiu ficar tranquila para realização deste trabalho.

À Universidade Federal Rural da Amazônia pela minha formação acadêmica e oportunidade de realizar este curso de Pós-Graduação.

À CAPES pela bolsa de estudo concedida.

Ao meu orientador Mário Lopes Júnior pela confiança, apoio à pesquisa e conselhos valiosos.

Ao meu Co-orientador Norberto Cornejo Noronha pela confiança, dedicação, sabedoria, ética e pelos seus ensinamentos que me foram passados além da pesquisa.

Ao professor Marcos Piedade pelos conselhos valiosos e suporte para realização deste trabalho.

À empresa Mineração Paragominas S.A. e a todo grupo Hydro pelo apoio logístico e financeiro para execução deste trabalho.

Aos professores e pesquisadores Maria de Lourdes Pinheiro Ruivo; Lívia Gabrig Turbay Rangel; Eduardo Jorge Maklouf Carvalho e Regilene Angelica de Souza pelos ensinamentos e contribuições para melhoria desta tese.

Aos professores da Universidade Federal Rural da Amazônia pelos ensinamentos e dedicação.

Aos todos os amigos da UFRA que fiz ao longo dos anos, que ajudaram e contribuíram para meu crescimento.

Ao Museu Paraense Emílio Goeldi; Universidade Federal do Pará e Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz (ESALQ-USP) pelo apoio à pesquisa.

E a todos que direta ou indiretamente estiveram presentes nestes anos e que contribuíram de alguma forma para a realização deste trabalho.

SUMÁRIO

1 CONTEXTUALIZAÇÃO	9
1.1 REFERÊNCIAS	14
2 GÊNESE DE SOLOS RECENTEMENTE CONSTRUÍDOS APÓS MINERAÇÃO DE BAUXITA EM PARAGOMINAS-PA	19
2.1 INTRODUÇÃO	21
2.2. MATERIAL E MÉTODOS	23
2.2.1. Caracterização da área de estudo e dos processos de mineração e construção do solo	23
2.2.2. Descrição morfológica e micromorfológica e amostragem do solo	29
2.2.3. Análise química	30
2.2.4. Análise física	30
2.2.5. Análise Mineralógica	31
2.2.6. Vegetação	32
2.3 RESULTADOS E DISCUSSÃO	32
2.3.1 Abundância de plantas no estrato superior	32
2.3.2 Características Morfológicas	33
2.3.3 Análise Meso e Micromorfológica	50
2.3.4 Características Química	65
2.3.5 Característica Mineralógica	72
2.4 CONCLUSÃO	78
2.5 REFERÊNCIAS	80
3 COMPORTAMENTO FÍSICO- HÍDRICO DE SOLOS RECENTEMENTE CONSTRUÍDOS APÓS MINERAÇÃO DE BAUXITA, PARAGOMINAS- PA ...	88
3.1 INTRODUÇÃO	90
3.2 MATERIAL E MÉTODOS	92
3.2.1 Área de estudo	92
3.2.2 Caracterização da área de estudo	92
3.2.3 Delineamento amostral e coleta de do solo e vegetação	97
3.2.4 Análise Vegetação	98
3.2.5 Análise Física	98
3.2.5.1 Densidade e Porosidade do solo	98
3.2.5.2 Distribuição de agregados estáveis em água em diferentes classes de tamanho.....	98
3.2.6 Infiltração de água no solo	100
3.2.7 Análise Química	101
3.2.8 Análise Estatística	101
3.3 RESULTADOS E DISCUSSÃO	102
3.3.1 Vegetação	102
3.3.2 Atributos químicos	105
3.3.3 Densidade e Porosidade do solo	107
3.3.4 Distribuições de agregados estáveis em água e diâmetro de agregados	108
3.3.5 Infiltração de água no solo	116
3.4 CONCLUSÃO	123
3.5 REFERÊNCIAS	124
4 CONSIDERAÇÕES FINAIS	130

RESUMO

Em área sob influência da mineração de bauxita, da empresa Mineração Paragominas S.A., do grupo Hydro, no Platô Miltônia 3, foi realizado um estudo com objetivo de avaliar o efeito do tempo e influência dos métodos de recuperação na pedogênese e no comportamento físico-hídrico de solos construídos após mineração de bauxita. Foram estudadas 5 áreas em processo de recuperação: regeneração natural, plantio de mudas instaladas em 2009 e 2014, nucleação instalada em 2014 e uma área de floresta que serviu como referência do solo no seu estado natural. Para isto, avaliou-se os atributos morfológicos, micromorfológicos, mineralógicos, químicos e físico – hídricos do solo. Nos solos construídos parte das características morfológicas relacionadas à cor e estrutura é herdada do solo original, porém é comum alterações estruturais relacionadas à compactação, acomodação de matéria e entupimento de poros. Não se observou grande evolução dos processos pedogenéticos, salvo a formação de novas unidades estruturais que foram observadas apenas nas camadas superficiais nas áreas mais antigas, além de feições de mobilização de Fe em camadas compactadas. Entre os cinco sistemas estudados em diferentes anos, o sistema de regeneração natural se mostrou com um maior potencial para recuperação dos solos alterados e apresentou uma maior evolução pedogenética nos primeiros centímetros, apresentando melhoras nestes atributos principalmente na camada superficial. O sistema RN09_9 obteve as melhores respostas dos atributos do solo: variáveis CTC, VIB e DMG e agregados da classe de 2 mm, além da MOS, demonstrando ser o sistema mais promissor na recuperação da qualidade do solo até esta fase de estudo. A recuperação da maioria dos atributos do solo em profundidades menos influenciadas pela cobertura vegetal demandará mais tempo.

Palavras-chave: Amazônia. Bauxita. Recuperação do solo. Solos alterados.

ABSTRACT

In an area under the influence of bauxite mining, from the company Mineração Paragominas SA, of the Hydro group, in the Miltonia Plateau 3, a study was carried out to evaluate the effect of time and the influence of recovery methods on pedogenesis and physical-water behavior of soils built after bauxite mining. Five areas under recovery were studied: natural regeneration, planting of seedlings installed in 2009 and 2014, nucleation installed in 2014 and a forest area that served as a reference for the soil in its natural state. For this, the morphological, micromorphological, mineralogical, chemical and physical - water attributes of the soil were evaluated. In constructed soils, part of the morphological characteristics related to color and structure is inherited from the original soil, however structural changes related to compaction, accommodation of matter and pore clogging are common. There was no great evolution in pedogenetic processes, except for the formation of new structural units that were observed only in the superficial layers in the older areas, in addition to Fe mobilization features in compacted layers. Among the five systems studied in different years, the natural regeneration system proved to have a greater potential for the recovery of altered soils and presented a greater pedogenetic evolution in the first centimeters, showing improvements in these attributes mainly in the superficial layer. The RN09_9 system obtained the best responses for soil attributes: CTC, VIB and DMG variables and aggregates of the 2 mm class, in addition to MOS, demonstrating to be the most promising system in the recovery of soil quality until this study phase. The recovery of most soil attributes at depths less influenced by vegetation cover will take more time.

Keywords: Amazon. Bauxite. Soil recovery. Altered soil.

1 CONTEXTUALIZAÇÃO

O Brasil possui grande extensão territorial, com aproximadamente 8,5 milhões de km² e extraordinária diversidade geológica, contendo uma grande variedade de minérios. Somente no ano de 2010 foram explorados mais de 72 diferentes minérios, sendo a bauxita um deles. A produção mineral brasileira, no ano de 2017 atingiu o valor de US\$ 55 bilhões, representando cerca de 5% do produto interno bruto do país, proporcionando elevado efeito multiplicador na economia por gerar um círculo virtuoso na geração de emprego e renda (INSTITUTO BRASILEIRO DE MINERAÇÃO – IBRAM, 2015).

Segundo Constantino et al. (2002) “bauxita não é uma espécie mineral propriamente dita, mas um material heterogêneo formado de uma mistura de alumínio hidratado contendo impurezas”. A ocorrência da bauxita se dá principalmente em clima tropical, mediterrâneo e subtropical, representando 57%, 33% e 10% respectivamente (SAMPAIO et al.; 2005).

As maiores reservas mundiais de bauxita estão em Guiné, Austrália e no Brasil com 3,6 bilhões de toneladas (DEPARTAMENTO NACIONAL DE PRODUÇÃO MINERAL – DNPM, 2017). A nível nacional, o estado do Pará se destaca por deter 75% das reservas, com 47 toneladas de bauxita extraídas anualmente, seguido de Minas Gerais com 39 toneladas. As principais minas de extração de bauxita no estado do Pará estão localizadas nos municípios de Juruti, no Oeste do Pará, e Paragominas, no Sudeste paraense. (DEPARTAMENTO NACIONAL DE PRODUÇÃO MINERAL – DNPM, 2017).

No período de janeiro a julho de 2018, a bauxita foi o terceiro minério mais exportado no Pará, gerando um lucro de US\$ 111 milhões, atrás do ferro e do cobre com US\$ 3,982 bilhões e US\$ 937 milhões, respectivamente. (SINDICATO DAS INDUSTRIAS MINERAIS DO PARÁ- SIMINERAL, 2018).

Em Paragominas a jazida de bauxita geralmente se apresenta em uma camada mineralizada horizontal, sob um capeamento de solo natural com espessura média de 11,4 m (variando entre 2,1 m a 16,5 m). A mineração é realizada a céu aberto, em um processo conhecido como *strip mining method* (mineração em tiras ou faixas), após a remoção da cobertura vegetal. Esse método consiste em lavar o depósito em faixas paralelas de

aproximadamente 30 metros de largura e comprimentos variáveis (400 m a 1000 m), com parte do capeamento, subsolo estéril, sendo disposto na área da tira anteriormente lavrada, enquanto que o *topsoil*, proveniente dos horizontes e sub- horizontes superficiais do solo, é armazenado e posteriormente espalhado sobre o estéril para a construção do solo de mina nas áreas a serem recuperadas.

As vantagens desse procedimento são: minimização das distâncias de transporte dos materiais decapeados, não sendo necessária a utilização de outra área para dispor o material estéril. Além disso, possibilita que as reabilitações das áreas lavradas sejam realizadas concomitantemente ao avanço da lavra, já que o decapeamento e conformação do terreno são realizados de acordo com o avanço da frente de lavra.

Embora seja inegável a contribuição da mineração para economia do país, é evidente que essa atividade é uma das que mais causa impactos ambientais com modificação dos principais atributos dos solos, havendo a necessidade de aplicação de técnicas de recuperação destas áreas alteradas.

Segundo o Manual de Recuperação de Áreas Degradadas pela Mineração:

A degradação de uma área ocorre quando a vegetação nativa e a fauna forem destruídas, removidas ou expulsas; a camada fértil do solo for perdida, removida ou enterrada; e a qualidade e o regime de vazão do sistema hídrico forem alterados. A degradação ambiental ocorre quando há perda de adaptação às características físicas, químicas e biológicas e é inviabilizado o desenvolvimento sócio-econômico (IBAMA, 1990, p. 13)

Portanto, uma vez estabelecida a degradação da área minerada, há necessidade de intervenções para que se promova sua recuperação. De acordo com Sánchez (2013), uma área é considerada recuperada quando o ambiente entra em equilíbrio dinâmico ao meio físico, ou seja, em se tratando do solo, deve-se ter condições melhoradas para que a vegetação e comunidades bióticas possam se desenvolver neste ambiente, sendo importante efetuar um manejo adequado com o plantio de espécies arbóreas e reintrodução da fauna. Para esse autor, a recuperação ambiental visa tornar o ambiente degradado em condições para ser utilizado produtivamente, desde que seja sustentável.

A Lei n. 6.938 de 1981 que instituiu a Política Nacional do Meio Ambiente, traz importantes mecanismos para proteção ambiental, buscando impor a quem utiliza os recursos ambientais, fazer a adequada indenização e também deixar a área degradada

recuperada. Existem no Decreto N° 97.632 normas fundamentais ao meio ambiente e sua preservação:

Art. 3° A recuperação deverá ter por objetivo o retorno do sítio degradado a uma forma de utilização, de acordo com um plano preestabelecido para o uso do solo, visando a obtenção de uma estabilidade do meio ambiente.

Arranz-González (2011) aponta que, em áreas mineradas, lavradas a céu aberto, a conformação do terreno é o processo inicial visando o preenchimento da área minerada. Para isto a topografia do terreno é ajustada de modo que se assemelhe ao relevo local, através da cobertura da cava com o estéril. Posteriormente é feita a recomposição da camada superficial do solo com o espalhamento do *topsoil* que, segundo Rezende (2010), favorece a regeneração natural através do aproveitamento do banco de sementes existente.

Conforme Aumond (2007), os métodos que mais vêm sendo utilizados para recuperação de áreas mineradas são o plantio de mudas e a regeneração natural. Porém, também tem sido empregada a técnica nucleadora com sucesso (FILHO et al., 2013); o uso de leguminosas (NOGUEIRA 2012) e chuva de sementes e semeadura direta. Lima (2014) comenta que é interessante a realização do uso integrado de regeneração natural e plantio de mudas para que haja uma rápida cobertura do solo, evitando que o mesmo fique exposto por um longo período, devido ao processo de regeneração natural ser lento, o que compromete a rápida cobertura do solo. Além disso, a integração desses dois métodos possui a vantagem do incremento de mais espécies nas áreas à serem recuperadas.

É importante considerar que o processo de recuperação de uma área degradada muitas vezes é lento e o sucesso depende de vários fatores. Alguns autores apontam a importância do *topsoil* como fonte de propágulos, nutrientes, matéria orgânica e microorganismos (GRIFFITH, 2005; SKRINDO & PEDERSEN, 2004). Porém, o tempo de armazenamento pode influenciar na qualidade do *topsoil*, acarretando em perda da fertilidade, perda na viabilidade das sementes contidas nele e diminuição da atividade biológica. Em função disto, o *topsoil* pode ser armazenado por um período máximo de dois anos (IBAMA, 1990). Além disso, muitas vezes se tem uma diversidade de materiais usados para recomposição do terreno, com mistura de camadas do solo (estéril e *topsoil*) o que pode comprometer a qualidade da área recuperada com perda da fertilidade do solo que é um importante recurso para a recuperação da área minerada (LAD & SAMANT, 2015).

Segundo Almeida e Sánchez (2015), o substrato fornece o suporte físico para as plantas, como também, os nutrientes e o ambiente necessário para a fauna do solo, de modo que suas características se modificam com o passar do tempo como resultado das medidas de recuperação. Corrêa & Bento (2010) destacam a importância de acompanhar a qualidade física, química e biológica do substrato quando se tem como objetivo o reestabelecimento da vegetação nativa.

Outro fator importante é a escolha adequada das plantas que, feita de forma correta, permitirá alcançar sucesso na revegetação e estabilizar áreas degradadas e instáveis que tenham suscetibilidade à erosão (PEREIRA, 2006). Desta maneira recomenda-se que as mudas utilizadas sejam de espécies nativas adaptadas às condições do ambiente que se deseja recuperar (REISSER JUNIOR et al., 2008; SAIDELLES et al., 2009).

Diversos estudos vêm sendo realizados a respeito da recuperação de áreas degradadas por mineração de bauxita, entre os quais citam-se: Qualidade física do rejeito de bauxita (GUIMARÃES et al. 2018); Restauração após mineração de bauxita pela Alcoa World Alumina Austrália na Austrália Ocidental (GARDNER & BELL, 2007); Processo de mineração e restauração da Alcoa, Austrália (KOCH, 2007); Impacto da Mineração de Bauxita no Solo no Estado de Maharashtra, Índia (LAD & SAMANT, 2015); Revegetação de áreas de mineração de bauxita com leguminosas em Porto Trombetas-PA (AVILIO et al, 1996); Vegetação, biomassa microbiana e características químicas do solo reabilitado após mineração (RUIVO et al., 2001); Monitoramento da recuperação ambiental de áreas de mineração de bauxita em Porto Trombetas-PA (REIS, 2006). Neste contexto a maioria dos estudos avaliam os diversos modelos de recuperação, mas, por outro lado, percebe-se que a caracterização morfológica e física dos solos, informações a respeito da qualidade do substrato e evolução pedogenética de solos construídos após a mineração de bauxita devem ser mais estudadas. Um exemplo é o estudo realizado por Ruivo et al. (2002), abordando a caracterização micropedológica em conjunto com dados físicos e químicos de solos reabilitados após exploração de bauxita em Porto Trombetas (PA).

De maneira geral, em solos construídos após mineração há modificações nos atributos físicos, químicos e biológicos. Souza (2014) realizou a caracterização morfológica, física e química dos solos de uma topossequência em área contaminada por rejeitos de mineração de chumbo. Neste estudo foi observado baixos teores de carbono

orgânico, fósforo, pH ácido, altos teores de alumínio trocável e a ocorrência de metais pesados, o que prejudicou o desenvolvimento e estabelecimento da vegetação nestes solos. Silva et al. (2006) realizaram um estudo sobre a caracterização química, física e mineralógica de estéreis e rejeito da mineração de ferro em Minas Gerais e constataram baixos teores de macronutrientes, micronutrientes e carbono orgânico. Os solos também apresentaram atributos físicos que dificultam o desenvolvimento radicular das plantas, como os elevados valores de densidade do solo. Neste sentido, a caracterização morfológica e física de solos construídos após a mineração se revela de grande importância, pois as informações adquiridas auxiliam na proposição de medidas mais eficientes para acelerar a recuperação, além de contribuírem para o aprofundamento do conhecimento e fornecerem subsídios para estudos posteriores, de modo a promover melhorias das práticas de recuperação de áreas mineradas por bauxita.

A carência de informações disponíveis a respeito dos processos pedogenéticos envolvidos na recuperação de áreas degradadas após a atividade de mineração de bauxita, bem como relacionadas ao comportamento físico-hídrico de solos recentemente construídos foi inspiração para o lançamento das questões expostas a seguir:

- Os métodos empregados na recuperação da área degradada e o tempo de recuperação foram suficientes para a evolução da pedogênese?
- Os métodos e a idade da recuperação das áreas alteradas foram suficientes para a recuperação dos atributos físico-hídricos do solo?

Em busca de respostas para estas questões propôs-se a caracterização de perfis do solo reconstruído em áreas submetidas à recuperação após a mineração de bauxita, buscando-se registrar evidências de pedogênese e pedalidade em função dos diferentes métodos e idades de recuperação. Além disso, o estudo busca o entendimento do comportamento físico-hídrico dos solos construídos e submetidos aos diferentes métodos e tempos de recuperação em comparação ao solo sob condição natural. O presente trabalho tem como objetivo geral estudar a influência dos métodos e tempo de recuperação na pedogênese e no comportamento físico-hídrico de solos construídos após mineração de bauxita.

Dessa forma o trabalho foi estruturado nos seguintes capítulos:

- 1- Gênese de solos recentemente construídos após mineração de bauxita em Paragomina- PA.

2- Comportamento físico-hídrico de solos recentemente construídos após mineração de bauxita em Paragominas- PA.

1.1 REFERÊNCIAS

ALMEIDA, R. O. P. O.; SÁNCHEZ L. E. Indicadores da Qualidade do Substrato para Monitoramento de Áreas de Mineração Revegetadas. **Floresta e Ambiente** 22(2):153-163. 2015vvv

ARRANZ-GONZÁLEZ, J.C. Suelos mineros asociados a la minería de carbón a cielo abierto em España: una revisión. **Boletín Geológico y Minero**, 122:171-180, 2011.

AUMOND, J. J. **Adoção de uma nova abordagem para a recuperação de área degradada pela mineração**. 266f Tese (Doutorado em Engenharia Civil)-Universidade Federal de Santa Catarina – UFSC, 2007.

AVILIO, A. F; CAMPELO, E.F.C; DIAS, L.E.; FARIA, S. M. **Uso de leguminosas associadas a microrganismos na revegetação de áreas de mineração de bauxita em Porto Trombetas- Pa**. Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária – Centro Nacional de Pesquisa de Agrobiologia. 1996

BERTOL, I.; ALBURQUERQUE, J.A.; LEITE, D.; AMARAL, A.J. & ZOLDAN JUNIOR, W.A. Propriedades físicas do solo sob preparo convencional e semeadura direta em rotação e sucessão de culturas comparadas as do campo nativo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, 28:155-163, 2004.

BRASIL. Decreto n. 97.632 de 10 de abril de 1989. **Regulamenta o artigo 2º, inciso VIII, da Lei Federal nº 6.938/81, obrigando o empreendedor minerário a apresentar, ao órgão ambiental competente, plano de recuperação de área degradada. Brasília, DF, 1989.**

BULLOCK, P. & THOMPSON, M. L. Micromorphology of Alfisols. In: DOUGLAS, L.A. & THOMPSON, M.L., eds. Soil micromorphology and soil classification. **Madison, Soil Science Society of American**, 1985. p.15-47. (Special Publication, 15)

CHINN, C. & PILLAI, U.P.P. Self-repair of compacted Vertisols from Central Queensland. **Geoderma**, 144:491-504, 2008.

CONSTANTINO, V. R. L.; ARAKI, K.; SILVA, D. O; OLIVEIRA, W. Preparação de compostos de alumínio a partir da bauxita. **Revista Química Nova**, Vol. 25, nº 3, 2002.

CORRÊA R.S., BENTO M.A.B. Qualidade do substrato minerado de uma área de empréstimo revegetada no Distrito Federal. **Revista Brasileira de Ciência do Solo** 2010; 34(4): 1435-1443.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE PRODUÇÃO MINERAL – DNPM. **Anuário mineral estadual do Pará**, 2017.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA- EMBRAPA. Centro de Pesquisa Agropecuária do Trópico Úmido (Belém-Pará). **Laboratório de climatologia: normais climatológicas de Paragominas no período de 1980 a 1988**. Belém: Embrapa, 1986.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA — EMBRAPA. **Manual de métodos de análises de solo**. 2.ed. Rio de Janeiro, Ministério da Agricultura e do Abastecimento, 1997. 212p.

FILHO, N. L., SANTOS, G. R.; FERREIRA, R. L. **Comparando técnicas de nucleação utilizadas na restauração de áreas degradadas na Amazônia brasileira**. Rev. Árvore vol.37 no.4 Viçosa Jul/Ago. 2013.

GARDNER, J. H.; BELL, D. T. Bauxite mining restoration by Alcoa World Alumina Australia in Western Australia: social, political, historical, and environmental contexts. **Restoration Ecology**, Washington, v.15, n.4, p.3-10, dec, 2007.

GRIFFITH, J.J. O estado da arte de recuperação de áreas mineradas no Brasil. In: SIMPÓSIO NACIONAL DE RECUPERAÇÃO DE ÁREAS DEGRADADAS, 1., 1992, Curitiba. Curitiba: FUPEF, 1992. p. 77-82.

GUIMARÃES, L. A.O. P.; DIAS, L. E.; ROCHA, G. C.; ASSIS, I. R.; FERNANDES, R. B. A. Physical quality of bauxite tailing after a decade of environmental recovery. **Revista Ciência Agronômica**, vol.49 no.2, 2018

HYDRO. **Mineração de Bauxita**. Disponível em: <<http://www.hydro.com/pt/Aluminio/A-Hydro-no-Brasil/Sobre-o-aluminio/Ciclo-de-vida-do-aluminio/Mineracao-de-bauxita/>>. Acesso em 22 de julho de 2017.

INSTITUTO BRASILEIRO DE MEIO AMBIENTE E RECURSOS NATURAIS RENOVÁVEIS - IBAMA, **Manual de recuperação de áreas degradadas pela mineração: Técnicas de revegetação**. Brasília, 1990. 75p.

JAKOVAC, A. C. C. **O uso do banco de sementes florestal contido no topsoil como estratégia de recuperação de áreas degradadas**. 2007. 152 p. Dissertação (Mestrado em Biologia Vegetal) -Universidade Estadual de Campinas, Campinas - SP.

KOCH, J. M. Alcoa's mining and restoration process in South Western Australia. **Restoration Ecology**, Washington, v. 15, n. 4, p. 11-16, 2007.

LAD R. J. & SAMANT J.S. **Impact of Bauxite Mining on Soil: A Case Study of Bauxite Mines at Udgeri, Dist-Kolhapur, Maharashtra State, India**. International Research Journal of Environment Sciences. Vol. 4 (2), 77-83, February ,2015.

LIMA, A. C. S. M. **Avaliação da restauração de áreas degradadas pela mineração de bauxita, Paragominas - PA** Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais) – Universidade Federal Rural da Amazônia, 2014.

Manual de recuperação de áreas degradadas pela mineração: técnicas de revegetação/IBAMA. Brasília, 1090

McKEAGUE, J.A. & DAY, J.H. Dithionite and oxalate-extractable Fe and Al as aids in differentiating various classes of soils. **Can. J. Soil Sci.**, 46:13-22, 1966.

MEHRA, O.P. & JACKSON, M.L. Iron oxide removal from soils and clays by a dithionite-citrate system buffered with sodium bicarbonate. In: **CLAYS & CLAY MINERAL CONFERENCE**, 7., London, 1960. Proceedings. London, v.7, 1960. p.317-327.

MOREIRA, P.R. **Manejo do solo e recomposição da vegetação com vistas a recuperação de áreas degradadas pela extração de Bauxita, Poços de Caldas, MG.** 1994. 154f Tese (Doutorado em Ciências Biológicas)- Instituto de Biociências da Universidade Estadual Paulista “Julio de Mesquita Filho”, Rio Claro.

NOGUEIRA, N. O.; OLIVEIRA, O.M.; MARTINS, C. A. S.; BERNARDES, O. C. **Utilização de leguminosas para recuperação de áreas degradadas.** Enciclopédia Biosfera, Centro Científico Conhecer - Goiânia, v.8, N.14; p. – 2012

PEREIRA, A.R. **Como selecionar plantas para áreas degradadas e controle de erosão.** Belo Horizonte: Editora FAPI, 2006. 70p.

PINTO, A.; AMARAL, P.; SOUZA JR, C.; VERÍSSIMO, A.; SALOMÃO, R.; GOMES, G.; BALIEIRO, C. **Diagnóstico socioeconômico e florestal do município de Paragominas.** Belém: AMAZON, 2009. 65p. (Relatório Técnico).

QUINÕES, O. R. G.; JUNIOR; GIASSON; A. V. I.; E.; BISSANI; C. A.; DICK D. P.. Características de solos construídos após mineração de carvão relacionadas ao processo de construção e à composição do material utilizado. **Ciência Rural**, Santa Maria, v.38, n.6, p.1564-1571, set, 2008

REIS, A.; BECHARA, F. C.; TRES, D. R. **Nucleation in tropical ecological restoration.** Scientia Agricola, v.67, n.2, p.244-250, 2010.

REIS, L. L. **Monitoramento da Recuperação Ambiental de Áreas de Mineração de Bauxita na Floresta Nacional de Saracá-Taquera, Porto Trombetas (PA).** (Tese Doutorado-Agronomia e Ciência do Solo), Universidade federal rural do Rio de Janeiro. 2006

REISSER JUNIOR, Carlos. et al. Produção de mudas em estufas plásticas. **Revista Campo & Negócios**, 2008.

REZENDE, L. A. L. **Reabilitação de campos ferruginosos degradados pela atividade minerária no quadrilátero ferrífero.** 2010. 54p. Dissertação (Mestrado em Solos e Nutrição de Plantas) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa - MG.

RODRIGUES, T. E.; SILVA, R. das C.; SILVA, J. M. da L. da; OLIVEIRA JUNIOR, R. G. de; GAMA, R. J. N. F.; VALENTE, M. A. **Caracterização e classificação dos solos do município de Paragominas, Estado do Pará**. Belém: Embrapa, 2003. 51 p. (Série Documentos, n.162)

RUIVO, M. L. P.; SCHAEFER, C. E. G. R.; BARROS, N. F.; ALBUQUERQUE, M. A.; RIBEIRO, L. M. Caracterização Micropedológica de Solos Reabilitados Após Exploração de Bauxita em Porto Trombetas (PA). **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, 26:759-767, 2002

SAIDELLES, Fabio L. F. et al. Casca de arroz carbonizada como substrato para produção de mudas de tamboril-da-mata e garapeira. Seminário: **Ciências Agrárias., Londrina**, v. 30, suplemento 1, p. 1173-1186, 2009.

SAMPAIO, J. A.; ANDRADE, M. C.; DUTRA, A. J. B. Bauxita. In: Rochas & Minerais Industriais: Usos e Especificações. CETEM, Rio de Janeiro, Cap. 13, p. 279-304. 2005.

SANTOS, R.D.; LEMOS, R.C.; SANTOS, H.G.; KER, J.C. & ANJOS, L.H.C. **Manual de descrição e coleta de solo no campo**. 5.ed. Viçosa, MG, SBCS/EMBRAPA/CNPS, 2005.

SÁNCHEZ, L. E. **Avaliação de impacto ambiental: conceitos e métodos**. São Paulo: Oficinas de Textos, 2013, 2º ed.

SILVA, E. N.; SANTANA, A. C. Modelos de regressão para estimação do volume de árvores comerciais, em florestas de Paragominas. **Revista Ceres**, v.61, n.5, p.631-636, 2014.

SILVA, P.; FONTES, M. P. F.; COSTA, L. M.; BARROS, N. F. Caracterização química, física e mineralógica de estéreis e rejeito da mineração de ferro da mina de Alegria, Mariana-MG Gilson. **Pesquisa Agropecuária Tropical**, v. 36, n. 1, p. 45-52, 2006

SINDICATO DAS INDUSTRIAS MINERAIS DO PARÁ- SIMINERAL. **Boletim da economia mineral do Pará no período de janeiro a junho de 2018**. <<http://simineral.org.br/mineracao/mineracao-para>>. Acessado em 15 de outubro de 2018.

SKRINDO, A.B. & PEDERSEN, P.A. Natural revegetation of indigenous roadside vegetation by propagules from Topsoil. *Urban Forestry & Urban Greening*. V3, n.1. p. 29-37, 2004

SOUZA, J. P.; **Caracterização de solos de uma topossequência, em área contaminada por rejeitos de mineração de chumbo**. 2014. 50f, Dissertação (Pós- Graduação em Solos e Qualidade de Ecossistemas)- Universidade Federal do Recôncavo da, Bahia Cruz das Almas.

VAN GENUCHTEN, M. T. A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. **Soil Science Society America Journal**, Madison, v. 44, p. 892-898, 1980.

ZHANG, R. Determination of soil sorptivity and hydraulic conductivity from the disk infiltrometer. **Soil Science Society America Journal**, Madison, v. 61, p. 1024-1030, 1997.

ZHANG, Z. Q., SHU, W. S., LAN, C. Y., WONG, M. H. Soil seed bank as an input of seed source in revegetation of lead/zinc mine tailings. **Restoration Ecology**, ashington, v.9, n.4, p.378-384, 2001.

2 GÊNESE DE SOLOS RECENTEMENTE CONSTRUÍDOS APÓS MINERAÇÃO DE BAUXITA EM PARAGOMINAS-PA

RESUMO

A atividade minerária é de grande importância econômica para o Produto Interno Bruto (PIB) do país, porém gera impactos ambientais, com alterações no solo, água, fauna e flora local devido à remoção da vegetação e da camada mais fértil do solo. O objetivo deste trabalho foi estudar a pedogênese de solos construídos após mineração de bauxita em Paragominas, Pará. Foram selecionadas áreas de plantio de mudas e regeneração natural, implantadas em 2009 e 2014, nucleação implantada em 2014 e uma área sob floresta nativa, cujo solo serviu como referência no estado natural. Em cada área foram abertas 4 trincheiras de 2 m de largura x 2 de comprimento x 1 a 1,50 m de profundidade e na floresta uma trincheira de 2 x 2 x 2. Foram realizadas descrições morfológicas e análises físicas, químicas e mineralógicas dos solos e confeccionadas lâminas de seção delgada para evidenciação das feições de evolução e/ou degradação da pedalidade. Morfológicamente os perfis do solo construído nas áreas sob recuperação apresentaram transição abrupta entre as camadas e/ou horizontes *topsoil* - estéril e são bem distintos do perfil do solo sob floresta. Todos os solos apresentam textura muito argilosa e fertilidade baixa, incluindo o da floresta. A mineralogia da argila silicada é caulinítica e a da oxidica é goethítica em todo o perfil do solo natural e no *topsoil* dos solos construídos que, na camada de estéril, apresentaram contribuição da hematita. As alterações mais comuns nos solos construídos, com relação ao solo sob floresta são: compactação; pulverização de agregados em superfície nas áreas de 2 anos; presença de camadas concrecionárias próximas à superfície; camadas com gibbsita e baixíssima CTC próximas a superfície. O tempo de recuperação e os organismos contribuíram positivamente para o desenvolvimento da pedalidade contemporânea nos solos construídos a partir de 4 anos de recuperação. Dentre os sistemas estudados, os de regeneração natural com 7 e 9 anos apresentaram melhor evolução pedogenética nos primeiros centímetros superficiais, com formação de um fino horizonte A contínuo com pedalidade contemporânea e organização estrutural mais próxima à encontrada no horizonte A1 do solo inalterado sob floresta, mostrando ser o sistema de recuperação do solo que mais evoluiu até esta fase de estudo.

Palavras-chave: Solos alterados. Recuperação do solo. Micromorfologia. Amazônia. *Technosol*.

ABSTRACT

The mining activity is of great economic importance for the country's Gross Domestic Product (GDP), but it generates environmental impacts, with changes in the soil, water, fauna and local flora due to the removal of vegetation and the most fertile layer of the soil. The objective of this work was to study the pedogenesis of soils built after bauxite mining in Paragominas, Pará. Seedling planting and natural regeneration areas were selected, implanted in 2009 and 2014, nucleation implanted in 2014 and an area under native forest, whose soil served as a reference in the natural state. In each area, 4 trenches were opened 2 m wide x 2 long x 1 to 1.50 m deep and in the forest a trench 2 x 2 x 2. Morphological descriptions and physical, chemical and mineralogical analyzes of the soils were carried out and thin section blades were made to show the features of evolution and / or degradation of pedals. Morphologically, the profiles of the soil built in the areas under recovery showed an abrupt transition between the topsoil - sterile layers and / or horizons and are quite different from the soil profile under forest. All soils have a very clayey texture and low fertility, including that of the forest. The mineralogy of silicate clay is kaolinitic and that of oxidic clay is goethitic throughout the profile of the natural soil and in the topsoil of the built soils that, in the sterile layer, presented hematite contribution. The most common changes in constructed soils, with respect to soil under forest, are: compaction; spraying of aggregates on the surface in 2-year areas; presence of concrete layers close to the surface; layers with gibbsite and very low CTC close to the surface. The recovery time and the organisms contributed positively to the development of contemporary pedals in soils built after 4 years of recovery. Among the studied systems, those of natural regeneration with 7 and 9 years old, presented a better pedogenetic evolution in the first superficial centimeters with the formation of a thin horizon A continuous with contemporary pedality and structural organization closer to that found in horizon A1 of the unchanged soil under forest, showing that it is the soil recovery system that has evolved the most up to this stage of study.

Keywords: Altered soil. Soil recovery. Micromorphology. Amazon. Technosol

2.1 INTRODUÇÃO

Solo é uma junção de corpos naturais e dinâmicos que cobrem a superfície terrestre, formado a partir de materiais de origem orgânicos e minerais, pela ação de processos pedogenéticos que ocorrem ao longo do tempo por efeito do clima, organismo e relevo. Apresentam seções relativamente paralelas à superfície, denominadas de camadas e/ou horizontes. Os horizontes pedogenéticos se diferenciam das camadas por apresentarem evidências da ação dos processos pedogenéticos, enquanto que as acamadas são pouco ou nada modificadas por estes processos e conservam características do material de origem (SIBCS, 2018).

A ação do homem sobre a natureza, através da atividade produtiva, tem promovido grandes alterações no solo, principalmente no que diz respeito às áreas mineradas que compõe grandes volumes de solo alterados com fortes impactos nos ecossistemas, causando muitas vezes problemas de poluição nos locais de ocorrência (SILVA et al. 2011, 2013). Neste contexto, Daws et al. (2015) afirmam que a atividade minerária com lavra a céu aberto é uma das que mais causam degradação ambiental, por ser necessária a remoção da vegetação e das camadas edáficas mais férteis que sobrepõe o minério de interesse. Este processo gera alterações que se refletem no solo, água, fauna e na flora local e podem levar ao desencadeamento de processos erosivos, perda da fertilidade e consequente perda de qualidade do solo (MACDONALD et al., 2015). Assim sendo, a recuperação destas áreas se torna fundamental para remediação da degradação ocasionada pela mineração, tornando-se necessário o planejamento de alternativas para reverter o cenário degradado. Porém, nas áreas reabilitadas, o tipo, tamanho dos equipamentos e as operações de preparo do solo vão determinar a precisão da construção do solo (SHORT et al., 2000).

É neste contexto que a caracterização do processo de formação dos solos construídos ganha importância, pois normalmente estes podem apresentar, entre diversas alterações, a degradação da estrutura nas camadas superficiais e subsuperficiais, formação de camadas maciças e reempacotamento do solo devido a sua intensa modificação em função do maquinário pesado no processo de construção (KÄMPF et al., 1997; RUIVO et al., 2002). Os perfis de solos construídos após a mineração podem ser formados de várias partes do material geológico originário. Desta forma exibem texturas e espessura de camadas ou horizontes variáveis, transições abruptas e onduladas, além de coloração

variada que se devem à mistura de matérias nas operações da mina à céu aberto e ao processo de construção (KÄMPF et al., 1997; CAMPOS et al., 2003).

A *World Reference Base for Soil Resources* (WRB, 2014), que consiste em um sistema de classificação de solos sustentado pelo apoio da *International Union of Soil Sciences* (IUSS) e da *Agriculture Organization of the United Nations* (FAO), classifica os solos construídos como *Anthrosols* e *Technosols*. A classe dos *Anthrosols* inclui solos que foram profundamente modificados por diversas atividades, com a adição de materiais orgânicos, minerais, carvão, resíduos domésticos, irrigação e cultivo, são característicos e encontrados em regiões em que se pratica a agricultura há muito tempo. O termo *Technosol* se refere à classe de solos em que há o predomínio de propriedades e pedogênese formadas a partir de técnicas empregadas no mesmo, sendo muitas vezes referido como solos urbanos ou solos de mina, porém a classificação destes solos de mina não é simples devido a sua grande diversidade de matérias que os originam.

No Sistema Brasileiro de Classificação de Solos não há, até então, uma classe que contemple os solos construídos e que tratem da Ordem dos Antropossolos. Neste sentido Curcio et al. (2004) lançam uma proposta para inclusão desta nova Ordem no SIBCS, em que estes solos vão compreender volumes formados a partir de modificações e intervenções antrópicas, caracterizando os solos construídos.

Solos construídos pós mineração e solos naturais apresentam diferenças nas suas características morfológicas. Os solos naturais normalmente têm seu desenvolvimento através de processos de formação que atuaram durante milhares de anos, dando origem a horizontes distintos, enquanto que os solos construídos são jovens e se desenvolvem a partir de material heterogêneo oriundo dos processos de mineração, formando diferentes camadas de espessura variadas e muitas vezes sem estruturas granulares no solo (SCHAFER et al., 1980). O estudo de micromorfologia do solo possibilita obter informações pertinentes acerca da gênese destes solos em função das observações da estrutura e arranjo entre partículas (NUNES et al., 2000) e contribui no incremento de informações à descrição do perfil do solo e às observações feitas em campo (OLIVEIRA et al., 2000).

Devido à grande diversidade de materiais empregados na construção dos solos de mina, às drásticas alterações de arranjo estrutural e às diferentes condições de

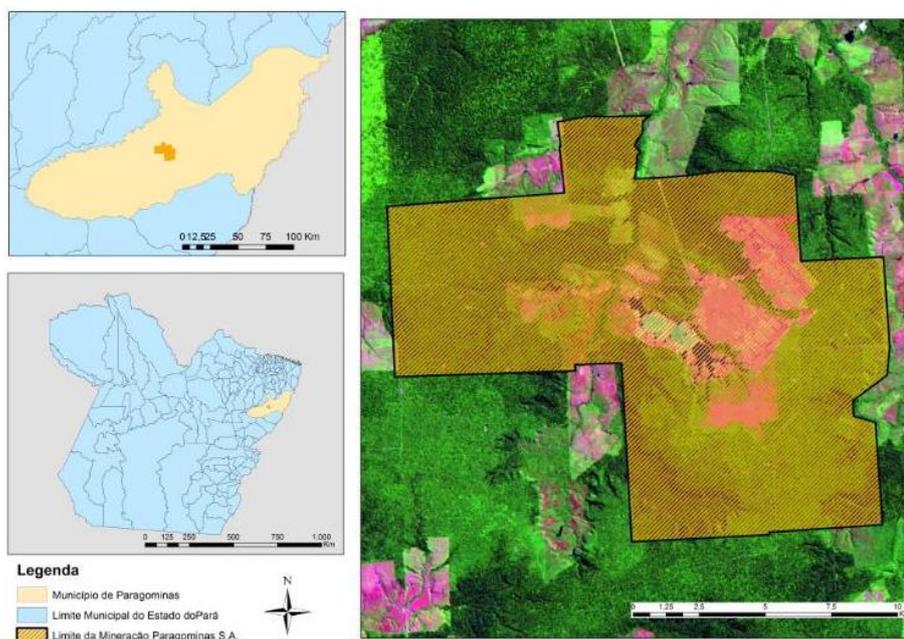
conformação e capeamento do terreno e técnicas empregadas na recuperação, bem como à eminente necessidade de se acelerar o tempo de recuperação das áreas impactadas, explicita-se aqui a necessidade de estudos específicos que retratem as condições atuais dos solos construídos e sua evolução genética. Dessa forma, as caracterizações morfológicas e micromorfológicas e pesquisas sobre a física, a química e a mineralogia destes solos são ferramentas importantes para o acompanhamento da evolução da pedaliada e da nova pedogênese sobre o substrato alocado nas áreas em recuperação. Esse conhecimento pode propiciar uma melhor compreensão das técnicas de recuperação empregadas e, entre estas, quais têm mostrado maior eficiência na recuperação de áreas mineradas por bauxita. Com base na hipótese de que os processos pedogenéticos são pouco percebidos em solos de mina muito recentes, o presente estudo teve por objetivos estudar as alterações morfológicas químicas, físicas e mineralógicas ocorridas nestes solos a partir de sua construção, tendo como parâmetro de comparação o solo natural sob floresta, bem como avaliar se os métodos e o tempo de recuperação foram suficientes para promover a evolução da pedogênese nas áreas sob recuperação ambiental, após mineração de Bauxita, em Paragominas Pará.

2.2. MATERIAL E MÉTODOS

2.2.1. Caracterização da área de estudo e dos processos de mineração e construção do solo.

O estudo foi desenvolvido em área de mineração de bauxita pertencente à empresa Mineração Paragominas S.A., no Platô Miltônia 3 (3°15'38"S e 47°43'28"W), a 70 km do município de Paragominas (Figura 1), com altitude de 150 m, caracterizado por uma superfície tabular, aplainada e bastante recortada (HYDRO, 2016). O clima da região é do tipo "Aw", conforme a classificação de Köppen-Geiger, caracterizado como quente e úmido com estações de chuva e de seca bem definidos. A temperatura média anual é de 26,3° C e com umidade relativa do ar em torno de 81% na média anual (BASTOS et al., 2006). A tipologia florestal da região caracteriza-se em três subtipos: floresta densa de terra baixa, floresta densa submontana e floresta densa aluvial (PINTO et al., 2009). Os solos predominantes na região da mina são classificados como Latossolo Amarelo Distrófico, com textura média a muito argilosa (EMBRAPA, 1999).

Figura 1- Localização do Platô Miltônia 3, área de extração minerária da empresa Mineração Paragominas S.A, no município de Paragominas, PA.



Fonte: Mineração Paragominas S.A.

A jazida de bauxita nas áreas da Mineração Paragominas S.A. geralmente se apresenta em uma camada mineralizada horizontal e sob um capeamento com espessura média de 11,4 m, composto de material estéril (do horizonte B até o contato com a bauxita) e *topsoil* (geralmente horizontes A e transicionais para B). A mineração é realizada a céu aberto, em um processo conhecido como *strip mining method* (mineração em tiras ou faixas), após a remoção da cobertura vegetal, separação e armazenamento do *topsoil* e deslocamento do estéril. Esse método consiste em lavar o depósito em faixas paralelas, com aproximadamente 30 metros de largura e comprimentos variáveis (400 m a 1000 m), com o estéril sendo disposto na área da tira anteriormente lavrada. A conformação morfológica do terreno é realizada com auxílio de Tratores de Esteiras D8 para espalhamento e nivelamento superficial do estéril, buscando a aproximação do terreno à do relevo original. A partir disso ocorre a deposição e espalhamento do *topsoil* sobre estéril nivelado. Posteriormente são utilizados três diferentes métodos para recuperação das áreas mineradas a serem reflorestadas: plantio de mudas, regeneração natural e nucleação (Quadro 1).

Assim, foram estudadas áreas sob processo de recuperação com regeneração natural, plantio de mudas de espécies nativas e nucleação, comparando os sistemas e

tempo de implantação 2009 e 2014, respectivamente, sendo então: regeneração natural (**RN09 e RN14**); plantio de mudas (**PL09 e PL14**); e nucleação (**N14**). Além disso, foi avaliada uma área sob floresta Ombrófila densa alterada, com registo de exploração madeireira convencional realizada no ano de 2003 (**F**), cujo solo serviu como referência no seu estado natural, totalizando seis áreas de estudo.

Quadro 1- Descrição da metodologia utilizada para implantação das técnicas de recuperação de área degradada em Paragominas, Pará.

Período de implantação	Preparo da área	Espaça- mento	Adubação	Manutenção da área	Replântio/ Enriquecimento
-----RN09-----					
junho de 2009	nivelamento e recobrimento do estéril com o <i>topsoil</i> com espessura média de 40 cm, para favorecer a regeneração através dos propágulos presentes no solo armazenado; isolamento da área para que não houvesse intervenção antrópica	-	-	-	
-----PL09 ¹ -----					
abril de 2009 ¹	nivelamento e recobrimento do estéril com o <i>topsoil</i> com espessura média de 40 cm; após, realizou-se subsolagem até 60 cm de profundidade	3m x 3m, com 1.111 mudas/ha em covas de 0,30 m x 0,30 m x 0,30 m	aplicação conjunta da subsolagem com o fosfato natural reativo (33% P ₂ O ₅ Total, 10% solúvel em ácido cítrico); As covas foram adubadas com 200 g de NPK - 06-30-06 (0,5% B; 0,5% Cu; 0,5% Zn) e 2,5 kg de adubo orgânico.	aplicação de formicida na dosagem de 10 g/m ² em uma distância de até 100 m das bordas do reflorestamento do formigueiro e capinas manuais para eliminação de todas às plantas invasoras em área total durante o primeiro ano.	após 15 dias de implantação foi realizada vistoria para substituição de plantas mortas.

¹ PL09: No relatório Consolidado do PRAD Período 2009-2017, indicam dificuldade no preparo do solo na área PL09 devido ao alto índice pluviométrico na ocasião (janeiro a maio): “Dificuldades de raspagem do solo devido atolamento de maquinário”.
O preparo do solo no sistema PL09 foi realizado antes do sistema RN09.

Continuação

Período de implantação	Preparo da área	Espaçamento	Adubação	Manutenção da área	Replântio/ Enriquecimento
-----RN14-----					
junho de 2014	nivelamento e recobrimento do estéril com o <i>topsoil</i> com espessura média de 40 cm; isolamento da área para que não houvesse intervenção antrópica	-	-	-	plantio de mudas para enriquecimento da capoeira em 52,34 hectares
-----PL14-----					
janeiro de 2014	nivelamento e recobrimento do estéril com o <i>topsoil</i> com espessura média de 40 cm; subsolagem até 60 cm de profundidade	3m x 3m, com 1.111 mudas/ha em covas de 0,30 m x 0,30 m x 0,30 m	aplicação conjunta de Fosfato Natural Reativo (33% P ₂ O ₅ Total, 10% solúvel em ácido cítrico); 2,5 kg/cova de composto orgânico (formado por caroço de açaí carbonizado, palha de arroz carbonizado, cama de frango e esterco de ovino curtidos e triturados, na proporção de 20 % de cada componente)	aplicação de formicida na dosagem de 10 g/m ² em uma distância de até 100 m das bordas do reflorestamento do formigueiro; coroamento realizado em 147,44 hectares	Foi replantada uma área de 30,7 hectares
-----N14-----					
dezembro de 2014	nivelamento do estéril e distribuição irregular do <i>topsoil</i> , na forma de pilhas, para criar pequenas rugosidades no terreno; entre as pilhas de <i>topsoil</i> foram formadas pilhas de galharia (galhos, folhas e material reprodutivo) da vegetação; plantio de mudas em 15,76 hectares	3m x 3m entre plantas	fertilizante NPK 06-30-06 na base de 300g/cova, no plantio, e mais 160g/planta em cobertura.	-	replântio de aproximadamente 430 mudas em 0,86 ha na área de nucleação devido à mortalidade de espécies que não se adaptaram as condições do solo.

Nos sistemas RN09 e PL09 a área em processo de recuperação é de 21,04 ha e 71,44 ha, respectivamente. E nos sistemas RN14, P14 e N14 são de 238,6 ha, 240,36 ha e 44,78 ha respectivamente (Figuras 2, 3 e 4).

Figura 2- Sistemas plantio de mudas 2009_7 (A) e 2014_2 (B).



Fonte: Autora.

Figura 3- Sistema regeneração natural 2009_7 (A) e 2014_2 (B).



Fonte: Autora.

Figura 4- Sistema nucleação 2014_2 (A) e nucleação 2014_4 (B).



Fonte: Autora.

2.2.2. Descrição morfológica e micromorfológica e amostragem do solo

Nas áreas implantadas em 2009 e em 2014 foram descritos quatro perfis, sendo que, para cada área, 3 foram descritos no ano de 2016 e um no ano de 2014. No entanto, dentro de cada área, optou-se por apresentar os resultados apenas de um dos descritos em 2016, mais antigo, e do descrito em 2014, mais recente. Portanto, são apresentados os perfis das áreas em recuperação com 7 e 9 anos, instaladas em 2009 e com 2 e 4 anos, das áreas implantadas em 2014. Além disso, foi feita a descrição do perfil do Latossolo Amarelo Distrófico, textura muito argilosa, para parâmetros de comparação entre os solos construídos e o original sob condições naturais.

No Quadro 2 está exposta a relação de perfis descritos nas áreas em recuperação com os respectivos anos de implantação da recuperação e da descrição morfológica/coleta de amostras e idade da recuperação.

Quadro 2- Relação dos perfis avaliados nas áreas de recuperação e na floresta nativa

Sigla do perfil	Sistema	Ano de implantação	Ano de descrição	Idade da recuperação
FLO	Floresta nativa	-	-	-
RN09_7	Regeneração natural	2009	2016	7 anos
PL09_7	Plantio de mudas	2009	2016	7 anos
RN09_9	Regeneração natural	2009	2018	9 anos
PL09_9	Plantio de mudas	2009	2018	9 anos
RN14_2	Regeneração natural	2014	2016	2 anos
PL14_2	Plantio de mudas	2014	2016	2 anos
N14_2	Nucleação	2014	2016	2 anos
RN14_4	Regeneração natural	2014	2018	4 anos
PL14_4	Plantio de mudas	2014	2018	4 anos
N14_4	Nucleação	2014	2018	4 anos

As dimensões das trincheiras para exposição dos perfis foram: 2 m de comprimento x 2 de largura x 1 a 1,50 m de profundidade no solo das áreas em recuperação e 2 m de comprimento x 2 m de largura x 2 m de profundidade no solo sob floresta. A descrição

morfológica detalhada dos perfis do solo natural e dos solos construídos foi realizada segundo o Manual de Descrição e Coleta de Solo no Campo (SANTOS et al., 2013).

A análise meso e micromorfológica nos sítios sob processos de recuperação foi realizada em amostras coletadas no ano de 2016, ou seja, quando as áreas tinham 7 anos (PL09_7 e RN09_7) e 2 anos (RN14_2, PL14_2 e N14_2) de condução da recuperação. Esta avaliação foi feita com o propósito de caracterizar as alterações estruturais decorrentes do processo de construção do solo, bem como registrar o desenvolvimento da nova pedalidade e feições pedogenéticas iniciais nos solos construídos sob diferentes métodos e tempos de recuperação, tendo como referência o solo original sob floresta. Para isso, amostras indeformadas foram coletadas em todas as camadas/horizontes dos perfis em caixas de Kubiena. As amostras foram secas ao ar e impregnadas com resina Epóx Gy 279 misturada ao endurecedor Aradur 64 na proporção 2:1. Posteriormente, as amostras indeformadas e impregnadas foram levadas para o Laboratório de Laminação, pertencente ao Programa de Pós-Graduação em Geologia e Geoquímica da Universidade Federal do Pará, para serem realizados os cortes, desbastes, polimentos e confecção das lâminas delgadas (7 x 5 cm). O arranjo estrutural foi observado em lupa binocular e microscópio ótico com luz transmitida e incidente. A interpretação das lâminas delgadas obedeceu uma hierarquia mediante as escalas de observações. A descrição micromorfológica do solo foi realizada segundo Brewer (1964), Bullock et al. (1985) e Castro (2008).

2.2.3. Análise química

Para a caracterização dos atributos químicos em todas as camadas e ou horizontes dos perfis dos solos, o pH foi determinado em água e em KCl 1 mol L⁻¹. O fósforo disponível, os cátions básicos trocáveis (Ca⁺², Mg⁺² e K⁺), a acidez potencial (H + Al⁺³), matéria orgânica foram analisados conforme Embrapa (1997). A partir da obtenção dos valores dos cátions trocáveis foram calculadas: soma de bases (SB) = Ca²⁺ + Mg²⁺ + K⁺; capacidade de troca de cátions (CTC) = SB + (H + Al³⁺); saturação por bases (V%) = (SB/ CTC) * 100 e saturação por alumínio (m%) = (Al³⁺/CTC_E) * 100 (EMBRAPA, 1997).

2.2.4. Análise física

Para obter às variáveis de densidade do solo e porosidade total, foram coletadas amostras indeformadas em todas às camadas e ou horizontes dos solos descritos. Para coleta esculpiu-se monólitos medindo aproximadamente 10 a 10 por 10 cm (1000 cm³),

posteriormente, impregnou-se os monólitos com uma mistura de cola, água e álcool hidratado em uma proporção de 5:4:1, respectivamente, seguindo a metodologia de Viana (2008). A porosidade total (Pt) foi calculada conforme a equação $Pt = (1 - D_s/D_p)$, sendo D_p considerado igual a $2,65 \text{ kg dm}^{-3}$, média de solos minerais.

Foram coletadas amostras deformadas em todas as camadas dos perfis dos solos estudados a fim de se realizar a análise granulométrica. As amostras foram secas ao ar e peneiradas para obtenção de terra fina seca ao ar (TFSA). Em seguida as amostras de solo foram enviadas para o Laboratório de Física do Solo da Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz (ESALQ-USP), onde foi realizada a análise pelo método do densímetro, conforme Embrapa (1997).

2.2.5. Análise Mineralógica

A caracterização mineralógica foi realizada através de análise de difração de raios-X (DRX) das frações areia, silte e argila, conforme Embrapa (1997) e Camargo et al. (2009), em amostras coletadas nas camadas e horizontes dos perfis dos solos expostos em floresta e nas áreas em processo de recuperação. Foram utilizadas amostras de TFSA, nas quais foram realizadas a destruição da matéria orgânica com H_2O_2 (80vol). Após a oxidação da matéria orgânica realizou-se a remoção dos óxidos de ferro através do tratamento com citrato de sódio, bicarbonato de sódio e ditionito de sódio (Mehra e Jackson, 1960). Em seguida efetuou-se a separação granulométrica da fração areia com peneira de 270 mesh e separação da fração silte e argila por centrifugação. As lâminas de TFSA, areia e silte foram montadas em pó. As lâminas da fração argila foram preparadas de forma orientada e saturadas com potássio e analisadas a 25 e após aquecimento a 300 e 500 °C.

A análise de difração de raios-X foi realizada em difratômetro de bancada Miniflex II da Rigaku, com radiação $\text{CuK}\alpha$ (0,154056 nm), a 30 kV e 15 mA, com filtro de Ni e monocromador de grafite, num intervalo de análise de 5 a 50° 2 θ ; 5 segundos /passo e de 0,02° 2 θ . Para o padrão interno da amostra foram utilizados os reflexos do quartzo. O preparo das laminas e a DRX foram realizadas no Laboratório de Mineralogia do Solo, da Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz (ESALQ-USP).

Os difratogramas foram gerados no programa Match Software versão 3.10.1.169 e os minerais foram identificados pelas distâncias basais de acordo com Chen, 1977, Resende et al. 2011 e Brindle & Brown (1980).

2.2.6 Vegetação

O inventário florestal foi feito no ano de 2018, ou seja, quando as áreas de 2019 estavam com 9 anos e as de 2014 com 4. Detalhes estão no capítulo 2 desta tese.

2.3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

2.3.1 Abundância de plantas no estrato superior

Para auxiliar no entendimento do ambiente e interpretação das características de solos é apresentada a Tabela 1 com a média da abundância de plantas no estrato superior (PAES, DAP > 5 cm) e os até 5 gêneros mais frequentes e seus percentuais de ocorrência obtidos para floresta referência e para as áreas em recuperação instaladas em 2009 e 2014 está exposta na Tabela 1

Tabela 1– Abundancia de plantas no estrato superior e relação dos até 5 gêneros mais frequentes e seus percentuais de ocorrência na floresta e nas áreas em recuperação em estudo.

Sistemas	Abundância (ind ha ⁻¹)	Relação dos até 5 gêneros mais frequentes na área e (percentual de ocorrência)
FLO	1310 a	<i>Apeiba; Guatteriat; Talisia; Inga; Chrysophyllum</i> -----(43,5%)
RN09_9	1162 ab	<i>Croton; Byrsonima; Cecropia; Casearia; Vismia;</i> -----(95,1%)
PL09_9	430 c	<i>Inga; Astronium; Acacia; Byrsonima; Caesalpinia</i> -----(41,1%)
RN14_4	280 d	<i>Croton; Solanum; Vismia; Solanum; Cecropia.</i> ----- (96,4%)
PL14_4	383 cd	<i>Solanum; Croton; Schizolobium; Adenanthera; Ceiba;</i> ----- (61,7%)
NU14_4	616,7 bc	<i>Cecropia; Solanum-</i> ----- (99,5%)

n=15; médias seguidas de mesma letra não diferem entre si pelo teste de Tukey (5%)

O sistema de regeneração natural, instalado em 2009 apresentou valor de abundância de plantas no estrato superior (APES) equivalente ao obtido na floresta referência (FLO), sendo que ambos apresentaram médias de APES superior à obtida na área de PL09_9 (Tabela 1). Este, por sua vez, igualou-se à N14_4, PL14_4. Não foram encontradas diferenças entre as médias de APES dos sistemas instalados em 2014_4 e, apesar da diferença do tempo de condução, N14_4 não diferiu de RN09_9. No entanto, N14_9 apresentou- se colonizada quase que totalmente por *Cecropia* e *Solanum*, que não cobrem efetivamente o solo (ALMEIDA, 2016).

2.3.2 Características Morfológicas

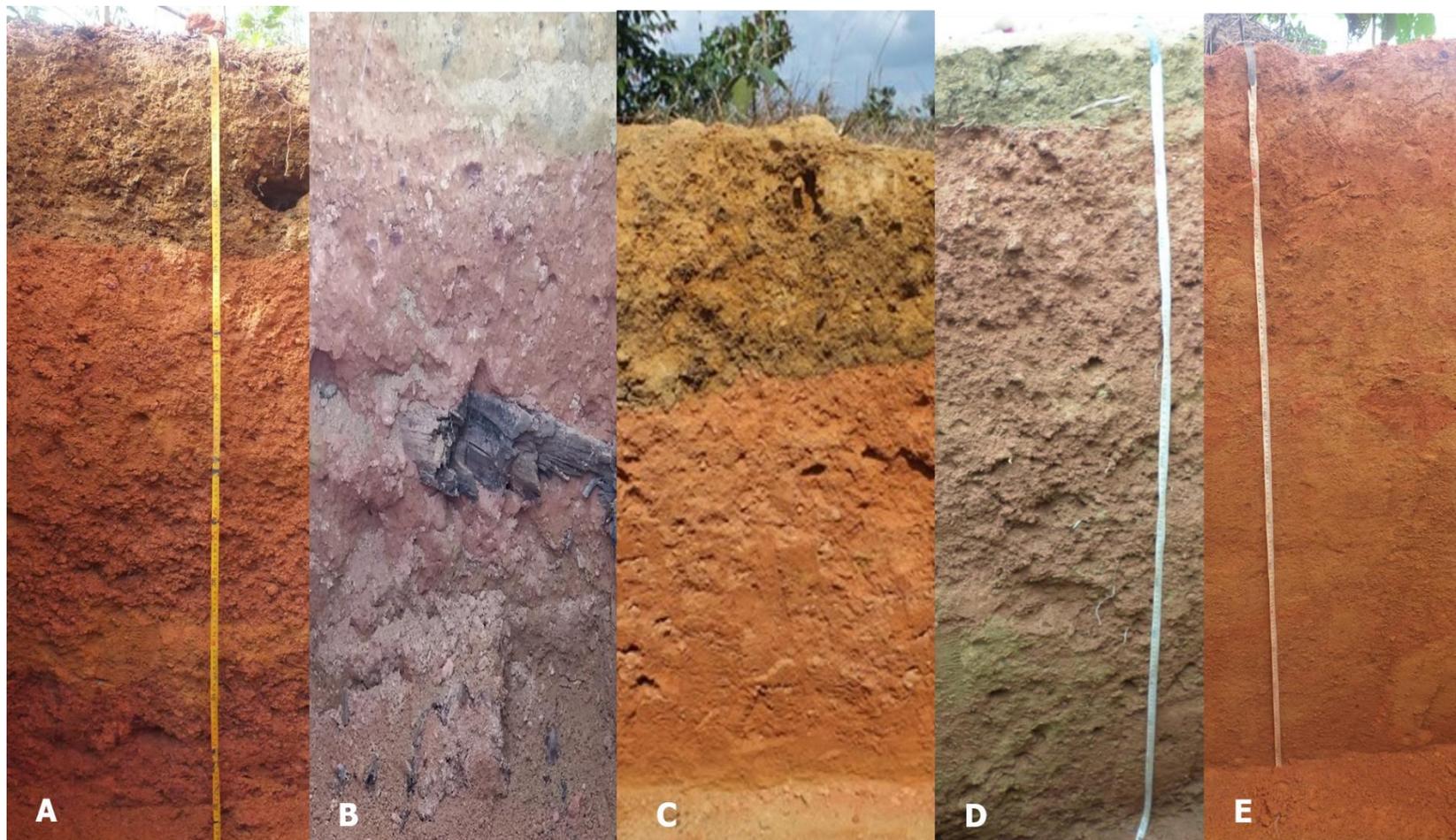
Em relação ao solo natural, os solos de mina contrastam em relação à disposição de horizontes/camadas e arranjo estrutural que são fortemente alterados. Camadas concrecionárias são frequentes e ocorrem a pouco mais de uma ou algumas dezenas de centímetros da superfície nestes solos de mina, atingindo também profundidades maiores. As concreções não foram encontradas no perfil do solo natural sob floresta.

Para a identificação das sessões horizontais dos solos construídos, utilizou-se a denominação de camadas de solo, se prevaleceram feições de degeneração de estrutura ou se a nova pedalidade e o desenvolvimento dos processos pedogenéticos não são expressivamente observáveis. O termo horizonte foi empregado de acordo com seu conceito, ou seja, quando as ações dos processos de formação de solo são evidentes e, no caso dos solos construídos, processos pedogenéticos contemporâneos.

Nos perfis dos solos construídos, quando se observou mudanças expressivas das condições morfológicas, físicas e químicas entre as camadas, decorrentes da deposição de materiais de profundidades muito distintas, provenientes do solo natural, foi considerada a descontinuidade litológica, empregando-se números arábicos como prefixos na designação das diferentes camadas/horizontes. Como indicado em Santos et al. (2015), os horizontes ou camadas acima da primeira descontinuidade não receberam prefixo numérico, sendo que a camada abaixo da primeira descontinuidade recebeu o prefixo 2 e acrescentou-se uma unidade ao prefixo sempre que houve descontinuidade.

As fotos dos perfis dos solos construídos nas áreas de recuperação pós mineração de bauxita são expostas nas Figuras 5 e 6 e a Figura 7 mostra o perfil do solo natural sob floresta, classificado como Latossolo Amarelo Distróficos típico, textura muito argilosa. Notar a variação de cores; espessura do *topsoil* e presença de concreções nos solos construídos.

Figura 5 – Perfil 1 dos sistemas RN09_7 (A), PL09_7 (B), RN14_2 (C), PL14_2 (D) e N14_2 (E) em áreas de solos construídos pós mineração de bauxita.



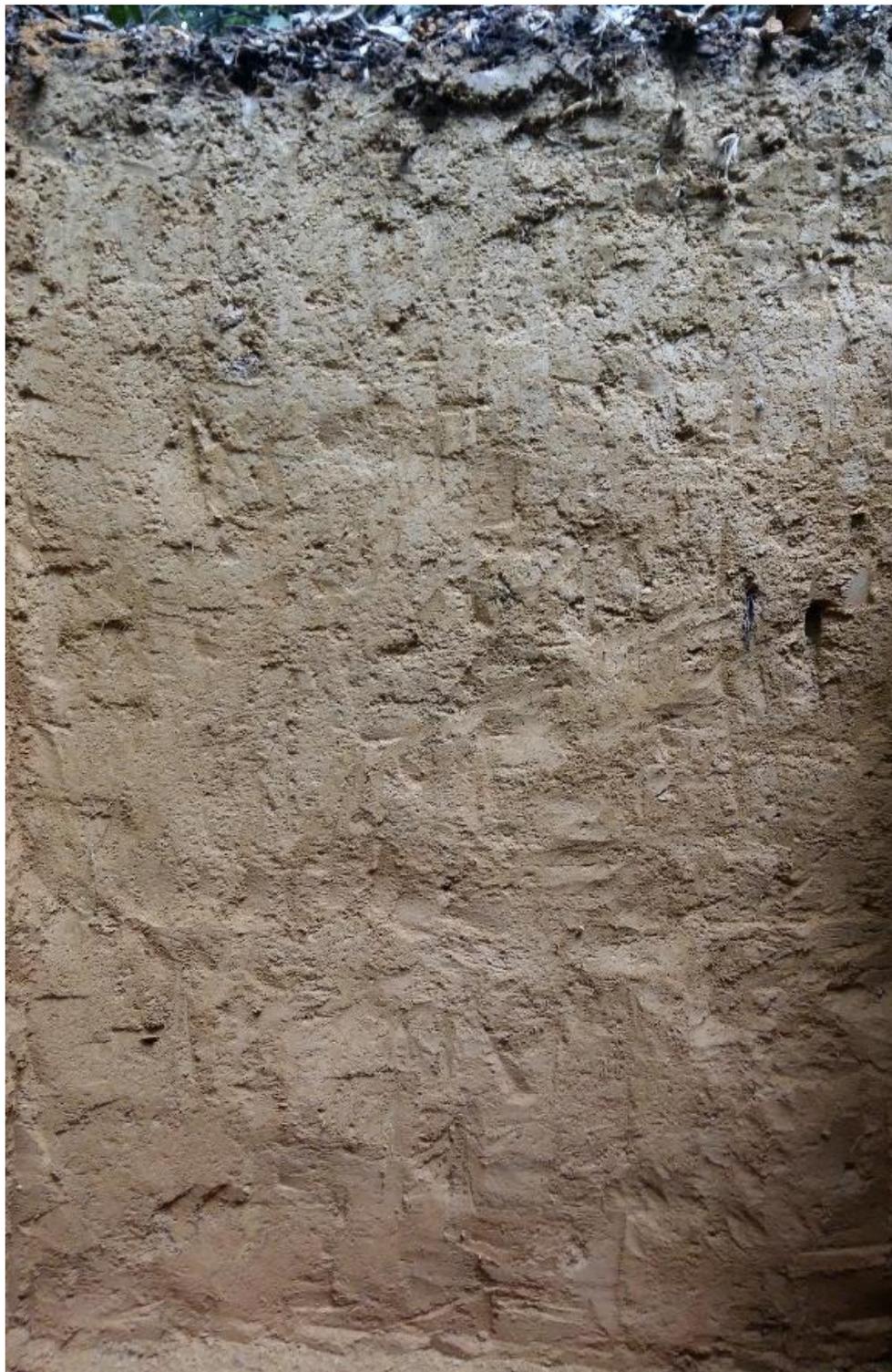
Fonte: Autora.

Figura 6- Perfil 4 dos sistemas RN09_9 (A), PL09_9 (B), RN14_4 (C), PL14_4 (D) e N14_4 (E) em áreas de solos construídos pós mineração de bauxita.



Fonte: Autora.

Figura 7- Perfil de Latossolo Amarelo Distrófico típico, textura muito argilosa em área de Floresta Nativa.



Fonte: Autora.

Embora à primeira vista os perfis construídos apresentem uma característica geral que passa uma noção de similaridade entre eles, um olhar mais aprofundado torna possível a percepção de diferenças na espessura e cor do *topsoil* e na face exposta do

perfil. As observações realizadas *in situ* no momento da descrição morfológica (apêndices) e em lupa e microscópio na análise micromorfológica, revelaram detalhes das diferenças existentes entre os solos construídos, bem como entre estes e o solo natural sob floresta.

Morfologicamente, na grande maioria dos perfis descritos, os solos construídos apresentam conformação do *topsoil* sobre o estéril com transição abrupta entre estas. Quanto à cor, nos perfis das áreas em recuperação observou-se predomínio de matizes mais amarelos 10YR nas camadas ou horizontes mais superficiais e em algumas camadas subsuperficiais, relacionados ao *topsoil*. Já na maioria das camadas de subsuperfície houve predominando matizes mais vermelhos 5YR a 2,5YR. Mosqueados decorrentes da mistura de materiais procedentes de horizontes distintos advindos do solo natural que foram deslocados, transportados, misturados e deposição para construção do solo de mina, bem como os relacionados a processos de oxirredução atuais, também foram observados.

Em relação ao Latossolo situado sob floresta, em condições naturais, o matiz 10YR foi encontrado até a profundidade de 34 cm, correspondendo ao horizonte BA. O matiz 7,5 YR ocorreu nos sub-horizontes B1 a B3, chegando a volumes vermelho 2,5 YR intercalados a 7,5 YR em B3. Essa variação de matiz em B3 está relacionada ao processo de xantização nesse horizonte.

Quanto à textura, todos os perfis apresentaram textura muito argilosa, com variação de 73 % a 94 % de argila (Tabela 1), podendo ocorrer, nos solos construídos, material grosseiro representado por nódulos ferruginosos de várias dimensões (cascalho, calhaus e matacões).

De maneira geral, nos perfis dos solos construídos na mina, foram constatadas expressivas alterações na conformação dos horizontes e ou camadas, modificações de unidades estruturais e arranjo da matéria, em relação ao solo natural sob floresta. A explanação sobre a estrutura e o arranjo dos horizontes será apresentada por ano de construção do solo de mina.

Solos construídos em 2009:

Por ocasião da primeira descrição morfológica do solo (2016), as áreas de plantio instaladas em 2009 apresentavam cobertura vegetal bastante irregular, com muitas

clareiras intercaladas a agrupamentos arbóreos em desenvolvimento, formando um mosaico de condições de solo coberto intercalado a solo exposto na superfície, enquanto que a área de regeneração natural apresentava-se mais coberta por bosque com predomínio de muravuvuia (*Croton matourensis*). Apesar de que nesta área de regeneração natural estivesse ocorrendo mortalidade de árvores de muravuvuia, havia boa cobertura vegetal e sua abundância de indivíduos arbóreos no estrato superior se equipara a da floresta (Tabela 1).

Nos perfis da regeneração natural instalada em 2009 (RN09_7 e RN09_9) (Figura 5 A e Figura 6 A respectivamente), pôde-se observar a liteira, composta por material vegetal em vários estágios de decomposição, formando uma camada superficial de aproximadamente 5 cm, de coloração escura (Figura 8). Isso contribuiu para uma melhor cobertura do solo e conseqüente aumento da atividade biológica. Desta forma, o solo das áreas de regeneração natural instaladas em 2009 (RN09_7 e RN09_9) apresentaram formação de um horizonte A com melhores condições estruturais e, abaixo deste, foi reconhecido o horizonte intermediário C/A, ou seja, neste horizonte volumes de estrutura recentemente formadas (com características típicas do A) corriam em menor proporção e eram distintos dos volumes do com pouca pedalidade (representados pela letra C).

Figura 8- Acúmulo de liteira sob o perfil RN09_9

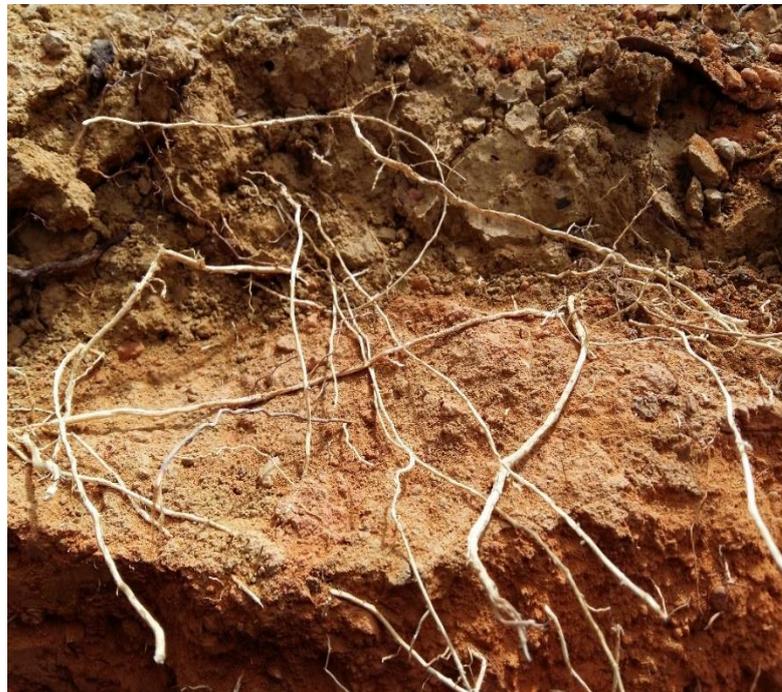


Fonte: Autora.

A trincheira do PL09_7 foi aberta em uma área cuja superfície abrangia o limite da copa das árvores de um agrupamento vegetal, com parte da superfície do solo coberta por uma camada de liteira e parte exposta, sem cobertura vegetal ou liteira. Isso foi feito com o objetivo de caracterizar a influência destas duas condições sobre as características do *topsoil*. Neste perfil o horizonte A ocorreu localizado abaixo da liteira sobre a projeção da copa, pouco espesso e com transição quebrada para a camada C1, cuja superfície encontrava-se desprotegida, sendo que esta última dominou a seção superficial até o contato com a camada 2Cc (estéril). Em PL09_9, o horizonte A ocorreu nos primeiros centímetros de forma contínua e em ambos os perfis (PL09_7 e PL09_9) e este horizonte é contemporâneo, formado abaixo da camada de liteira com pedalidade relacionada à bioturbação, o que reforça a importância da cobertura vegetal no estabelecimento da fauna do solo (OLIVEIRA FILHO et al., 2015 e JOSA et al., 2012) para promoção da pedalidade, sobretudo nos solos de mina construídos (RUIVO, 1998 e FROUZ et al., 2008) e confere a menor densidade do solo nestes horizontes.

Embora constatada a existência de um fino horizonte A e C/A nestas áreas, na camada C1 em ambos perfis foram encontradas unidades estruturais artificiais compactas em seu interior, separadas por planos fissurais, com indícios de amassamentos devido às pressões sofridas pelo solo muito argiloso manejado com umidade acima da ideal (*nota de rodapé do quadro (Quadro1) por ocasião do preparo da área. Estas estruturas foram caracterizadas como forte blocos angulares, com tamanhos variados (Quadro 3, *topsoil* na Figura 9, Figura 14 (b e c) e Figura 15) e são atípicas em condições superficiais ou próximas à superfície para essa região. A Figura 15 ilustra as feições de amassamento que foram descritas na análise de lâmina de seção delgada em lupa binocular. Em PL09_7 as raízes se desenvolviam com dificuldade nessa camada entre os espaços fissurais, contornando os torrões amassados, como também compondo uma trama horizontal e paralela no topo da camada 2Cc (estéril), que também apresentou selamento em topo, que se formou devido sua exposição por longos períodos às intempéries antes do cobrimento com *topsoil*, além da compactação (Figura 14 (d e e)), evidenciando a dificuldade de penetração radicular em profundidade (Figura 9, topo do estéril).

Figura 9- Selamento sub-superficial e crescimento horizontal do sistema radicular no PL09-P1.



Fonte: Autora.

O *topsoil* no PL09_9 foi evidenciado por apresentar matiz 10YR e chegou a 22 cm, sendo observado neste o horizonte A neoformado descontínuo na superfície (0 - 3 cm, Figura 14 A), seguido de C/A e C1. Neste perfil a atividade biológica e a quantidade de raízes diminuíram sensivelmente nas camadas C1 e subsequentes, que se encontravam compactadas. As camadas provenientes do material estéril 2C2, 2C3 e 2C4, apresentaram matiz predominante 2,5YR e também se apresentaram compactadas e com perceptível restrição ao desenvolvimento radicular. Twum & Nii-Annang (2015), evidenciaram o impacto negativo da compactação do solo para o desenvolvimento radicular, mesmo após 85 anos de recuperação. Além disso, o aumento da densidade do solo devido à compactação ocasionada pelo tráfego de equipamentos gera perda das estruturas e também pode ocasionar consequente baixas das taxas de infiltração em solos minerados (KÄMPF et al. 1997 e GUEBERT & GARDNER 2001). As limitações químicas e/ou físicas ao aprofundamento radicular prejudicam o estabelecimento da vegetação arbórea empregada na recuperação de áreas degradadas, pois, nesta condição, a plantas perdem sustentação e tornam-se mais propensa ao tombamento quando submetidas a correntes de vento, ao atingirem maior altura. Além disso, na falta do aprofundamento radicular adequado, as

plantas ficam mais suscetível ao déficit hídrico que pode ocorrer nas estações mais secas, o que retarda seu crescimento ou pode levá-las à morte.

Nas áreas instaladas em 2009, comprando-se os perfis quanto ao tempo de condução de 7 para 9 anos dentro de um mesmo sistema, não foram observadas diferenças em evolução. No entanto, morfologicamente foi possível detectar diferenças expressivas quanto à evolução do solo nos sistemas de regeneração natural e plantio de mudas instalados em 2009, em que a regeneração natural (RN09_7 e RN09_9) propiciou um maior avanço pedogenético, pois, além de promover a formação de um horizonte A contínuo, deu condições para o desenvolvimento de um horizonte C/A mais espesso e com melhores condições estruturais que as encontradas nas áreas de plantio das mesmas idades. Estas apresentaram modesto e descontínuo horizonte A conjugado à camada C1 compactada e sem horizonte C/A, no caso de PL09_7, ou fino horizonte A acima do C/A pouco espesso, seguido de camada C1 compactada, no caso de PL09_9, em consequência do preparo realizado com solo com umidade acima da ideal para o manejo (Quadro 3). A compactação dificultou o desenvolvimento das plantas neste sistema e consequentemente, a evolução pedogenética do solo, em comparação às áreas regeneração natural.

Quadro 3- Descrição morfológica, densidade e porosidade do solo sob floresta nativa e dos perfis de solos construídos após mineração de bauxita, Paragominas, Pará.

Horizontes / Camada	Profundidade	Calhaus no perfil	Cascalho	Terra fina	Areia	Silte	Argila	Densidade	Porosidade	Cor Úmida (Munsell)	Consistência			Estrutura
	cm	%									g kg ⁻¹	g/cm ³	m ³ / m ³	
FLO														
A1	0-5	-	44	946	67	207	726	0,9	0,67	10YR 3/3	Muito dura	Friável	Plástica e pegajosa	Forte muito grande grumosa
A2	5-7	-	74	926	46	141	813	1,08	0,6	10 YR 6/6	Muito dura	Friável	Plástica e pegajosa	Forte média grumosa e granular e forte pequena blocos subangulares
A3	7-17	-	11	989	40	141	819	1,09	0,58	10YR 5/4	Dura	Friável	Plástica e pegajosa	Moderada média granular e forte pequena blocos subangulares
BA	17-34	-	-	1000	26	71	904	1,1	0,58	10 YR 6/6	Dura	Friável	Plástica e pegajosa	Moderada pequena blocos subangulares; forte média granular
B1	34-82	-	-	1000	17	50	933	1,1	0,58	7,5YR 7/8	Dura	Friável	Plástica e pegajosa	Moderada pequena e média blocos subangulares
B2	82-118	-	-	1000	21	46	932	1,13	0,56	7,5YR 6/8	Dura	Friável	Plástica e pegajosa	Moderada pequena blocos subangulares
B3	118-200	-	-	1000	26	139	835	1,29	0,51	7,5YR 6/8	Dura	Friável	Plástica e pegajosa	Moderada pequena blocos subangulares e composta moderada pequena granular
RN09_7														
A	0-5	-	41	959	42	75	883	1,06	0,61	10YR 4/4	Macia	Friável	Plástica e pegajosa	Moderada pequena grumosa e moderada muito pequena granular;
C/A	5-25 (20-30)	10	1	952	32	77	891	1,22	0,52	10YR 6/8	Dura	Firme	Plástica e pegajosa	Moderada pequena blocos subangulares e moderada pequena granular
2Cc	25-130	60	1	999	75	46	879	1,31	0,5	2,5YR 4/6	Ligeiramente dura	Friável	Plástica e pegajosa	Moderada pequeno e bloco subangulares e moderada pequena granular e
RN09_9														
A	0-3	-	-	1000	70	100	830	0,94	0,65	10YR 3/2	Firme	Friável	Plástica e pegajosa	Forte média grumosa
C/A	3-22	-	18	982	38	115	847	1,03	0,61	10YR 5/4	Firme	Friável	Plástica e pegajosa	Moderada pequena blocos subangulares e moderada pequena granular
2Cc	22-100	60	-	1000	166	99	735	1,27	0,52	3YR 4/8	Firme	Friável	Plástica e pegajosa	Fraca a moderada muito pequena granula e moderada muito pequenas blocos subangulares

Quadro 3- Continuação

Horizontes/ Camada	Profundidade	Calhaus no perfil	Cascalho	Terra fina	Areia	Silte	Argila	Densidade	Porosidade	Cor Úmida	Consistência			Estrutura
											Úmida	Seca	Molhada	
	cm	%			g kg ⁻¹			g/cm ³	m ³ / m ³	(Munsell)				
PL09_7														
A	0-5	-	35	965	91	45	864	1,25	0,53	10YR 4/6	Solta e ligeiramente dura	Friável	Plástica e pegajosa	Moderada pequena grumosa, forte pequena granular granular e moderada média blocos subangulares
C1	5-10 (0-15)	-	-	1000	50	93	857	1,36	0,49	10YR6/8	Muito dura	Firme	Plástica e pegajosa	Massiva que se fragmenta em e forte média e grande blocos angulares e moderada média blocos subangulares.
2Cc	10-90	40	232	768	22	77	901	1,25	0,52	2,5YR 5/8	Ligeiramente dura	Friável	Plástica e pegajosa	Moderada, pequena blocos subangulares; moderada muito pequena granular e moderada, pequena laminar no topo do horizonte.
PL09_9														
A	0-3	-	64	936	80	103	817	1,13	0,57	10YR 4/4	Ligeiramente dura	Friável	Plástica e pegajosa	Forte grande à pequena grumosa.
C/A	3-8	-	65	965	62	92	846	1,10	0,58	10YR 5/6 e 4/6	Ligeiramente dura	Friável	Plástica e pegajosa	Fraca muito pequenos blocos subangulares e moderada muito pequena granular
C1	8-22	-	57	943	55	70	875	1,53	0,42	10YR 5/4 mosqueado 2,5YR 4/8	Dura a muito dura	Muito firme	Plástica e pegajosa	Forte muito grandes blocos angulares artificiais e moderada muito pequena granular
2C2	22-80	5	-	1000	63	99	838	1,33	0,5	2,5YR 5/6 mosqueado 10YR 5/4	Dura	Firme	Plástica e pegajosa	Forte muito grandes blocos angulares artificiais e forte muito pequena granular
2C3	80-88	-	-	-	79	118	804	1,4	0,47	2,5YR5/6 mosqueado 10YR 5/4	Dura a muito dura	Firme	Plástica e pegajosa	Moderada média laminar
3C4	88-100	30	24,46	1148	31	51	918	1,38	0,48	2,5YR 5/6 mosqueado 10YR 5/6	Dura a muito dura	Firme	Plástica e pegajosa	Moderada média laminar

Quadro 3- Continuação

Horizontes/ Camada	Profundidade cm	Matacões %	Cascalho g kg ⁻¹	Terra fina g kg ⁻¹	Areia g kg ⁻¹	Silte g kg ⁻¹	Argila g kg ⁻¹	Densidade g/cm ³	Porosidade m ³ / m ³	Cor Úmida (Munsell)	Consistência			Estrutura
											Úmida	Seca	Molhada	
RN14_2														
C1	0-5	-		1000	24	37	940	1,05	0,63	10YR 6/8	Ligeiramente dura	Friável	Plástica e pegajosa	Moderada pequena granular e moderada muito pequena blocos subangulares
C2	5-15	-	31	969	57	18	924	1,15	0,57	10YR 5/8	Ligeiramente dura	Friável	Plástica e pegajosa	Moderada pequena granular e moderada muito pequena blocos subangulares
C3	15-26	-	119	881	31	69	899	1,33	0,5	10YR 6/8	Ligeiramente dura	Friável	Plástica e pegajosa	Moderada pequena granular e moderada pequena blocos subangulares
2C4	26-45 (35-53)	15	234	766	27	101	872	1,19	0,55	5YR 6/8	Macia	Friável	Plástica e pegajosa	Fraca pequena granular e moderada pequena blocos subangulares
2C5	45-83	5	84	916	40	113	847	1,43	0,46	5YR 6/8	Macia	Muito friável	Plástica e pegajosa	Fraca muito pequena granular; macia, muito friável
RN14_4														
A/C	0-4	-			69	109	822	1,05	0,6	10YR 4/4	Ligeiramente dura	Friável	Plástica e pegajosa	Moderada média blocos subangulares; forte pequena granular. forte grande à média grumosa.
C/A	4-22	-	45	955										Moderada pequena blocos subangulares e forte pequena granular
2C2	22-100	-	-	1000	48	87	865	1,05	0,6	10YR 4/4	Ligeiramente dura	Friável	Plástica e pegajosa	Moderada muito grande blocos subangulares e moderada pequena granular
2C3	22-100	-	37	963	69	82	848	1,28	0,52	3YR 4/8	Muito dura	Firme a muito	Plástica e pegajosa	Moderada grande blocos subangulares composta de moderada pequena à muito pequena granular combinada a muito pequena granular.
PL14_2														
C1	0-12	-	68	932	65	81	855	1,11	0,58	3YR 4/8	Ligeiramente dura	Friável	Plástica e pegajosa	Moderada pequena a média granular e moderada pequena e média blocos subangulares e alguns grumos.
2Cc1	12-40 (30-50)	20	1	999	35	87	878	1,33	0,5	5YR 5/8	Ligeiramente dura	Friável	Plástica e pegajosa	Moderada pequena a média blocos subangulares e muito pequena granular.

Tabela 3- Continuação

Horizontes/ Camada	Profundidade	Matações	Cascalho	Terra fina	Areia	Silte	Argila	Densidade	Porosidade	Cor Úmida	Consistência			Estrutura
											Úmida	Seca	Molhada	
	cm	%			g kg ⁻¹			g/cm ³	m ³ / m ³	(Munsell)				
3C2	40-130	-	1	999	60	72	867	1,15	0,37	5YR 7/8	Ligeiramente dura	Friável	Plástica e pegajosa	Moderada muito pequena blocos subangulares e composta de moderada muito pequena granular.
4Cc2	130-150	10	58	942	58	98	844	1,24	0,53	2,5YR 6/6	Ligeiramente dura	Firme	Plástica e pegajosa	Moderada muito pequena blocos subangulares e moderada muito pequena granular.
PL14_4														
A/C	0-10	-	-	1000	69	173	758	0,92	0,65	10YR 4/3 e 3YR4/6	Firme	Friável	Plástica e pegajosa	Moderada grande blocos subangulares e forte grande grumosa
C/A	10-30	-	484	516	70	165	764	0,92	0,65	10YR 4/6 3YR4/6	Firme	Friável	Plástica e pegajosa	Forte grandes blocos subangulares, forte pequena granular e forte grande grumosa e blocos artificiais
2Cc	30-100	60	86	914	58	98	844	1,34	0,49	3YR 4/8	Firme	Friável	Plástica e pegajosa	Moderada pequena blocos subangulares composta de moderada pequena à muito pequena granular
N14_2														
C1	0-3	-	19	981	42	83	875	-	-	10YR 6/8	Solta	Solta	Plástica e pegajosa	Muito pequenas blocos angulares
C2	3-10	-	-	1000	42	123	835	1,1	0,58	10YR 6/8	Dura	Firme	Plástica e pegajosa	Fraca pequena e blocos subangulares e angulares
2Cc1	10-21	40	283	717	96	43	862	1,46	0,45	5YR 5/8	Dura	Firme	Plástica e pegajosa	Moderada pequena granular; moderada pequena laminar
2Cc2	21-45	15	21	979	31	109	860	1,37	0,48	2,5YR 5/8	Muito dura	Firme	Plástica e pegajosa	Moderada pequena laminar
3C3	45-90	-	87	913	69	82	848	1,37	0,48	3YR 4/8	Ligeiramente dura	Firme a friável	Plástica e pegajosa	Aparentemente massiva, mas se desfaz e fraca muito pequena granular
N14_4														
C1	45-0	-	32	964	22	41	937	1,17	0,56	7,5YR 6/8	Ligeiramente dura	Friável	Plástica e pegajosa	Moderada pequena blocos subangulares e moderada pequena a muito pequena granular
A/C	0-25	-	-	1000	58	136	806	0,86	0,67	10YR 4/4	Dura	Firme	Plástica e pegajosa	Forte grande grumosa e composta forte pequena granular
C/A	0-25	-	2	998	74	132	794	1,03	0,61	10YR 4/4	Dura	Firme	Plástica e pegajosa	Moderada pequena a média blocos subangulares; forte grande grumosa, forte pequena a média granular
2Cc	25- 125	60	83	917	70	133	789	1,65	0,38	3YR 3/8	Dura	Firme	Plástica e pegajosa	Moderada pequena blocos subangulares, composta de moderada muito pequena e pequena granular

Solos construídos em 2014

Por ocasião da primeira descrição, em 2016, os solos dos sistemas instalados em 2014 apresentavam pouca cobertura vegetal, ficando extensas áreas descobertas, com agrupamentos vegetais ou unidades vegetais de pequeno porte e gramíneas, isso se refletiu na menor quantidade de serapilheira nos sistemas implantados em 2014. Por ocasião do inventário florestal, realizado em 2018 (Tabela 2), as áreas instaladas em 2014 apresentaram baixo APES em relação à RN09, salvo N14_9 com domínio de *Cecropia* e *Sonatum* (Tabela 2). No entanto muitas áreas instaladas em 2014 ainda apresentavam solo exposto, que se alternavam com áreas de melhor cobertura vegetal.

Os perfis dos sistemas de plantio de mudas (PL14_2), regeneração natural (RN14_2) e nucleação (N14_2) apresentaram, na camada superficial C1, unidades estruturais fragmentadas e soltas ou levemente coalescidas, com aparência granular, blocos muito pequenos angulares (camada C1 do N14_2), blocos angulares e subangulares herdados do solo original, além de torrões maciços ou em fragmentação. Nas áreas com 2 anos de condução a maioria das unidades estruturais biogênicas encontradas nestes perfis foram relacionadas à herança das ações pretéritas da fauna no solo de origem ou, com menor frequência, a alguns poucos grumos e grânulos atuais.

Assim como ocorreu aos 2 anos, devido ao pouco tempo de condução, as áreas ao atingirem 4 anos também não apresentaram desenvolvimento de A neogênico, como ocorreu nas áreas mais antigas. No entanto, em todos os sistemas aos 4 anos de condução, encontrou-se um horizonte superficial A/C, onde horizontes volumes com agregados recentemente formados, como grumos e grânulos escuros, típicos de horizonte A (representados pela letra A) se mesclavam a volumes distintos de material com pouca pedaliidade (representados pela letra C).

Dos perfis descritos em 2018, a trincheira do perfil PL14_4 foi aberta em uma parcela que apresentava a maioria das plantas do estrato superior mortas ou raquíticas, sendo o perfil de solo foi exposto ao pé de um paricá (*Schizolobium amazonicum*) com 4 anos de plantio que se encontrava morto.

Observou-se em PL14_4 que horizonte superficial A/C apresentou bom desenvolvimento estrutural contemporâneo, porém restrito em setores associados ao material da supressão vegetal remanescente no *topsoil*, como raízes e pedaços de galhos enterrados e em decomposição. Semelhante estrutura biogênica foi encontrada no

horizonte A/C, descontínuo, situado abaixo da pilha de galhos no N14_4, e igualmente está associada à atividade da macrofauna edáfica que retrabalha o material mineral e orgânico neste sistema, promovendo bom desenvolvimento pedológico nesta situação específica (Figura 10). Ainda que em N14_4 o desenvolvimento da estrutura neogênica do solo tenha sido notado no horizonte superficial sob a pilha de galhos, grande parte da área de N14_4 apresenta solo desprotegido e não mostra evolução de pedalidade. Embora a área de N14_4 tenha apresentado abundância de plantas no estrato superior (Quadro 2) com valor próximo ao obtido no sistema de regeneração natural de 9 anos, a quase totalidade das plantas em de N14_4 é representada pelos gênero *Cecropia* e *Solanum*, que não oferecem boa proteção ao solo (ALMEIDA, 2016).

Figura 10- Desenvolvimento de estrutura biogênica contemporânea no horizonte A/C de N14_4, associado aos restos vegetais da antiga pilha de galhos



Fonte: Autora.

A área de regeneração natural, representada pelo perfil RN14_4, era coberta por muravuvuia (*Croton matourensis*), que formava agrupamentos isolados ou debilmente interligados compondo um mosaico com clareiras de solo totalmente descoberto. A trincheira para exposição do RN14_4 foi aberta em área sob um agrupamento de muravuvuia e com camada de liteira expressiva. Abaixo da liteira observou-se o horizonte A/C com desenvolvimento incipiente de pedalidade nos primeiros centímetros. Embora este horizonte tenha se formado em RN14_4, nas áreas nas proximidades onde a vegetação não se desenvolveu e o solo se encontrava descoberto, não houve condições para o desenvolvimento de processos de formação de horizontes, conservando-se em superfície a camada sem pedalidade recente.

Abaixo do horizonte A/C, todos os perfis das áreas instaladas em 2014 apresentaram horizonte C/A com estrutura em blocos mesclada com poucos volumes de

granular neogênica, como também outras estruturas provenientes dos horizontes do antigo solo natural que foi utilizado como *topsoil* e que foram alteradas por ocasião do capeamento do estéril na construção destes solos construídos.

Nestas áreas recentes, o desenvolvimento da nova pedalidade ocorre em sítios onde o solo esteve em contato com os resíduos vegetais, seja com a serapilheira em superfície, no caso de RN14_4, seja com restos da supressão acima ou misturados ao solo, como foi o caso de PL14 e N14_4, o que significa uma evolução em relação de quando as áreas tinham apenas 2 anos.

Subjacente ao C/A, o perfil RN14_4 apresentou camada 2C, formada pelo material estéril sem concreções e não apresentou restrição ao desenvolvimento radicular da muravuvia em profundidade (Figura 6 C). Por outro lado, os perfis PL14_4 e N14_4 apresentaram camada 2Cc, com cerca de 60% do volume do solo composto por concreções do tamanho calhaus e matações (Quadro 3). No perfil PL14_4 ilustra-se um exemplo sobre as limitações que o estéril concrecionário pode causar ao desenvolvimento do sistema radicular da planta. A Figura 6 D mostra a raiz pivotante do paricá diminuindo drasticamente sua espessura e expectativa de comprimento após penetrar na camada 2Cc.

É importante ressaltar que, embora a formação de pedos biogênicos no horizonte A/C e C/A destes solos possa ser considerada um avanço pedogenético nas áreas instaladas em 2014, a evolução da pedalidade nos horizontes superficiais dos solos construídos dependerá da evolução e permanência da vegetação para o estabelecimento da cobertura do solo e manutenção da macrofauna edáfica.

Como relatado para as áreas instaladas em 2009, as áreas construídas em 2014 também apresentam ainda vários sinais de alterações negativas, percebidos nas camadas/horizontes oriundos dos materiais empregados tanto como *topsoil* quanto como estéril. Dentre as principais alterações estão: ocorrência de concreções em grande quantidade próxima à superfície, amassamentos e deformações estruturais e camadas nitidamente compactadas com valores de densidade elevados e desenvolvimento de estruturas laminares.

A variabilidade entre os solos de mina construídos se dá também devido a diferentes graus de modificações estruturais decorrentes do deslocamento, transporte, deposição dos materiais e condições de umidade do solo por ocasião da execução de várias etapas de construção dos solos nas áreas a serem recuperadas. Solos argilosos possuem uma maior porosidade total e maior capacidade de retenção de água nos

microporos, desta forma, são mais suscetíveis à compactação pelo tráfego de máquinas do que os solos arenosos (SILVA, 1999) e necessitam de maiores cuidados com relação à umidade e às práticas de preparo e tráfego do maquinário, de forma a diminuir o risco de compactação (SILVA et al., 2000). Neste contexto, foi encontrada compactação nos perfis de solos construídos, evidenciada por valores elevados de densidade do solo, Quadro 3, (1,53 g/cm³ PL09_9, 1,46 g/cm³ N14_2, 1,65g/cm³ N14_2) assim como encontrado por Barros et al (2013) que obtiveram densidade de 1,33 g/cm³ em seu estudo sobre propriedades físicas de solo minerado.

O alto teor de argila representa uma desvantagem em se tratando de solos com estrutura modificadas e destruídas, como ocorre na atividade minerária com a extração e recomposição das áreas lavradas (SNARSKI, et al, 1981). A compactação do solo é uma das alterações ocasionadas pela mineração, sendo responsável por mudanças significativas em sua estrutura, ocasionando diminuição da porosidade total e continuidade de poros (CHINN & PILLAI, 2008). Este fator influencia diretamente no estabelecimento da vegetação regenerada ou plantada que terá uma maior dificuldade para se desenvolver e sobreviver. Obviamente estas alterações influenciam no comportamento químico, físico e hídrico destes solos e afetam o desenvolvimento da vegetação e o sucesso da recuperação da área degradada. As variações encontradas nos solos construídos em áreas de mina são devidas à natureza dos substratos usados e às operações envolvidas na construção do solo (DANIELS et al, 2004), onde o manejo inapropriado, com o uso de máquinas pesadas e o revolvimento intensivo, leva à compactação em superfícies afetando a qualidade física e química do solo (ARGENTON et al., 2005).

Apesar de que Mcsweeney & Jansen, (1984) concordem que as variações nos solos de mina sejam decorrentes das operações envolvidas na construção do solo do que das advindas de processos pedogenéticos naturais, neste trabalho foi possível observar que tanto o tempo, como o sistema de recuperação parecem influenciar na reorganização do material no sentido da pedogênese.

Em todos os perfis dos solos construídos, salvo PL09_9, a transição abrupta entre as camadas de *topsoil* e estéril (exemplo na Figura 11) pode ser uma evidência de pouca bioturbação em profundidade, não havendo condições ou tempo suficientes para que ocorra o avanço da pedogênese em profundidade nestes perfis, sendo limitada à superfície

ou sequente subsuperfície. Em todas as áreas observadas e a atividade da fauna e do sistema radicular, abaixo da linha de transição entre *topsoil* e estéril é diminuída.

Figura 11- Contraste entre *topsoil* e estéril no sistema Regeneração natural, perfil 3 com 7 anos de idade.



Fonte: Autora.

2.3.3 Análise meso e micromorfológica.

Latossolo Amarelo Distrófico sob floresta (FLO)

Para subsidiar o entendimento do comportamento do solo natural, que serviu de fonte de material para a construção do solo nas áreas sob recuperação, foi realizada a descrições meso e micromorfológicas dos horizontes A1, A2, BA, B1 e B3 de um Latossolo Amarelo Distrófico típico, muito argiloso sob floresta.

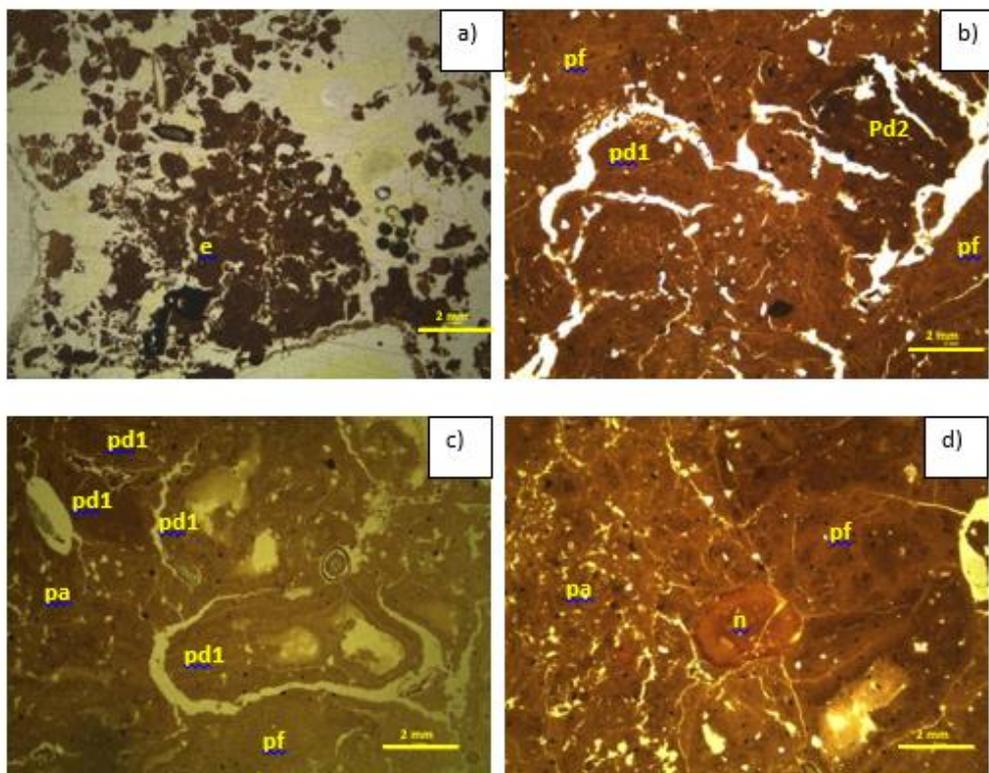
O horizonte A1 apresenta pedalidade forte. No topo observa-se estrutura granular (10% da área da lâmina, Figura 12 a) com porosidade de empilhamento complexo, compondo trama enáluaica.

Abaixo dessa zona observam-se agregados poliédricos terciários (90% da lâmina) bem desenvolvidos. Estes agregados são individualizados das unidades adjacentes por canais alongados contínuos, com expressivo desenvolvimento vertical. Esses canais conectam-se entre si ou unem-se a canais menores ou a poros planares interconectados ou não, que se desenvolvem no interior dos agregados maiores que,

juntamente com os planos de fraqueza, delimitam os agregados secundários poliédricos a arredondados. A estrutura de base predominante nesta zona em A1 compõe trama porfírica (Figura 12 b).

Nos horizontes A2 e BA ocorrem agregados poliédricos separados dos adjacentes por canais alongado interconectados e/ou ligados a canais e poros planares menores e algumas cavidades interagregados, individualizando parcialmente os agregados secundários. A trama porfírica fechada (Figura 12 c e d (pf)), predomina, ocupando cerca de 70% da área nas lâminas dos horizontes A2 e BA, no entanto essa se encontra constantemente espaçada por canais e fissuras inter e intra-agregados. O restante das lâminas de ambos horizontes apresenta trama porfírica aberta (Figura 12 c e d (pa)), que se forma da conjunção de microagregados gralulares ou da disjunção de agregados que se desprendem da trama porfírica fechada. A porosidade associada é representada principalmente por cavidades policôncavas e alguns canais finos e complexos que individualizam parcialmente as unidades secundárias.

Figura 12 - Fotomicrografia do perfil FLO a) arranjo estrutural do topo do horizonte A1 e = trama enáulica; b) horizonte A1 com pedotúbulos pd1=preenchimento denso antigo, e pd2 = preenchimento denso recente, corte longitudinal; c) Horizonte A2 com detalhe da pedotúbulo nefróide com preenchimento denso (pd), corte transversal; d) Horizonte BA com nódulo (n), trama porfírica aberta (pa) e trama porfírica fechada (pf).



O fundo matricial (FM) nos horizontes A1, A2 e BA é composto de plasma argiloso caulínico, com maior contribuição orgânica no horizonte mais superficial. O esqueleto é pouco expressivo formado por grãos de quartzo na fração areia e pequenos fragmentos de carvão e nódulos argilo-ferruginosos. Poros planares, pequenos canais e cavidades policôncavas ou arredondadas de menor diâmetro, interconectados ou não também compõe os vazios no FM no interior dos agregados.

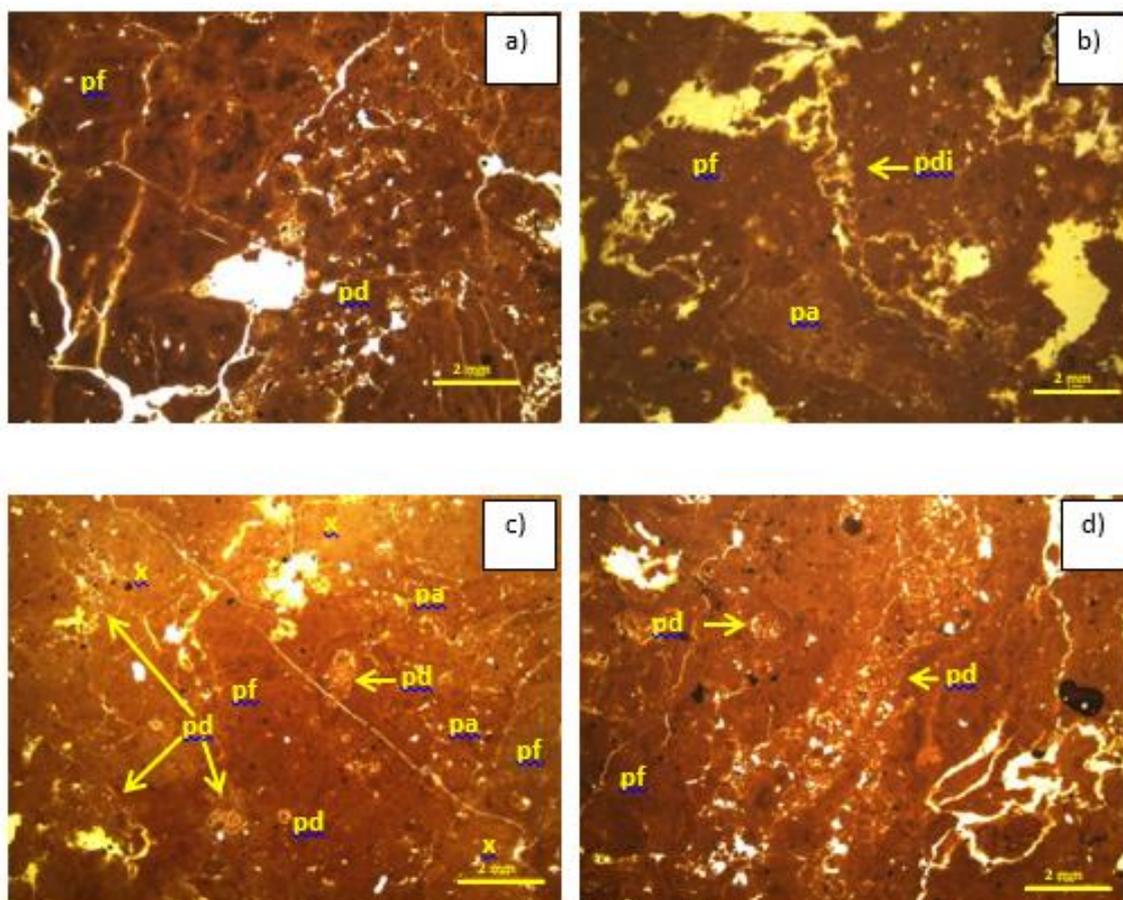
As principais feições pedológicas nestes horizontes estão relacionadas à intensa atividade biológica, tanto contemporânea quanto pretérita. Apesar de que muitas feições da atividade biológica pretérita não sejam facilmente observáveis, pois se alteram com o envelhecimento e coalescência de agregados, perdendo forma e cor, elas podem ser evidenciadas em pedotúbulos parcialmente preenchidos, exibindo limites em semicírculo ou em cavidades mamilares decorrentes da atividade de minhocas (BREWER, 1964; BULLOCK, et al, 1985; VANDENBYGAART et al 2000), (Figura 12 b e c, pd1). As feições biogênicas atuais são representadas por biopedotúbulos densamente preenchidos com excrementos de forma e coloração distintos da matriz geral do solo (Figura 12 b, pd2). Nódulos arredondados amarelos argilo-ferruginosos também são feições a se considerar na lâmina do horizonte BA e podem ser litorrelíquias do material de origem (Figura 12 d, n).

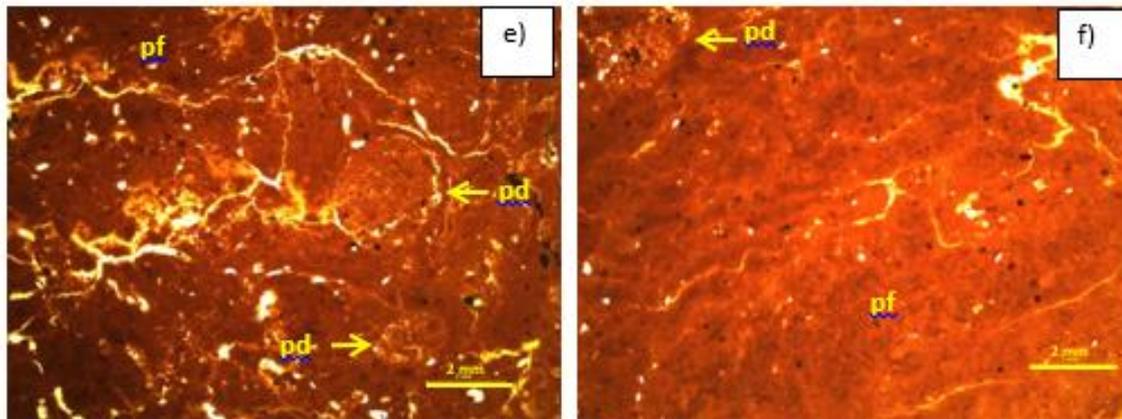
No horizonte B1 (Figura 13 a e b) foram observados macro-agregados poliédricos (60% da área), individualizados por canais e fissuras alongados. Esses agregados formam uma trama porfírica fechada em seu interior, mas como nos horizontes suprajacentes, a trama é fragmentada por fissuras e canais mais finos. Nos restantes 40% da área da lâmina, entremeados aos macro-agregados poliédricos, encontram-se micro-agregados arredondados e semi-arredondados, ligeiramente coalescidos entre si, compondo trama porfírica aberta e pórfiro-enáulica, estas duas últimas mais frequentes no interior de pedotúbulos. A porosidade associada às tramas porfírica aberta e pórfiro-enáulica são cavidades policôncavas, canais e fissuras e à conjugada à trama enáulica, porosidade de empilhamento (Figura 13).

O horizonte B3 apresenta estruturação diferenciada em relação aos horizontes suprajacentes. Aqui a trama porfírica aberta e a enáulica ocorrem mais frequentemente preenchendo o interior dos pedotúbulos (20% da área da lâmina). No restante da lâmina (80% da área) observou-se diminuição da quantidade e espessura dos canais e fissuras

interagregados. Assim, a trama porfírica fechada se tornou mais extensa em relação aos horizontes superiores. A menor quantidade de fissuras e canais nesse horizonte colabora para o entendimento da maior densidade e menor porosidade a essa profundidade (Quadro 3) e tem relação com a menor intensidade dos ciclos de umedecimento e secagem, em relação aos horizontes superficiais, uma vez que estes ciclos colaboram para a formação da porosidade fissural (BREWER, 1964, VIANA, 2004 e WICK et al., 2009). Apesar da porosidade fissural e cavitária não serem consideradas boas condutoras de água gravitacional, a conectividade destas aos poros interagregados maiores, que fragmentam a trama porfírica e a porosidade de empilhamento garantem uma boa infiltração de água também em profundidade neste solo (MAGALHÃES et al. 2017).

Figura 13 - Fotomicrografia do perfil FLO: a) Horizonte BA; b) Horizonte B1; c a f) Horizonte B3. pf = trama porfírica fechada, pa = trama porfírica aberta, pd = pedotúbulo preenchido por micro-agregados levemente coalescidos, trama porfírica aberta, pdi = pedotúbulos com preenchimento incompleto; x = xantização.





As feições pedológicas mais relevantes nos horizontes B1 e B3 são representadas por pedotúbulos, trama salpicada com pequenos fragmentos de nódulos arredondados vermelhos em matriz amarelo-avermelhada e a evidencia do processo de xantização no horizonte B3 que é favorecido pelo clima úmido e a presença de matéria orgânica, o que promove a destruição da hematita, devido a hidratação do meio, e proporciona o amarelecimento ou goethização no solo (NUNES et al., 2000).

Solos construídos em 2009:

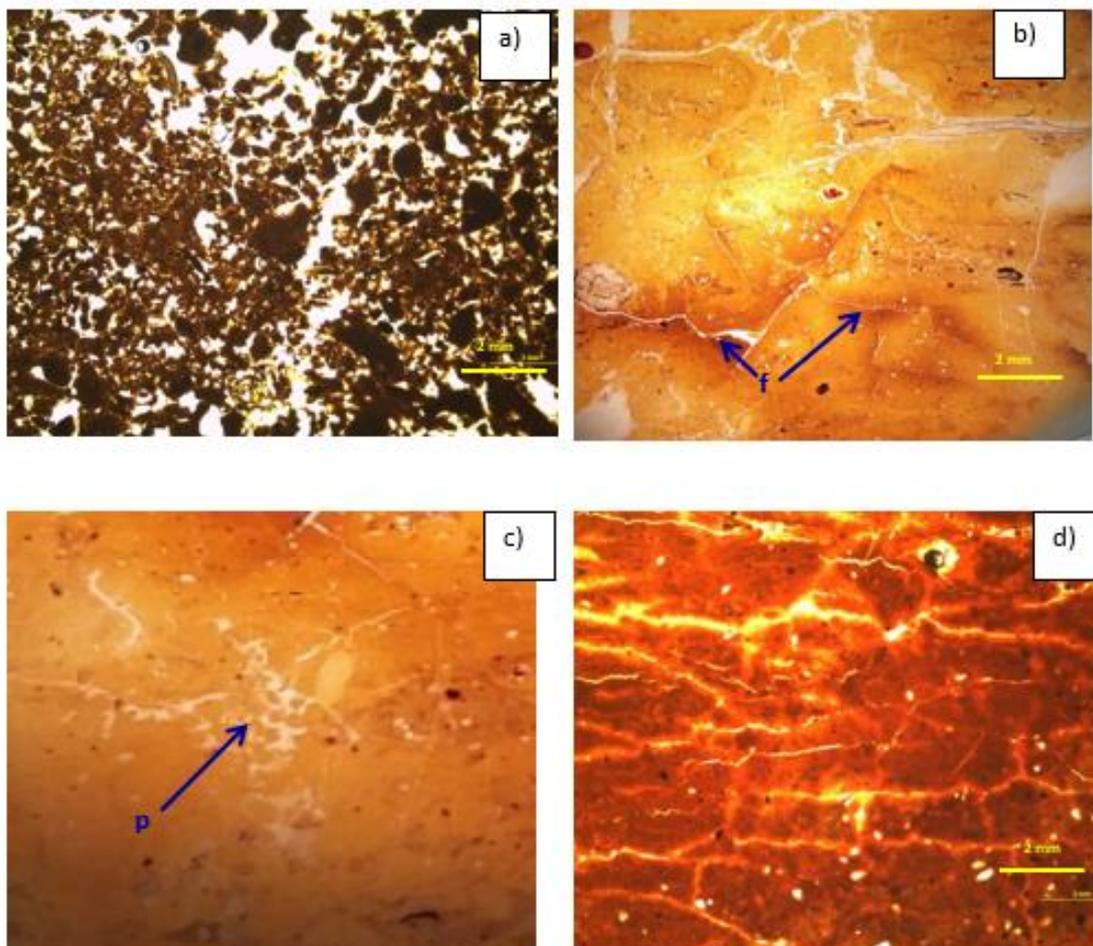
Plantio 2009

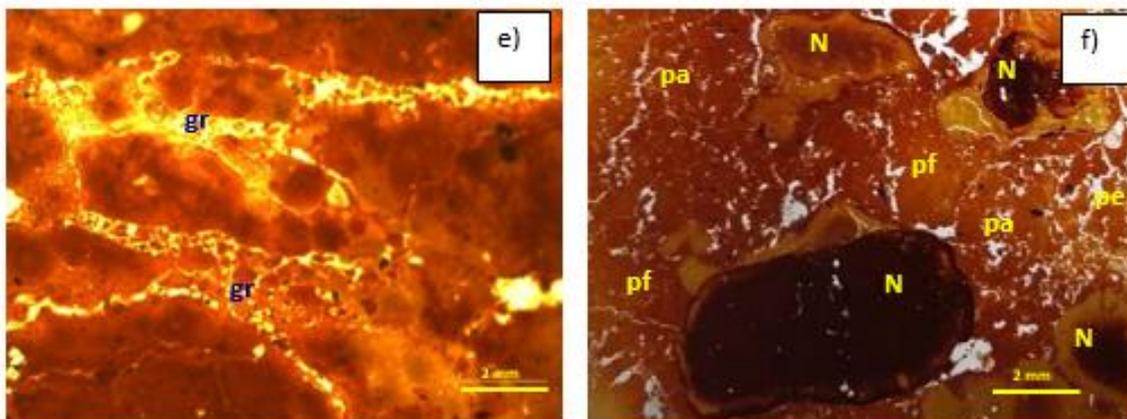
A trincheira do P09_7 foi aberta em uma área de transição entre a projeção da copa de uma árvore e uma área de solo exposto. Dessa forma, foram coletadas amostras indeformadas para confecção de lâminas delgadas dos horizontes superficiais obedecendo as duas condições extremas (projeção da copa/ solo exposto), além da camada subsuperficial, resultando em um total de 4 lâminas: A primeira corresponde ao horizonte pedogenético A com transição para a camada C1, área localizada à margem da projeção da copa da árvore e coberta com liteira. A segunda lâmina corresponde à camada C1, superficial que se encontrava exposta a pleno sol, solo descoberto, ambas as lâminas correspondem ao *topsoil*. A terceira lâmina é proveniente da transição as camadas C1 e 2Cc, sendo que a camada C1 é ainda referente ao *topsoil* e a 2Cc faz parte da camada de estéril, situação de topo da camada estéril; a quarta lâmina é referente à camada 2Cc, estéril.

O horizonte A é contemporâneo, pouco espesso e descontínuo, localizado à margem da projeção da copa da árvore, coberto com liteira e apresenta forte pedalidade, com agregados granulares argilosos muito pequenos, escurecidos devido à matéria orgânica profusamente misturada ao material mineral (Figura 14 a), que juntamente à

porosidade de empilhamento, forma trama enáulica. Este horizonte apresenta transição abrupta e descontínua para a camada C1 (Figura 14 b e c) que exhibe estrutura expressivamente alterada em relação à estrutura do solo original. Nesta camada foram observadas unidades artificiais (não naturais) compactas em seu interior, com tendência em fragmentarem-se em formas cúbicas, paralelepípedica e laminadas. A porosidade dominante entre as unidades compactas nesta camada é fissural, que geralmente está acompanhada por feições de oxirredução, com acúmulo de Fe (f) ou depleção deste elemento (d), apresentando ângulos bem evidentes, compondo um arranjo oblíquo ou ortogonal, com muita acomodação da matéria, onde, muitas vezes, as raízes se desenvolvem achatadas, contornando estas unidades artificiais.

Figura 14 - Fotomicrografia do perfil PL09_7 a) Arranjo estrutural do horizonte A, estrutura granular, trama enáulica; b e c) Camada C1, f = zonas de acúmulo de Fe próximo às fissuras e juntas de fraqueza; p = pedotúbulo com preenchimento granular; d, e e f) Camada 2Cc d e e – topo - estrutura laminar com porosidade fissural (compactação), gr = formação de agregados granulares a partir do dismantelamento da estrutura laminar; f c = pf = trama porfírica fechada, pa = trama porfírica aberta, pe = porfiro-enáulica, N = nódulos ferruginosos em vários estágios de alteração.





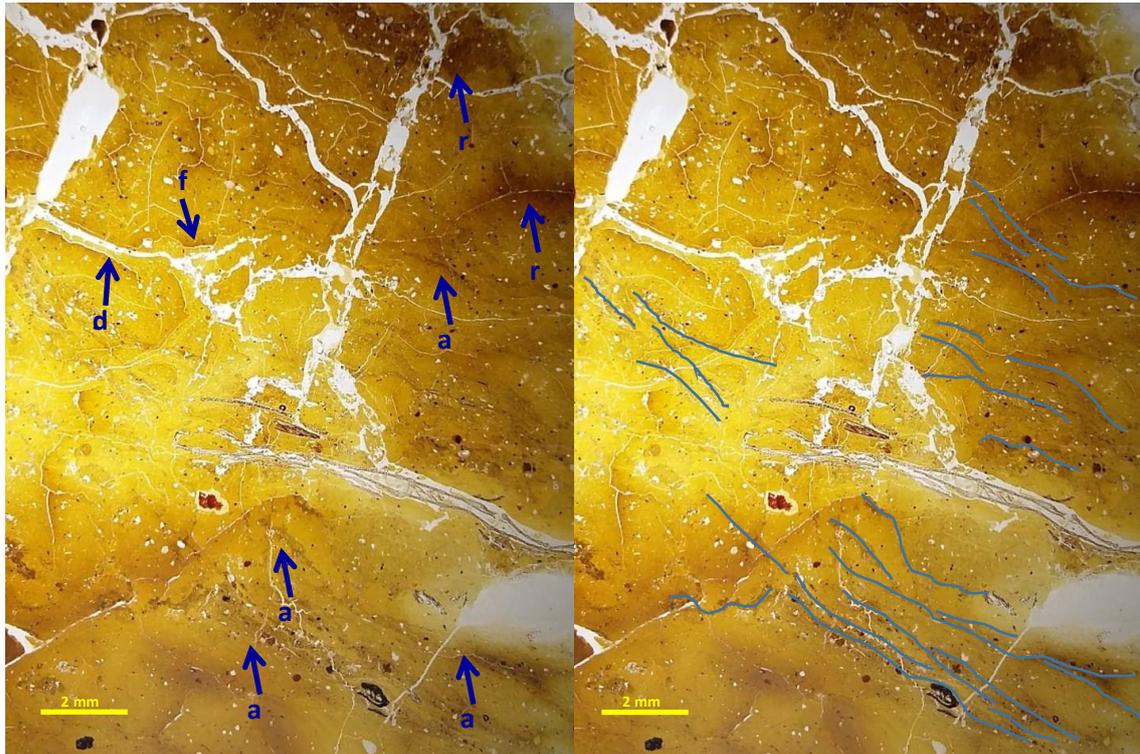
Em C1 é comum serem encontradas, no interior das unidades compactas, feições de amassamentos notadas por bandeamentos paralelos ou estriados escuros devido à matéria orgânica misturada e aprisionada no interior da massa plásmica. Estas feições estão detalhadas com uma réplica (Figura 15 b), onde foram grifadas em azul, para melhor visualização na figura original (Figura 15 a).

Nessa lâmina também foram observadas linhas de fraqueza paralelas à parede dos poros planares e desprendimento de material de coloração mais clara no interior destes (Figura 15 a, d), relacionadas à mobilização de ferro com depleção localizada seguida de acúmulo deste elemento mais abaixo, o que pode ser uma evidência de estagnação temporária de água no interior dos blocos compactos em C1 e ao consequente estabelecimento de condições redox. A saturação do solo ocorre na estação chuvosa e é agravada pela baixa porosidade no interior dos agregados artificiais compactos e pela descontinuidade de poros nessa camada e ocorrência de compactação no topo da camada subjacente (Figura 14 d). Nos sítios de depleção de Fe pode haver a dispersão de argilas devido à diminuição localizada de agentes floculantes (GILMAR, 1974, SETA et al. 1996). A argila dispersa, por sua vez, pode migrar com a água de percolação e entupir poros, reduzindo a velocidade de infiltração de água e aumentando a retenção (BERTSCH & SEAMAN, 1999, VIANA et al. 2004).

As feições de modificação estrutural, com amassamentos e estabelecimento de blocos compactos, bem como as feições de segregação de Fe não foram observadas no solo sob floresta, o que indica que em PL09_7 ocorrem são alterações provocadas, muito provavelmente pelas operações de preparo da área com solo muito úmido (ver Quadro 1, nota de roda-pé), por ocasião da construção do solo.

Apesar da pouca porosidade no interior das unidades compactas em C1, foi observado um pedotúbulo com estrutura granular em seu interior devido à ação da fauna do solo (Figura 14, c).

Figura 15– Agregados compactos artificiais da camada C1 de PL09_7, a = feições de amassamento; linhas azuis marcando as evidências de amassamento, d = zonas de depleção de Fe na parede do canal e desprendimento de fragmentos de solos no interior do canal, f= remobilização de Fe e concentração próximo à fissuras.



O topo da camada 2Cc apresenta estrutura laminar (Figura 14, d), com fissuras em planos horizontais mais desenvolvidos, típica de compactação devido ao tráfego de máquinas e equipamentos usados na construção do solo (BRADSHAW E CHADWICK, 1980; KÄMPF et al, 1997, CHINN & PILLAI, 2008; BRADY e WEIL, 2013) o que dificulta a penetração radicular e a infiltração de água (GUEBERT & GARDNER, 2001) além de elevar a retenção de água. Em alguns sítios nesta lâmina foi observado alterações da estrutura lamina, onde a porosidade fissural sede lugar a agropedotúbulos preenchidos com material solto granular, provavelmente devido à fragmentação das lâminas e desmoronamento de material (Figura 14 e).

Abaixo da camada compactada de estrutura laminar, 2Cc apresenta blocos centimétricos adensados (10%) e volumes de material mais solto, porém com trama ainda porfírica em vários padrões de abertura, chegando a profiro-enáulica (20%), pois ora os

microagregados se apresentam mais coalescidos, formando pequenos blocos, ora mais disjuntos. A área restante da lâmina é uma variação entre estas as duas tramas mais contrastantes. A porosidade associada à macroestrutura é representada por canais grandes não acomodados a parcialmente acomodados, canais mais finos parcialmente acomodados e câmaras com paredes irregulares que se formam devido à má acomodação do material de solo no momento da deposição. Nódulos avermelhados enegrecidos, vermelhos e amarelados em vários estágios de alteração entremeiam-se a blocos adensados com trama porfírica fechada, bem como a outros volumes de solo, com trama porfírica aberta e porfírica fechada (Figura 14 f).

Na transição C1-2Cc é comum a formação de grandes espaços vazios horizontais (Figura 16) que interrompem a conectividade de poros verticais, sobretudo os capilares. Essa ruptura da porosidade capilar prejudica a ascensão capilar da água, sendo um problema em estação com seca prolongada e quando o sistema radicular está concentrado na camada superficial do solo, devido à maior CTC que contrasta com a da camada de estéril conjugada a limitações físicas ou químicas da camada subjacente. Passioura (1991) afirma que fatores inter-relacionados vão influenciar no desenvolvimento radicular das plantas, tais como: quantidade de água disponível no solo; continuidade dos poros; oxigenação; dentre outros. Segundo Coacalla (2012), a condutividade hidráulica no solo irá depender de características do próprio solo e também do fluido que percola, entre elas está o índice de vazio, tamanho das partículas, composição, estrutura e grau de saturação, sendo que existe uma dependência entre elas. Desta forma, em solos construídos a ocorrência de grandes espaços vazios horizontais e desconexos prejudicam a ascensão da água, o que afeta o desenvolvimento e sobrevivência das plantas, principalmente em regiões com estação seca prolongada.

Figura 16 – Transição entre a camada C1 e 2Cc



Regeneração Natural 2009:

O perfil RN09_7 se apresentava sob mata de regeneração natural com predomínio de muravuvuia (*Croton matourensis*) e coberto com densa camada de liteira. Nesse perfil foram coletadas amostras da transição entre os horizontes A e C/A, correspondentes ao *topsoil* e camada 2Cc, correspondente ao estéril.

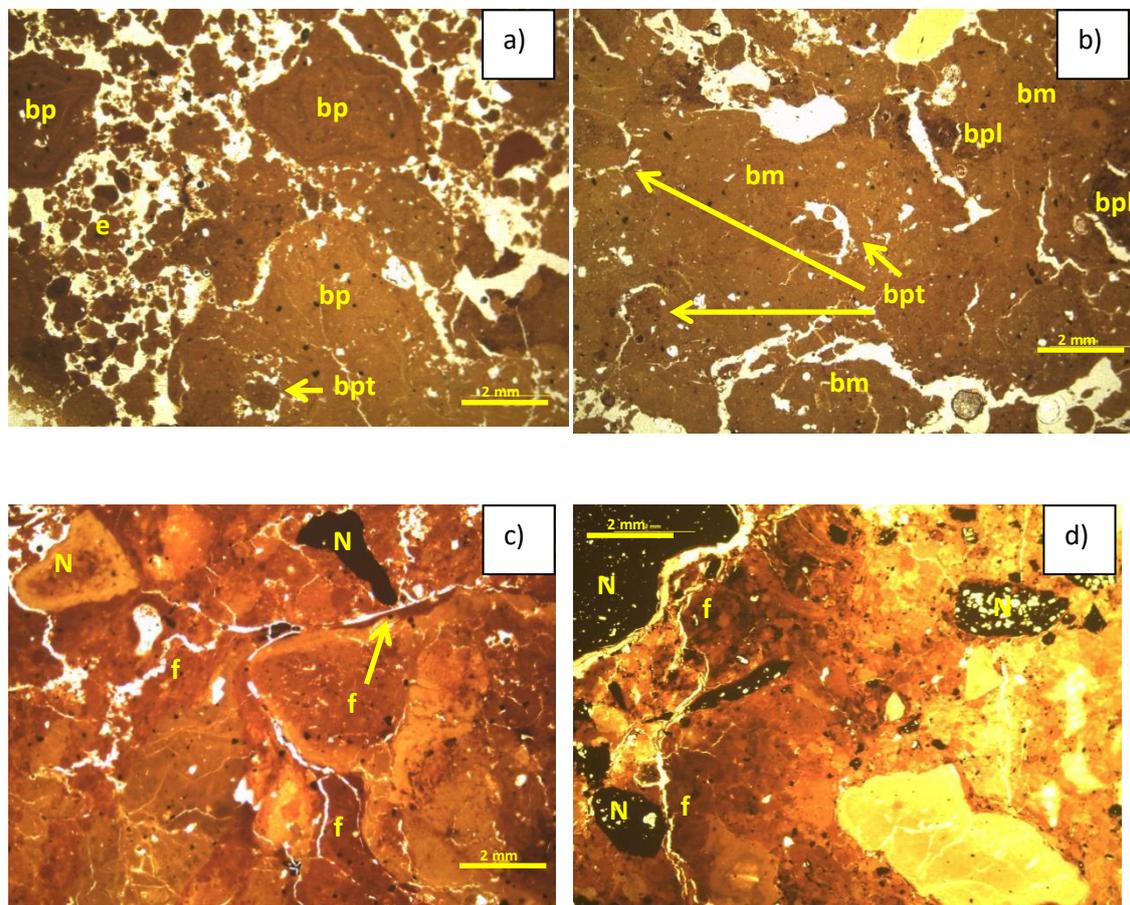
O material correspondente ao horizonte A abrange 40% da lâmina e apresenta estrutura granular (trama enáulica) a poliédrica de diferentes tamanhos, arranjos em trama enáulica. Grande parte dos agregados nesse horizonte é escurecida evidenciando a ação de organismos na incorporação da matéria orgânica (Figura 17, a). A porosidade associada às unidades estruturais é de empilhamento complexo.

Em C/A foi observada estrutura em blocos moderadamente a mal acomodados e delimitados por canais grandes, câmeras, galerias e fissuras intragregados. Geralmente os blocos apresentam trama enáulica fechada em seu interior, onde o volume compacto é frequentemente pedoturbado pela fauna do solo que imprime canais e cavidades no interior dos agregados densos. A ocorrência de cavidades mamilares (Figura 17 b) e preenchimentos densos no interior das cavidades são exemplos da atividade de minhocas (BREWER, 1964, BULLOCK, et al, 1985 VANDEN BYGAART et al 2000) neste horizonte.

Na camada 2Cc foi observado predomínio de massa densa, formada da coalescência de diferentes agregados entremeados a nódulos argilo-ferruginosas ou argilo-bauxíticos, (Figura 17 c). Os nódulos e os volumes plasmáticos maiores e mal individualizados são, por vezes, contornados por poros fissurais (Figura 18 d). No interior dos blocos e de alguns nódulos encontram-se fissuras oblíquas e juntas de fraqueza não conectadas, relacionadas a fenômenos de expansão e contração devido ao umedecimento e secagem do solo. As contrações produzem tensões no interior do solo por diminuição do volume do plasma e isso provoca o aparecimento de rachaduras ou vazios planos (BREWER, 1964, CASTRO 2008).

As feições de pedogênese na camada 2Cc foram evidenciadas pela remobilização contemporânea de ferro com acúmulo desse elemento próximo a poros fissurais (Figura 17, c e d) e domínio de trama porfírica fechada.

Figura 17 - Fotomicrografia do perfil RN09_7. a) Formação de estrutura biogênica granular com trama enálica (e) e blocos poliétricos (bp) no contato entre o horizonte A e C/A; b) horizonte C/A – bloco massivo com canais com preenchimento denso bpt, = corte transversal de biopedotubulos formações da atividade de minhocas, bpl = biopedotúbulo com preenchimento denso (corte longitudinal); c e d) horizonte 2Cc massivo e domínio porfírico, f = remobilização contemporânea de Fe, N = nódulos ferruginosos



Solos construídos em 2014

Por ocasião da descrição e coleta de amostras destinadas a análise micromorfológica, ano de 2016, todos os solos caracterizados nas áreas sob recuperação implantadas em 2014 se encontravam com a superfície praticamente exposta, em campo aberto e a pleno sol, visto que a vegetação apresentava porte pequeno, ou ainda não tinha surgido na área.

Plantio de mudas 2014

Deste perfil (PL14_2) foram descritas lâminas da camada C1 e 2Cc1, correspondentes ao *topsoil* e ao estéril, respectivamente. A maior parte da lâmina de C1 (70%) apresentou estrutura em blocos com evidências que se formaram por pressão, por

sua vez, (Figura 18 a), constituindo trama porfírica que apresenta diferentes graus de abertura.

Os blocos, por sua vez são delimitados por canais alongados e curvos e câmaras grandes, vazias ou preenchidas por material solto devido ao desmantelamento parcial destes blocos, formando agregados granulares muito pequenos e outros fragmentos que por vezes ficam levemente unidos, compondo trama enáulica (20%), conservando porosidade de empilhamento complexa que, dependendo da região observada na lâmina, fica mais fechada (Figura 18 b). Em outros setores, percebe-se que agregados menores voltam a se coalescer e ocupam parte do espaço poroso entre agregados, voltando a formar trama porfírica e preenchendo espaços (Figura 18 b).

Abaixo de C1, a camada 2Cc1 apresenta estrutura granular coalescida, associada a canais e cavidades policôncavas, compondo trama porfírica com vários graus de abertura e profíro-enáulica, 30% da lâmina (Figura 18 c), além, de blocos amassados densos em seu interior (70%) entremeados a nódulos argilo-ferruginosos em vários estágios de alteração. Neste domínio, fissuras alongadas contornam eventualmente os nódulos e separam volumes no plasma compacto e poucas fissuras progridem no interior destas unidades e dos nódulos em alteração.

Nesta camada as feições de alteração estão relacionadas à compactação, causando diminuição considerável de porosidade nos domínios densos. As feições pedogenéticas atuais são representadas pela remobilização de Fe entre nódulos e concentrações localizadas próximo aos vazios do solo ou em fissuras no interior e na superfície dos nódulos (Figura 18 d).

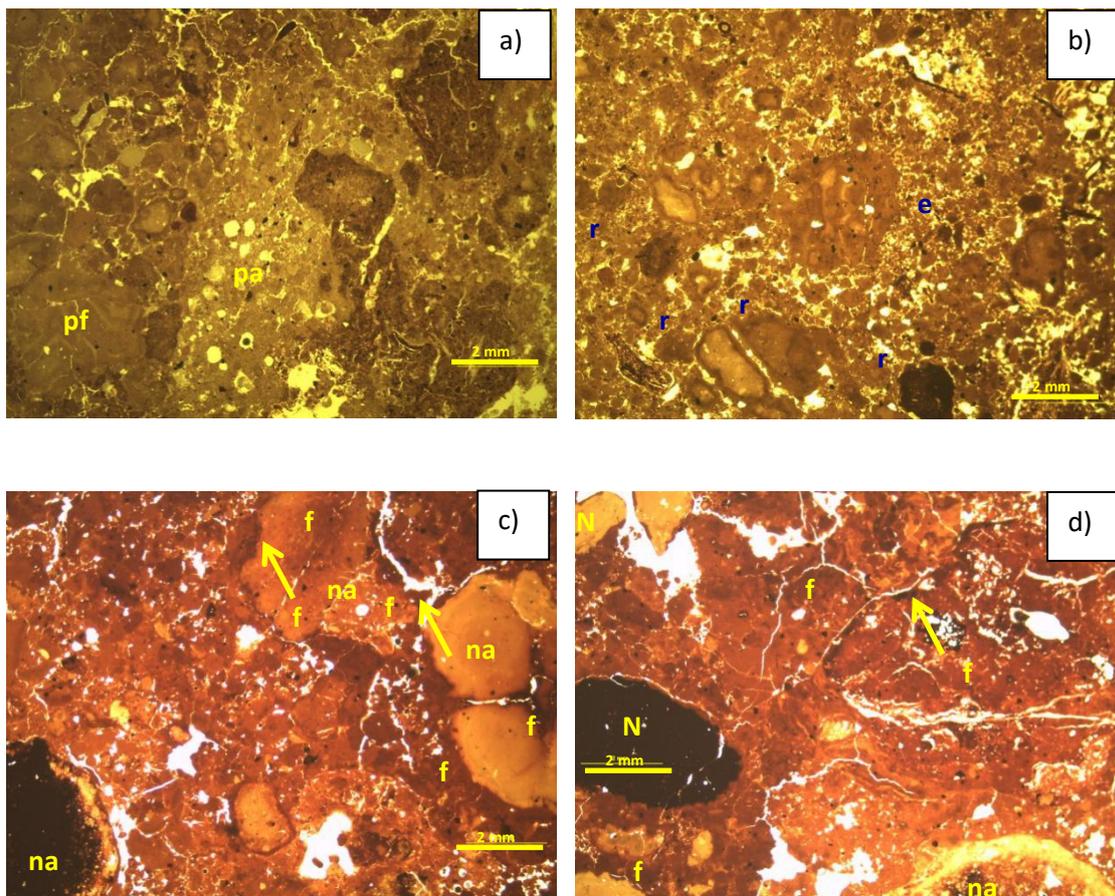
Regeneração natural 2014:

Na área de Regeneração Natural 2014, perfil RN14_2, foram coletadas amostras provenientes da transição C1-C2, correspondendo ao *topsoil* e 2C4, topo da camada estéril.

Na primeira lâmina 40% da área representa a camada C1 e 60% C2. Ambos os volumes C1 e C2 apresentam blocos artificiais densos de tamanho variado e com características muito próximas às encontradas em PL09_7 C1, incluindo as feições de amassamento e de remobilização contemporânea de Fe (Figura 19 a). A porosidade interna nos blocos maiores é representada por juntas de fraqueza alongadas e

relativamente paralelas que evoluem para fissuras debilmente comunicantes ou descontínuas, que se formam devido a repetidos ciclos de umedecimento e secagem no sentido preferencial dos planos de amassamento.

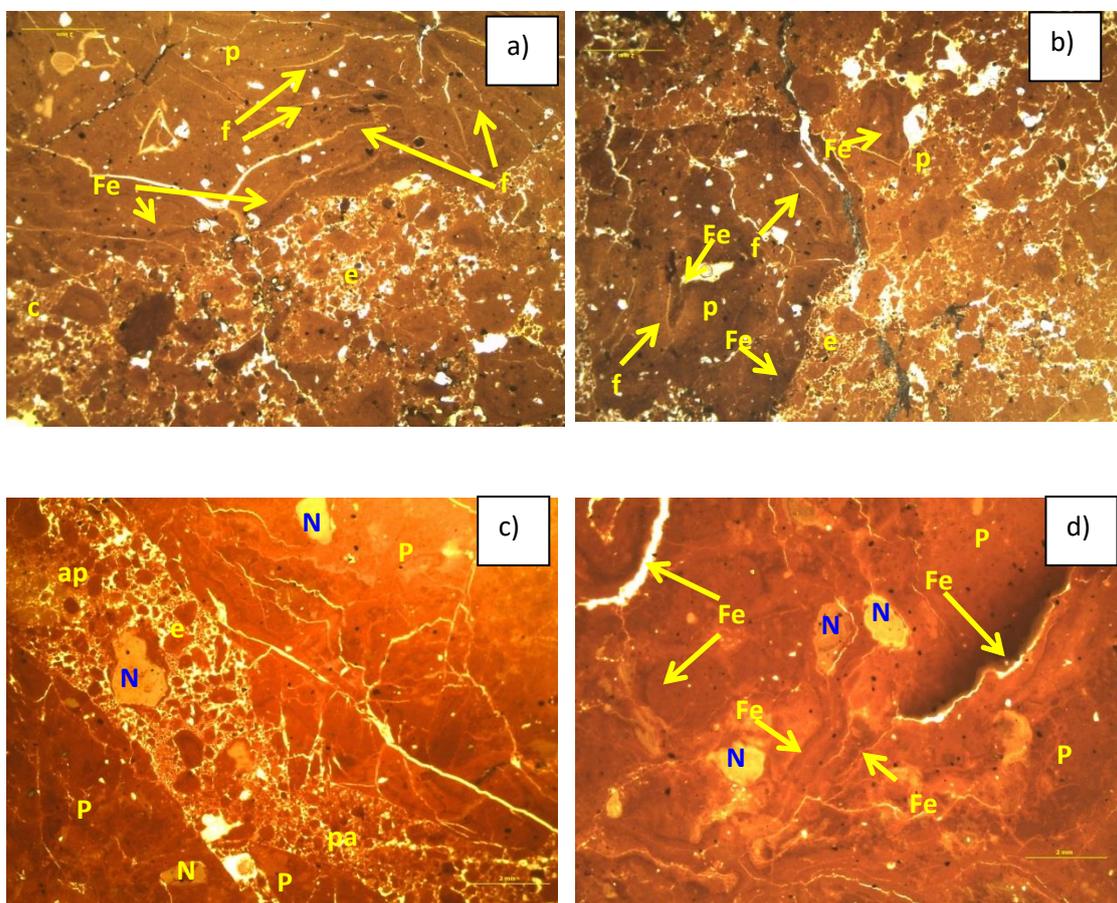
Figura 18- Fotomicrografia do perfil PL14_2 a e b) Camada C1, pf = trama porfírica fechada, pa = trama porfírica aberta, e = trama enáulica, r = remobilização de micro-agregados pequenos e preenchimento de espaços; c e d Camada 2C4, f = remobilização de Fe, na = nódulo em alteração, N = Nódulo argilo-ferruginoso.



Entre os blocos, observa-se fragmentos de agregados e material fino em trama que varia de enáulica a porfírica em vários estados de abertura. Esse material fino provavelmente é decorrente da fragmentação e pulverização dos agregados maiores sujeitos a ciclos constantes de umedecimento e secagem, com a coalescência destes fragmentos. Os fragmentos soltos podem migrar com a água e se depositar em espaços anteriormente vazios, preenchendo-os. A porosidade associada ao material solto é a de empilhamento complexo e à trama porfírica é a fissural e cavitária.

Na camada 2C4 (Figura 19 c e d) o arranjo plásmico é compacto, compondo trama porfírica fechada, com alguns nódulos argilo-ferruginosos, a pedalidade é alterada e fraca e a porosidade é fissural, com planos frequentemente justapostos. As feições pedológicas nessa camada são representadas por um agropedotúbulo com preenchimento derivado do desprendimento de fragmentos de solo no canal, compondo trama enáulica a porfíro-enáulica e feições de remobilização contemporânea de Fe.

Figura 19 - Fotomicrografia do perfil RN14_2 a) Camada de transição C1 – C2; f = juntas de fraqueza e poros fissurais em bloco massivo; e = trama enáulica, p = trama porfírica; pa = trama porfíro-enéulica; c e d) Camada 2C4. ap = agropedotúbulo, Fe = remobilização contemporânea de Fe; p = trama porfírica; pa = trama porfíro-enéulica, N = nódulo argilo-ferruginoso.



Nucleação 2014

Na área de Nucleação 2014, perfil N14_2, foram coletadas amostras provenientes da transição C1 - C2 correspondendo ao *topsoil*, e da camada 2Cc₁, estéril. Na primeira lâmina 70% é referente à camada C1 e 30% à C2.

Na zona correspondente à camada C1 observa-se estrutura granular e blocos angulares e subangulares, ambas de tamanhos diversos, com trama variando de enálica a porfírica aberta. Os blocos maiores apresentam trama porfírica fechada em seu interior e evidências de desmantelamento em alguns planos superficiais, com formação de fragmentos menores, provavelmente devido aos drásticos ciclos de umedecimento e secagem nessa camada superficial de solo descoberto. Como acontece nas outras áreas implantadas em 2014 e que apresentam solo exposto, os fragmentos e micro-agregados menores podem ocupar espaços entre os agregados maiores, assumindo vários graus de coalescência e apresentando trama porfiro-enálica a porfírica. No cenário em que os fragmentos menores obstruem os espaços entre as unidades maiores (Figura 20, a), haverá diminuição da condutividade hidráulica livre no solo.

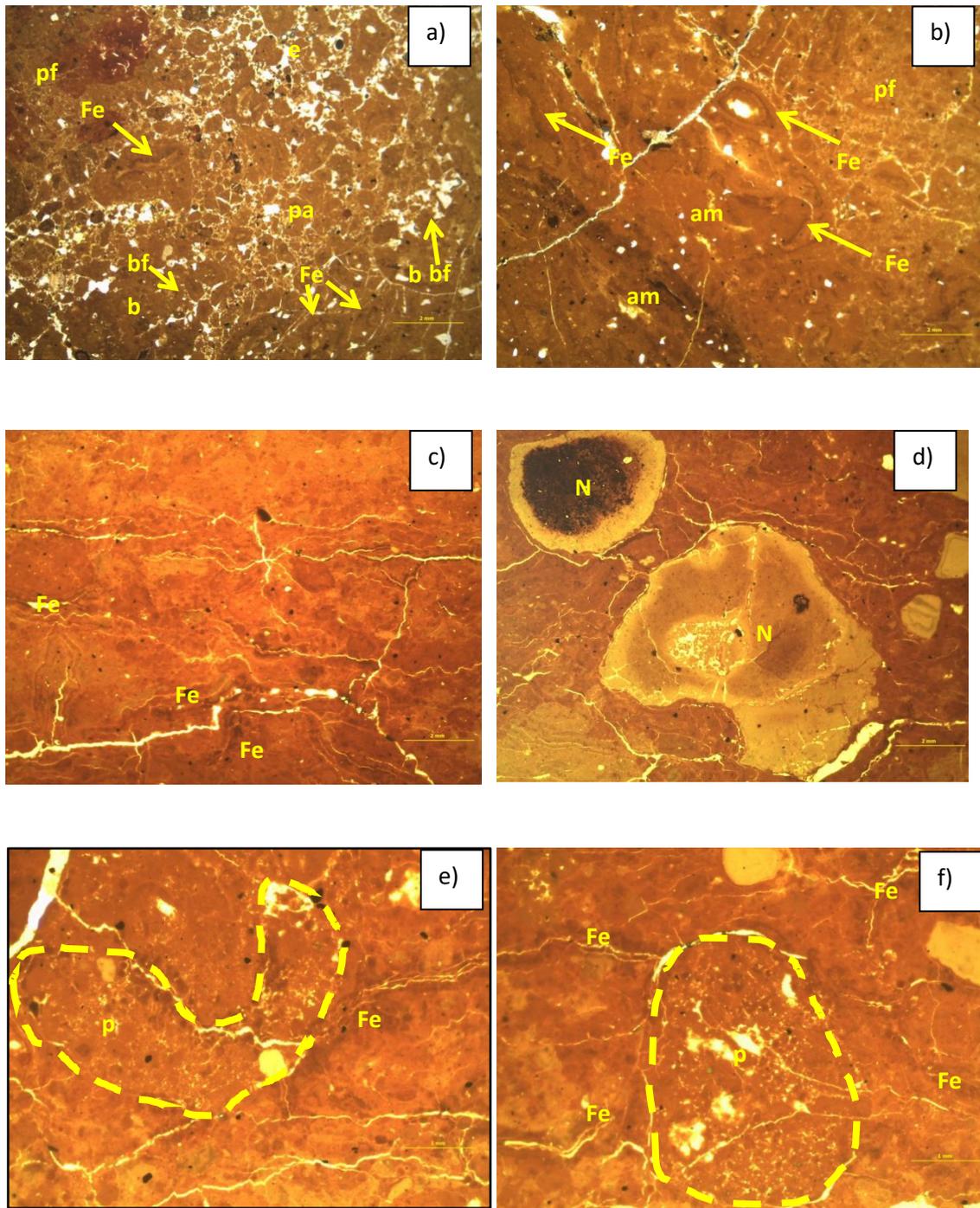
Na parte inferior da lâmina observa-se o domínio C2 com blocos compactos (Figura 20, b), e evidências de amassamentos pela formação de planos bandeados escurecidos e relativamente paralelos devido ao aprisionamento e mistura de material orgânico (Figura 20, b). Esse padrão bandeado escurecido é muitas vezes percebido macroscopicamente. O processo pedogenético incipiente é observado através das feições de segregação de Fe, paralelo a finais fissuras (Figura 20 B (Fe)) indicando que nessa camada ocorrem processos de redoximorfismo temporário.

Abaixo da camada C2 encontra-se 2Cc1 com topo apresentando estrutura laminar com juntas com desenvolvimento horizontal devido à compactação e estrutura densa e trama porfírica fechada, com alguns nódulos em alteração (Figura 20 c e d).

As feições de pedogênese contemporâneas nessa camada são referentes à alteração da estrutura laminar pela fauna (Figura 20 e e f) com a formação de canais preenchidos com microagregados granulares parcialmente coalescidos e acumulação de Fe segregado próximo às fissuras (Figura 20 e e f).

Figura 20- Fotomicrografia do perfil N14_2 a e b) Camada de transição C1 – C2; e = trama enálica; pa = trama porfírica aberta; pf = trama porfírica fechada; bf = bloco massivo com parte da superfície sem fragmentação; am = feições de amassamento; c a f) Camada 2Cc₁ com estrutura laminar no topo (c); n = nódulos em alteração (d) e p =

pedotúbulos biogênicos rompendo a camada compactada de estrutura laminar (na linha tracejada) ; Fe = remobilização contemporânea de Fe.



2.3.4. Caracterização Química

O solo de floresta estudado tem pH muito a extremamente ácido (Meurer, 2007), bem como apresenta P, soma de bases (SB), capacidade de troca catiônica (CTC), saturação por bases (V%) e matéria orgânica do solo (MOS) com valores baixos em todo

o perfil e, assim como acidez potencial, os valores destes atributos são mais elevados nos horizontes superficiais. Entre 79 a 97% da CTC é ocupada pela acidez potencial (H+Al). Além disso, os teores de Al^{+3} e a saturação por alumínio aumentam com a profundidade, ficando acima de 50 % já no horizonte A3 (abaixo de 7 cm) e chegando a 95% no B3, (118 a 200 cm). Baixos teores de bases trocáveis são comuns para solos da região, como apontam Rodrigues et al., (2003). Barreto et al., (2006) e Demattê & Demattê (1993) que constataram valores menores de pH e teores mais elevados de alumínio trocável e acidez potencial em área de floresta.

Nas áreas em recuperação, os solos construídos também apresentaram baixa fertilidade, sendo esta maior nos horizontes ou camadas mais superficiais, relacionados ao *topsoil* e apresentando diminuição de P, SB, CTC e MOS com o aumento da profundidade.

Comparando os valores de CTC do solo sob floresta (FLO) com os encontrados nos perfis das áreas em recuperação, no sistema natural um valor menor que 5 cmol/dm^3 foi encontrado em profundidade inferior a 118 cm. Nos solos construídos valores abaixo desse limite foram encontrados já a partir de profundidades que variaram entre 10 a 40 cm (média de $23,3 \text{ cm} \pm 8,4$), relacionados à camada de estéril.

Por ocasião das primeiras observações feitas em 2016 e em relação às áreas mais antigas implantadas em 2009, as áreas implantadas em 2014 (RN14_2 PL14_2) apresentaram baixo valor de soma de bases em superfície, valores estes comparáveis à camada estéril. Isso pode estar relacionado à quase completa inexistência de cobertura do solo nestas áreas, o que leva à falta da manutenção dos nutrientes por ciclagem e perdas por erosão e lixiviação. Neste sentido Silva et al, (2016) destaca a importância de se promover uma rápida cobertura do solo pois, desta forma, irá proporcionar melhora na fertilidade, fato este que é extremamente importante para áreas mineradas. Entre as áreas mais recentes, com 2 anos de implantação, N14_2 apresentou um ligeiro aumento de SB e V% nas primeiras camadas superficiais, mesmo apesar do baixo conteúdo de MOS. Apesar da falta de cobertura do solo na ocasião, o incremento nos valores de SB e V% provavelmente se da por contribuição de nutrientes provenientes das pilhas de galhos que se encontra em decomposição.

O tempo de condução das áreas em recuperação parece ter efeito positivo na melhoria da fertilidade na superfície dos solos construídos, com relação às áreas mais

antigas, implantadas em 2009, nos horizontes A de ambos os sistemas (plantio de mudas e regeneração natural), observa-se aumento no conteúdo de bases trocáveis (SB), na saturação por bases (V%) e no conteúdo de MOS com o do tempo de condução dos sistemas de 7 a 9 anos. O mesmo comportamento foi observado nas camadas superficiais das áreas implantadas em 2014, além da evolução pedogenética do horizonte A transicionais ou intermediários a este, com tempo de condução de 2 para 4 anos. A melhoria das condições pedogenéticas e de fertilidade nos horizontes superficiais dos solos nos sistemas avaliados acompanha a evolução da cobertura vegetal nestas áreas, o que ressalta o quanto a vegetação é importante para recuperação do solo, através da formação da biomassa vegetal e aporte de matéria orgânica para a promoção da atividade biológica em superfície (RUIVO, 1998).

Os valores mais elevados de SB ,CTC e $V > 50\%$ foram encontrados no horizonte A recentemente formado em RN09_9, que apresentava farta camada de liteira depositada em superfície (Quadro 3), como também nas camadas superficiais de PL14_4 e N14_4 que , apesar da cobertura vegetal deficitária ou pouco eficiente na formação de biomassa nestes sistemas (Tabela 2), há considerável volume de galhos em decomposição entremeados no *topsoil* em A/C e C/A. Um valor de saturação por bases mais elevado também foi encontrado no horizonte A do RN14_4, aberto sob um bosque de agrupamento de muravuvia e que apresentou maior acúmulo de liteira dentre as áreas instaladas em 2014.

Nas camadas subsuperficiais 2C da maioria dos solos construídos observa-se um ligeiro aumento dos teores de P e, em alguns casos, pH ligeiramente mais elevado com baixa concentração de alumínio trocável, em relação aos sub-horizontes B do solo natural. No entanto, foi observada saturação por Al^{3+} maior que 60% nos horizontes subsuperficiais em FLO e, em algumas camadas, no PL09_7, RN09_7, PL14_2 e RN09_2 o que pode causar toxicidade por alumínio, de acordo com Sanches & Logan (1992).

Alguns horizontes dos perfis estudados apresentam camada sub superficial com caráter ácrico (RN09_7, RN14_2, PL14_2, N14_2 e N14_4). O caráter ácrico traz consequências importantes no que se refere à nutrição de plantas, pois a capacidade de troca catiônica efetiva neste solo é muito baixa, com balanço de cargas positivo. Os solos ou horizontes com caráter ácrico, devido seus baixíssimos valores de CTC, apresentam alta taxa de lixiviação dos nutrientes catiônicos. A CTC nestas condições é limitada à

fração coloidal orgânica (CHAVER e CORRÊA, 2005) e pode ser condicionada elevando-se os teores de matéria orgânica do solo, pois a MOS é uma das principais responsáveis pelo aumento da CTC em solos tropicais (BAYER e MIELNICZUK, 2008; NOVAIS et al., 2011). Horizontes ou camadas subsuperficiais com caráter ácrico desfavorecem o aprofundamento radicular. Nesse caso a gessagem pode ser recomendada, pois após a dissociação o Ca^{+2} se desloca com a água às camadas inferiores e estimula o desenvolvimento radicular e a expansão do volume de solo explorado pelas raízes em profundidade (OLIVEIRA et al. 2005), aumentando a tolerância das plantas à seca (SOUSA et al., 2005) o que contribui para o crescimento, desenvolvimento e sobrevivência das plantas em solos construídos.

Tabela 4. Atributos químicos do solo natural sob floresta nativa e dos solos construídos em áreas sob processo de recuperação em função dos sistemas e ano de avaliação em Paragominas, Pará.

Horizonte	pH em água	pH em KCl	P	Ca	Mg	Al	H+Al	K	SB	CTC	V	m	M.O
			(mg/dm ³)	(cmolc/dm ³)					%				
FLO													
A1	5,3	4,8	3,3	1,4	0,8	0,5	8,9	0,157	2,4	11,3	21,04	18,49	2,5
A2	4,5	4,8	1,9	0,9	0,7	0,7	7,8	0,073	1,7	9,51	17,66	30,43	2
A3	4,5	4,2	1,2	0,5	0,3	0,8	7,6	0,048	0,8	8,4	9,38	51,39	1,3
BA	4,4	4,1	0,7	0,2	0,1	1,2	6,5	0,029	0,3	6,79	3,81	82,57	0,8
B1	4,4	4	0,5	0,1	0,1	1,5	6,2	0,009	0,2	6,39	2,94	89,01	0,6
B2	4,4	4,1	0,5	0,1	0,1	1,4	5,3	0,005	0,1	5,46	2,43	91,47	0,4
B3	4,4	4	0,2	0,1	0	2,3	3,3	0,002	0,1	3,37	3,09	95,68	0,3
RN09_7													
A	4,8	4,4	1,9	1,1	0,7	0,3	6,6	0,107	2	8,6	22,89	14,83	1,5
C/A	4,4	3,9	1,7	0,2	0,1	0,9	4,9	0,039	0,3	5,21	6,13	74,44	1,3
2Cc	5	5,1	1,4	0,2	0,2	0,1	2,7	0,016	0,3	3,01	11,54	29,72	0,2
RN09_9													
A	5,7	5,1	1,4	6,3	2,3	0,0	3,1	0,123	8,7	11,82	74,0	0,0	3,5
C/A	5,4	4,4	1,2	1,4	0,4	0,1	4,2	0,061	1,9	6,06	31,0	5,0	1,6
2C	5,1	4,5	1,2	0,8	0,1	0,1	3,1	0,031	0,9	4,03	23,0	10,0	1,0
PL09_7													
A	5,3	4,8	2,2	0,9	0,5	0,2	5,7	0,111	1,5	7,12	20,55	14,34	1,2
C1	4,2	4	1,7	0,4	0,1	0,1	5,4	0,028	0,5	5,95	8,61	22,28	0,8
2Cc	4,9	4,5	0,1	0,2	0,1	1,2	2,7	0,013	0,3	3,06	11,25	78,04	0,4
PL09_9													
A	5,3	4,3	1,6	2,3	1,0	0,1	4,4	0,082	3,4	7,78	43,0	3,0	4,8
C/A	5,1	4,2	1,0	0,6	0,3	0,2	4,1	0,031	0,9	5,03	19,0	18,0	2,0
C1	4,9	4,1	1,0	0,6	0,2	0,4	4,5	0,031	0,8	5,33	16,0	33,0	1,6
2C2	4,9	4,2	1,3	0,6	0,1	0,4	3,3	0,031	0,7	4,03	18,0	35,0	1,2

Tabela 4. Atributos químicos dos solos em áreas sob processo de recuperação em função dos sistemas e ano de avaliação em Paragominas, Pará. Continuação

Horizonte/ Profundidade	pH em água	pH em KCl	P	Ca	Mg	Al	H+Al	K	SB	CTC	V	m	M.O
			(mg/dm ³)	(cmolc/dm ³)					%				
2C3	5,1	5,0	1,0	0,6	0,2	0,0	2,2	0,010	0,8	3,01	27,0	0,0	0,7
3C4	5,0	4,8	1,0	0,5	0,3	0,1	2,2	0,010	0,8	3,01	27,0	11,0	0,7
RN14_2													
C1	5,3	5,2	0,7	0,4	0,3	0,9	4,8	0,057	0,8	5,58	14,27	53,88	1,7
C2	5,3	4,1	0,7	0,4	0,3	0,7	5,7	0,052	0,8	6,45	12,28	48,14	1,5
C3	4,5	4,1	0,4	0,4	0,2	1,1	4,9	0,044	0,6	5,53	11,42	64,11	0,9
2C4	4,5	5,5	0,4	0,1	0,1	0,1	2,3	0,034	0,3	2,55	10,35	27,1	0,3
2C5	4,4	4,2	2,4	0,2	0,2	0,1	1,8	0,021	0,4	2,2	16,02	21,75	0,3
RN14_4													
A/C	5,4	4,8	1,0	2,3	1,0	0,2	4,1	0,123	3,4	7,52	46,0	6,0	2,3
C/A	4,8	4,4	1,3	0,6	0,2	0,6	4,7	0,051	0,9	5,55	15,0	41,0	1,6
2C1	5,0	4,2	1,5	0,7	0,1	0,1	2,8	0,021	0,8	3,62	23,0	11,0	0,7
2C2	5,1	4,6	1,6	0,3	0,2	0,0	1,6	0,010	0,5	2,11	24,0	0,0	0,7
PL14_2													
C1	4,5	4,2	1,8	0,3	0,4	1,6	6,3	0,064	0,8	7,06	10,7	68,2	2,0
2Cc1	4,4	3,9	1,7	0,3	0,2	1,7	5,9	0,035	0,5	6,39	8,1	76,7	1,3
3C2	5,0	5,1	1,7	0,2	0,2	0,0	5,4	0,011	0,3	5,78	5,9	12,5	0,4
4Cc2	5,1	5,4	1,0	0,2	0,1	0,0	2,3	0,020	0,3	2,59	11,6	14,0	0,2
PL14_4													
A/C	5,9	5,0	1,2	5,3	1,1	0,0	3,7	0,235	6,6	10,34	64,0	0,0	3,5
C/A	5,6	4,5	1,4	3,1	0,4	0,0	3,6	0,072	3,6	7,17	50,0	0,0	2,7
2Cc	5,6	5,2	1,2	0,6	0,3	0,0	1,6	0,031	0,9	2,53	37,0	0,0	0,4

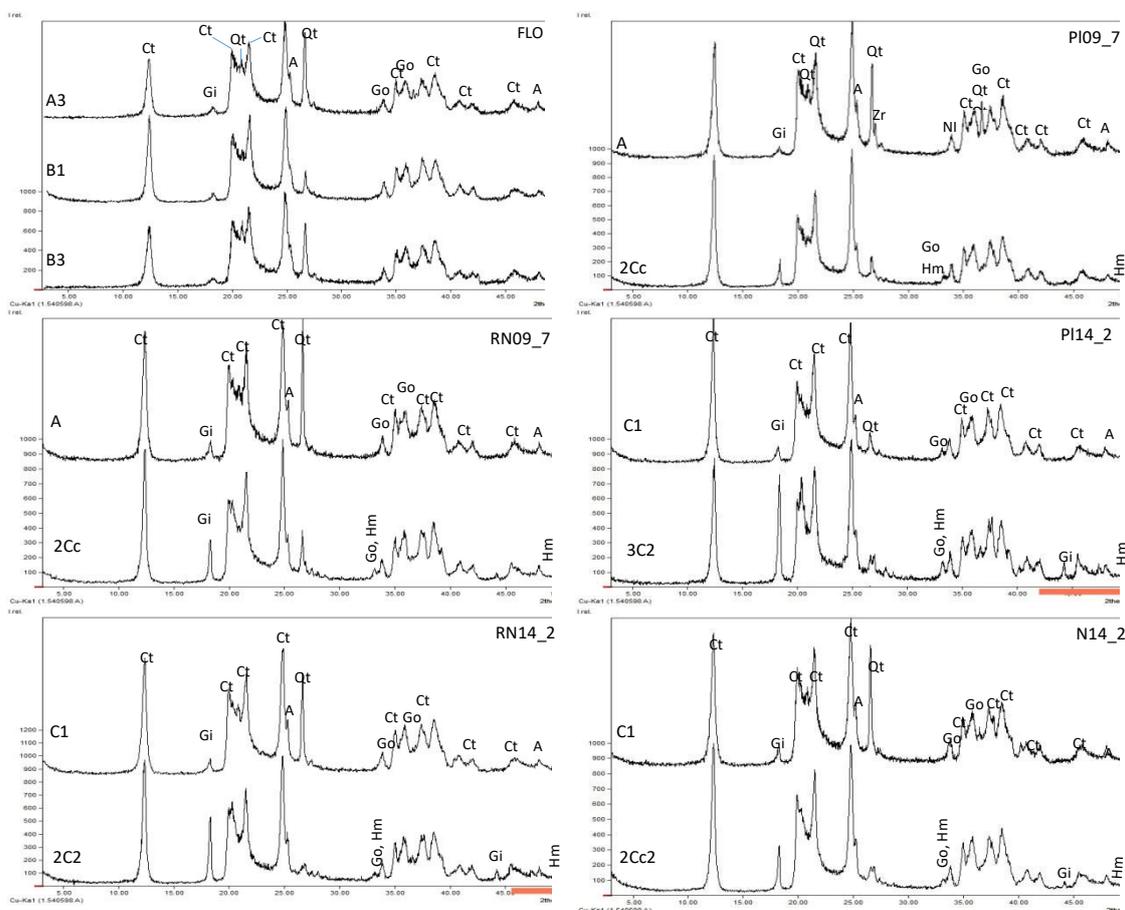
Tabela 4. Atributos químicos dos solos em áreas sob processo de recuperação em função dos sistemas e ano de avaliação em Paragominas, Pará. Continuação

Horizonte/ Profundidade	pH em água	pH em KCl	P	Ca	Mg	Al	H+Al	K	SB	CTC	V	m	M.O
			(mg/dm ³)	(cmolc/dm ³)						%			
N14_2													
C1	5,1	4,8	0,8	1,5	0,3	0,1	4,6	0,06	1,8	6,34	27,92	7,67	1
C2	4,7	4,3	0,9	1,2	0,3	0,3	4,8	0,1	1,6	6,34	24,51	18,08	0,5
2Cc1	4,7	5,2	0,3	0,5	0,4	0	4,6	0,087	0,9	5,5	16,9	5,01	0,3
2Cc2	4,5	5,2	0,3	0,1	0,1	0	2,7	0,038	0,2	2,94	7,38	18,45	0,3
3C3	4,9	5,3	0,4	0,1	0,1	0,1	1,6	0,038	0,2	1,8	9,21	37,18	0,1
N14_4													
C1	5,2	4,5	1,1	0,3	0,1	0,4	2,2	0,031	0,4	2,63	17	48	0,7
A/C	5,9	5,2	1,2	5,2	1	0	2,7	0,072	6,3	8,97	70	0	4,3
C/A	5,0	4,5	3	1,7	0,5	0,2	4,5	0,174	2,3	6,87	34	8	2,3
2Cc	4,5	5,2	1,6	0,5	0,2	0,1	1,5	0,031	0,7	2,23	33	12	0,7

2.3.5 Característica Mineralógica

Na TFSA foram identificados, tanto no perfil sob floresta, como nos perfis de solo construído nas áreas em recuperação, o quartzo, com picos mais pronunciados com espaçamentos basais de 4,26 e 3,33 Å e outros minerais mais comuns na fração argila como caulinita com espaçamentos 7,14 Å e 3,85 Å e gibbsita, com espaçamentos 4,85, 4,37, 2,39, 4,32, 3,38 e 2,88 Å (Figura 21).

Figura 21 – Difratometria de Raios X da TFSA. Ct = caulinita, Qt = quartzo, Go = goethita, Hm = hematite, An = anatásio, Zr = zircão.



A gibbsita ocorreu em todas as camadas / horizontes avaliados), no entanto, nos solos construídos, no *topsoil*, o pico $d=4,85$ Å foi discreto no *topsoil*. Já nas camadas subsuperficiais, formadas pelo material de estéril, consta maior intensidade do pico $d=4,85$ Å desse mineral. Nos horizontes superficiais a solubilidade do quartzo e da opala proveniente das plantas (fitólitos) pode manter a concentração de SiO_2 dissolvido suficientemente alta para prevenir a dessilicação da caulinita à gibbsita, (VAN BREEMEN & BREEKMAM, 1998). O mesmo foi apontado por Mateus et al., (2017),

que verificaram que mudanças físico-químicas no sistema de intemperismo e aumento no teor de matéria orgânica desestabilizam a gibbsita e fornecem uma fonte de sílica para a neoformação da caulinita. Além disso, Truckenbrodt et al. (1991) observaram que a contribuição da vegetação local e a dissolução do quartzo nas camadas mais superficiais são responsáveis por fornecer a sílica necessária para transformação da gibbsita em caulinita, justificando os picos pouco acentuados deste mineral no perfil do solo sob floresta e no *topsoil* dos solos construídos no presente estudo. A maior de concentração de SiO₂ portanto justifica o menor pico deste mineral no *topsoil* proveniente dos horizontes mais superficiais do solo natural.

O enriquecimento de Si nos horizontes superficiais pode se dar por entrada e também acúmulo de detritos quimicamente maduros de origem alóctone, como o influxo eólico descrito por Brimhall et al. (1991). Já a camada estéril é proveniente de material retirado em profundidade, chegando até próximo da camada de bauxita. A gibbsita, em condições de intemperismo e boa drenagem, se forma quando a taxa de lixiviação é expressivamente alta (VAN BREEMEN & BREEKMAM, 1998; KER, 1994; OLIVEIRA et al. 2013), tendendo a se formar também onde há uma maior atividade da água, enquanto que a caulinita se forma em ambientes com menor atividade da água (HORBE & COSTA, 1999). Estudos mineralógicos apontam que quando ocorre aumento na atividade de sílica em solução, juntamente com diminuição de pH, a gibbsita se torna instável e tende a contribuir na formação da caulinita pequena (<1 µm), de forma irregular (VARAJÃO et al., 2001; OLIVEIRA et al., 2013). Conforme Temur e Kansun (2006), para ocorrer a precipitação da gibbsita sob condições de superfície, o pH deve variar nas faixas entre 4,5 e 6,5 e haver uma quantidade de sílica dissolvida na água < 10^{-4,5}.

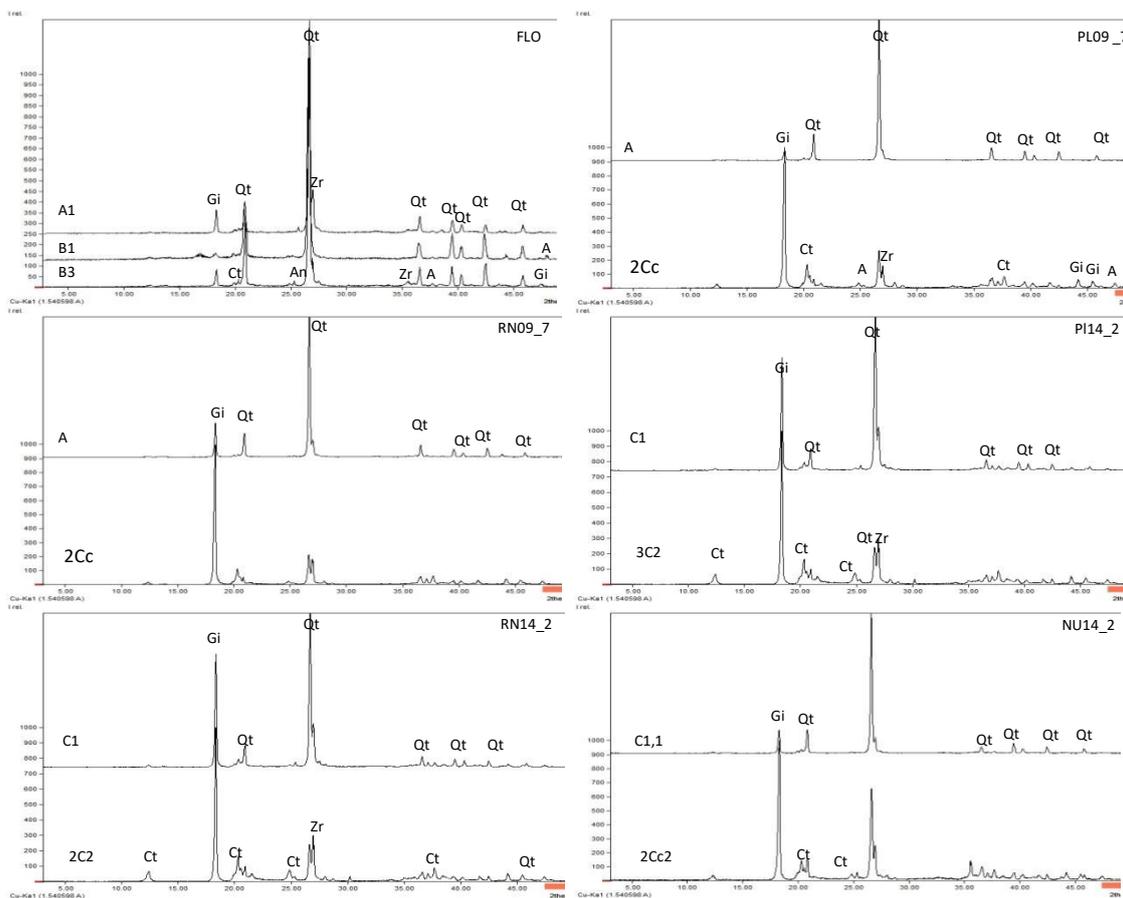
Tanto no solo natural sob floresta, como nos solos construídos nas áreas de recuperação, a gibbsita parece estar mais presente nas frações mais grosseiras, pois seus picos 4,85 Å são mais intensos na TFSA e nas frações areia e silte, sobretudo nas camadas subsuperficiais, dos solos construídos. Na fração argila os picos no espaçamento 4,85 Å são frequentemente mais discretos, salvo para as camadas C1 e 3C2 e 2C4 dos sistemas PL14_2 e RN14_2, respectivamente.

Os picos dos óxidos de ferro foram pouco expressivos, predominando goethita (d= 4,18, 2,69, 2,45, 2,18 Å) em todos horizontes/camadas. A hematita (d= 3,66, 2,69

2,51 2,20 e 1,83 Å) foi observada nas camadas subsuperficiais nos solos construídos relacionadas ao estéril, que geralmente é mais vermelho (matizes 5 YR a 2,5 YR).

Na fração areia, tanto do solo sob floresta, quanto dos solos construídos, o mineral mais expressivo foi o quartzo ($d= 4,26, 3,34, 2,56, 2,21, 1,81$ Å). No entanto, a gibbsita ($d=4,85, 2,88$ e $3,38$ Å) e até a caulinita ($4,40, 4,37, 3,58, 2,42, 2,38$ e $2,34$ Å) foram frequentemente evidenciadas nessa fração coincidindo com o quartzo, principalmente nas camadas de estéril nos solos construídos (Figura 21). Esses minerais de argila ocorreram também na fração silte nos horizontes B3 no perfil de solo sob floresta e com picos pronunciados nas camadas C1 e 2C4 em RN14_2 e camadas 2Cc, 2Cc, 3C2 dos perfis PL09_7, RN09_7, PL14_2, respectivamente (Figura 22).

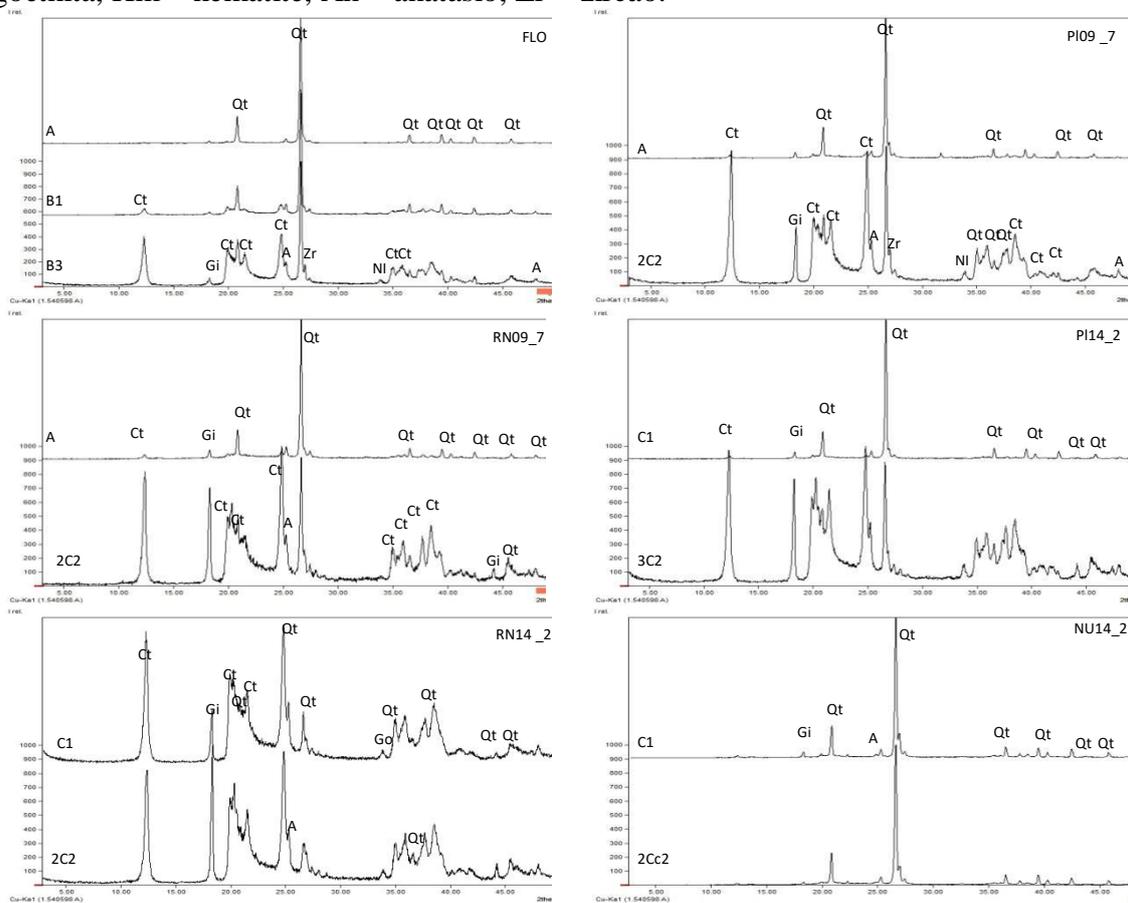
Figura 22 – Difratometria de Raios X da fração areia. Ct = caulinita, Qt = quartzo, Go = goethita, Hm = hematite, An = anatásio, Zr = zircão.



A ocorrência de gibbsita e caulinita nas frações areia e silte (Figura 23) pode estar relacionada à existência de pequenos nódulos resistentes que se conservaram nessa fração, mesmo após o processo de remoção dos agentes cimentantes, pois a gibbsita não é afetada pelo tratamento com CBD. Segundo Melo (1998), a caulinita, na fração silte, pode encontrar-se na forma de agregados bastante estáveis. Para Mateus et al. (2017) a

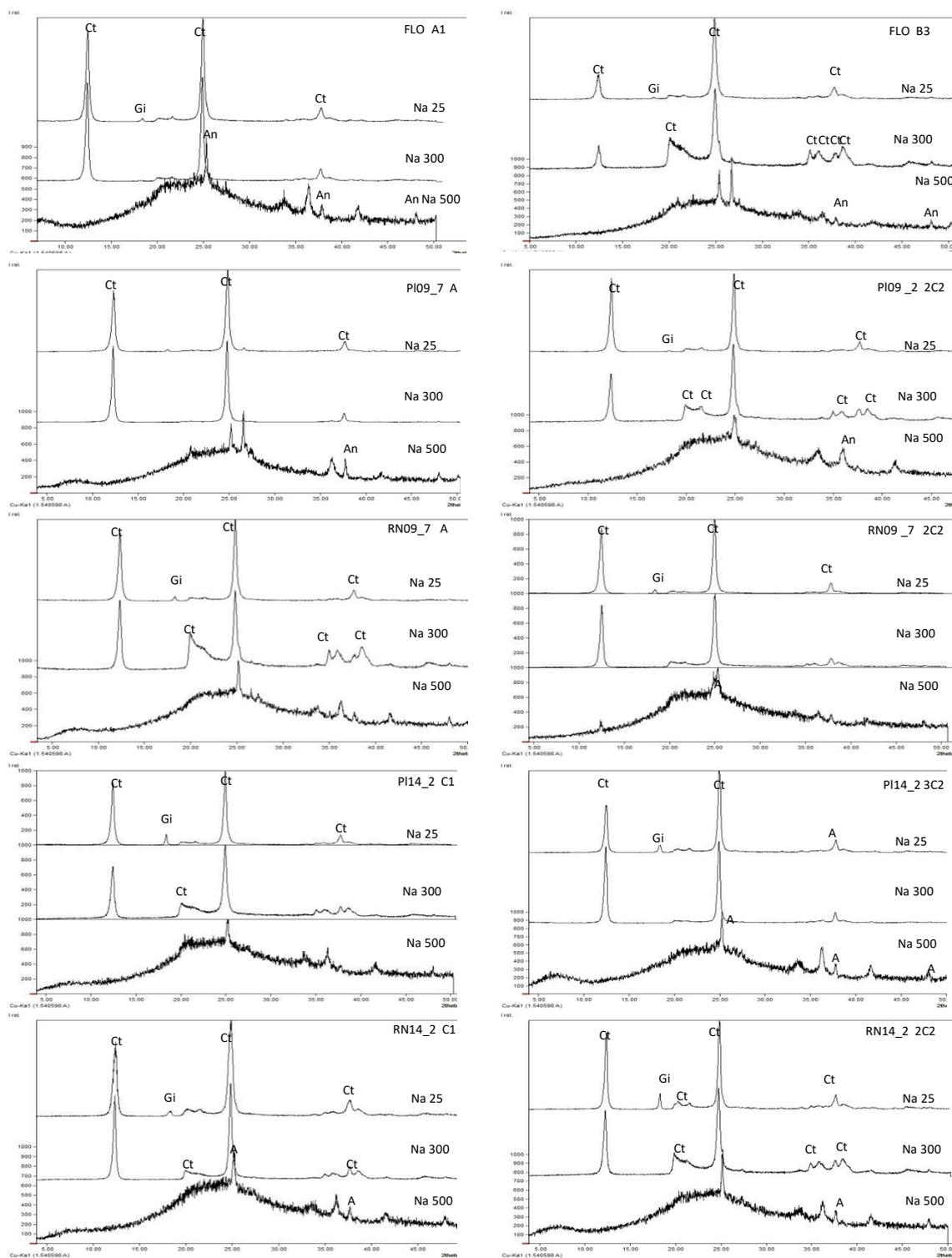
formação de microestruturas e a formação de nódulos relictos de bauxita (gibbsita) se dá no processo de bauxitização. Melo et al. (2002), em seu estudo sobre mineralogia das frações areia, silte e argila de sedimentos do grupo barreiras, também encontraram a ocorrência de caulinita na fração silte. Nos nódulos, podem permanecer características da microestrutura interna do processo de bauxitização que deixarão de existir para se tornar argila de micromassa com cristais de gibbsita imersos em uma matriz de caulinita que pode se conservar na amostra após o tratamento e colaborar para manter pequenos nódulos e microagregados estáveis (MATEUS et al., 2017).

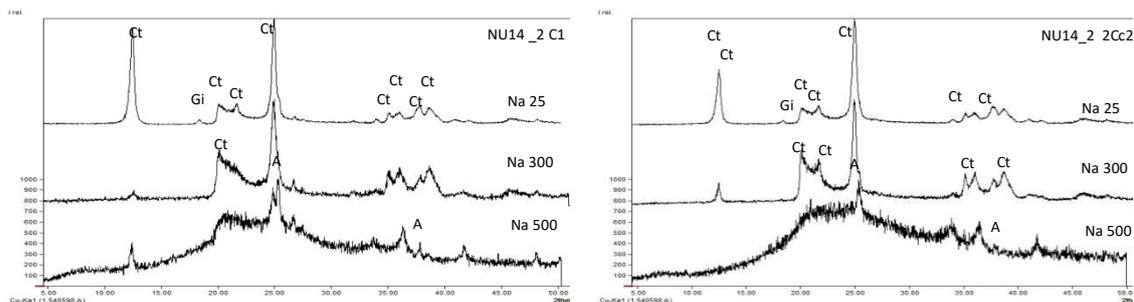
Figura 23 – Difratometria de Raios X da fração silte. Ct = caulinita, Qt = quartzo, Go = goethita, Hm = hematite, An = anatásio, Zr = zircão.



Na fração argila, após remoção dos agentes cimentantes, observou-se caulinita e gibbsita com espaçamentos basais de 7,14 Å e 3,85 Å e 4,85 Å, respectivamente, quando tratada com Na a 25°C. Após aquecimento a 300°C o pico da gibbsita desapareceu, restando apenas o da caulinita que, com o aquecimento a 500°C se extinguiu, evidenciando o anatásio ($d= 3,51$ e $1,89$ Å) (Figura 24).

Figura 24 – Difratometria de Raios X da fração argila. Ct = caulinita, Qt = quartzo, Go = goethita, Hm = hematite, An = anatásio, Zr = zircão.





Em alguns casos (horizonte B1 da FLO e camadas 2C2 e C1, de RN09_7 e N14_2, respectivamente), vestígios dos picos da caulinita se perpetuaram mesmo após o aquecimento a 500°C, o que pode ser devido a ocorrência de cristais grandes e bem formados desse mineral.

A difração da argila orientada, após remoção dos agentes cimentantes nos solos estudados, tanto em floresta quanto nas áreas em recuperação, apresentou picos agudos e proeminentes nos espaçamentos 3,14 e 3,58 Å, indicando predominância de caulinita bem ordenada e de boa cristalinidade. Por outro lado, os picos mais discretos encontrados nos espaçamentos próximos a 4,5 Å na argila orientada indicam baixa cristalinidade ou menor tamanho dos cristais deste mineral, pois a caulinita de alta cristalinidade e maior tamanho tendem a não formar picos na região de 4,5 Å (RESENDE et al 2005; LIU et al. 2010).

De maneira geral, solos com menores teores de Fe₂O₃ apresentam caulinita mais bem cristalizada (RESENDE et al, 1976). O grau de cristalinidade ou o tamanho predominante dos cristais de caulinita pode influenciar no comportamento ou resposta do solo a vários fatores. À exemplo da densidade do solo, Ferreira et al, (1999) em seu estudo sobre influência da mineralogia da fração argila nas propriedades físicas de Latossolos caulíníticos e gibbsíticos, encontraram correlação positiva entre as propriedades físicas e os valores de caulinita, em que a densidade do solo variou diretamente com os valores de caulinita encontrados, tendo conseqüentemente menos porosidade e permeabilidade. Estes autores explicam que esse fato ocorre devido ao ajuste face a face das placas de caulinita, que desta forma, desenvolvem plasma denso lhe dando valores de densidade do solo mais altos.

Lima Neto et al. (2010), no estudo sobre Latossolos e Argissolos Amarelos distrocoesos, também encontraram predomínio de caulinita na fração argila, os autores comentam que sua forma laminar contribui para a coesão dos solos. Beneditte et al.

(2011), observaram em seu estudo constataram que o predomínio de caulinita propicia ao solo baixa fertilidade natural.

2.4 CONCLUSÃO

Com relação ao solo natural, as alterações negativas mais evidentes constatadas nos solos construídos foram: sequência vertical *topsoil* - estéril com transição abrupta entre estas camadas; abundância de nódulos ferruginosos próximo à superfície em alguns perfis (RN09_7, RN09_9, PL09_7, PL14_4, N14_2, N14_4); degradação estrutural com aumento de densidade e evidências compactação; pulverização de agregados na superfície do solo expostos nas áreas com 2 anos; picos expressivos de gibbsita nas camadas de estéril e decréscimo acentuado dos valores de CTC ($<5\text{cmolc dm}^{-1}$) em camadas próximas à superfície e, em alguns casos, desenvolvimento de caráter ácido (RN09_7, RN14_2, PL14_2, N14_2 e N14_4), que promove alta taxa de lixiviação dos nutrientes catiônicos.

Não foram observados horizontes de solo nas áreas de 2 anos de condução, mas em todas as áreas foram observadas feições de remobilização contemporâneas de ferro com concentrações localizadas deste elemento próximas a juntas e fraqueza e poros fissurais, evidenciando condições redoximórficas temporárias destes solos construído.

O tempo e os organismos agiram sobre os sistemas de recuperação e influenciaram de maneira progressiva e positiva na reorganização da estrutura e na formação de agregados biogênicos contemporâneos que ocorreram em sítios onde o solo se manteve coberto por serapilheira (RN09_7, RN09_9, PL09_7, PL09_9 e RN14_4), ou onde restos de galhos da supressão estavam incorporados e/ou cobriam o *topsoil* (PL14_4 e N14_4, respectivamente). O desenvolvimento desse tipo de estrutura resultou na formação dos horizontes A/C e C/A nas áreas com 4 anos e horizontes A e C/A nas áreas de 7 e 9 anos.

Dentre as áreas com maior tempo de condução, 7 e 9 anos, a regeneração natural apresenta maior abundância de plantas no estrato superior e maior evolução pedogenética com a formação de um horizonte A contínuo e mais estruturado e horizonte C/A mais espesso que os encontrados em PL09_7, cujo preparo foi realizado com solo muito úmido, resultando na formação de estruturas laminares e camadas compactadas bem próximas à superfície, o que influenciou negativamente desenvolvimento vegetação e atrasou a evolução da pedalidade.

Dentre os sistemas estudados, a regeneração natural instalada em 2009, com 7 e 9 anos de condução apresentou horizonte A com organização estrutural mais próxima à

encontrada no horizonte A1 do solo inalterado sob floresta, mostrando ser o melhor sistema de recuperação do solo até esta fase de estudo.

2.5 REFERÊNCIAS

- ALMEIDA, DS. Alguns princípios de sucessão natural aplicados ao processo de recuperação. In: Recuperação ambiental da Mata Atlântica [online]. 3rd ed. rev. and enl. Ilhéus, BA: Editus, 2016, pp. 48-75. ISBN 978-85-7455-440-2.
- A.J. MELFI Brazilian bauxite deposits: a review A. Carvalho, B. Boulangé, A.J. Melfi, Y. Lucas (Eds.), **Brazilian Bauxites**, USP/FAPESP/ORSTOM, São Paulo – Paris (1997), pp. 3-22.
- ARGENTON, J.; ALBUQUERQUE, J.A.; BAYER, C. & WILDNER, L.P. Comportamento de atributos relacionados com a forma da estrutura de um Latossolo Vermelho sob sistemas de preparo e plantas de cobertura. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, 29:425-435, 2005.
- BARROS, E.; GRIMALDI, M.; SARRAZIN, M.; CHAUVEL, A.; MITJA, D.; DESJARDINS, T.; LAVELLE, P. Soil physical degradation and changes in macrofaunal communities in Central Amazon. **Applied Soil Ecology** 26 (2004) 157–168
- BARROS, D. A.; PEREIRA, J. A. A.; FERREIRA, M. M.; SILVA, B. M.; FILHO, D. F.; NASCIMENTO; G. O. Soil physical properties of high mountain fields under bauxite mining. **Ciência e Agrotecnologia**, Lavras, v. 37, n. 5, p. 419-426,. 2013.
- BARRETO, A. C. et al. Características químicas e físicas de um solo sob floresta, sistema agroflorestal e pastagem no sul da Bahia. *Caatinga*, v.19, n.4, p.415-425, 2006.
- BASTOS, T. X.; SILVA, G. de F. G. ; PACHECO, N. A.; FIGUEIREDO, R. de O. Informações agroclimáticas do município de Paragominas para o planejamento agrícola. Separatas, **Embrapa Amazônia Oriental**, 2006.
- BENEDETTI, U. G.; VALE JUNIOR, J. F.; SCHAEFER, G. R. et al. Gênese, química e mineralogia de solos de Derivados de Sedimentos plioleustocênicos e de Rochas vulcânicas Básicas Roraima, Norte Amazônico. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, 35:299-312, 2011.
- BERTSCH, P.M, SEAMAN, J.C. Characterization of complex mineral assemblages: Implications for contaminant transport and environmental remediation. **Proc. Natl. Acad. Sci. USA**, 96: 3350-3357, 1999.
- BOULANGE B. & CARVALHO A. The bauxite of Porto Trombetas. In: Carvalho A., Boulangé B., Melfi A. J. & Lucas Y. (coord.) **Brazilian bauxites**. USP/FAPESP/ORSTOM, Brazil. 55-73.,1997.
- BREWER, R. **Fabric and mineral analysis of soils**. Huntington, New York: Robert E. Krieger Publications Co., 1964.
- BRIMHALL GH, CHRISTOPHER JL, FORD C, BRATT J, TAYLOR G, WARIN O. Quantitative geochemical approach to pedogenesis: importance of parent material reduction, volumetric expansion, and eolian influx in laterization. **Geoderma**. 1991;51:51-91

BRADSHAW A.D.; CHADWICK M.J. 'The restoration of land—the ecology and reclamation of derelict and degraded land'. **Blackwell Scientific Publishers**: Oxford, 1980

BRADY, N. C; WEIL, R. R. Elementos da Natureza e propriedades do solo. Editora Bookman, 3ªed. 2012.

BRINDLEY, GW.; BROWN, G. Cristal structures of clay minerals and their X ray identification. Lonon: Mineralogical Society, 1980. 495p.

BULLOCK, P.; FEDOROFF, N.; JONGERIUS, A.; STOOPS, G. TURSINA, T. **Handbook for Soil Thin Section Description**. Wolverhampton: Waine Research Publications, 1985. 152p.

CAMARGO, O.A. de; MONIZ, A.C.; JORGE, J.A.; VALADARES, J.M.A.S. **Métodos de análise química, mineralógica e física de solos do Instituto Agronômico de Campinas**. Ed.rev.atual. Campinas: Instituto Agronômico, 2009. 77p. (IAC. Boletim técnico, 106).

CAMPOS, M.L. et al. Avaliação de três áreas de solo construído após mineração de carvão a céu aberto em Lauro Müller, Santa Catarina. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.27, p.1123-1137, 2003.

CASTRO, S. S. **Micromorfologia de Solos: Bases para descrição de lâminas delgadas**. UFG-IESA, UNICAMP-IG-DGEO, Goiânia/Campinas. 2ª edição. 2008. 143 p.

COACALLA, T. Z. **Estimativa de propriedades hidráulicas de solos a partir do ensaio de ascensão capilar**.Dissertação de Mestrado. Programa de Pós- Graduação em Geotecnia, Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, 166p., 2012

CHAVES, R. Q.; CORRÊA, G. F. Macronutrientes no sistema solo- Pinus caribaea Morelet em plantios apresentando amarelecimento das acículas e morte de plantas. *Revista Árvore*, v.29, p.691-700, 2005.

CHEN, P., Table of key lines in X-ray powder diffraction patterns of minerals in clays and associated rocks: Indiana Geological Survey Occasional Paper 21, 67 p., 1 table, 21 app. 1977.

CHINN, C. & PILLARI, U.P.P. Self- repair of compacted Vertisols from Central Queensland. *Geoderma*, 144: 491-504, 2008.

CURCIO, G.; LIMA, V; GIAROLA, N. F. B. **Proposta de Ordem dos Antropossolos** (1ª Aproximação). Colombo: EMBRAPA Florestas, 2004.

DANIELS, W. L.; HAERING, K.C.; GALBRAITH, J. M. Mine soil morphology and properties in pre- and post- smcra coal mined landscapes in Southwest Virgina. **Proceedings America Society of Mining and Reclamation**, p 241-449, 2004

DAWS, M. I., STANDISH, R. J., KOCH, J. M., MORALD, T. K., TIBBETT, M., & HOBBS, R. J.. Phosphorus fertilisation and large legume species affect Jarrah Forest

restoration after bauxite mining. **Forest Ecology and Management**, 354, pag. 10–17. 2015.

DEMATTÊ, J.L.I.; DEMATTÊ, J.A.M. Comparações entre as propriedades químicas de solos das regiões da floresta Amazônica e do Cerrado do Brasil Central. **Scientia Agricola**, v.50, n.2. p.272-286, 1993.

EMBRAPA AMAZÔNIA ORIENTAL, MAPA de solos do Município de Paragominas – Estado do Pará. 1999 Disponível em: <<http://ainfo.cnptia.embrapa.br/digital/bitstream/item/106004/1/doc-162-mapa-1.pdf>>. Acesso em 18 de julho de 2017

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA — EMBRAPA. **Manual de métodos de análises de solo**. 2.ed. Rio de Janeiro, Ministério da Agricultura e do Abastecimento, 1997. 212p.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA - EMBRAPA. Centro Nacional de Pesquisa do Solo. **Sistema brasileiro de classificação de solos**. 5.ed., rev. e ampl. – Brasília, DF : Embrapa, 2018.

FEITOSA, A. A. N. Diversidade de espécies florestais arbóreas associada ao solo em topossequência de fragmento de Mata Atlântica de Pernambuco. 2004. 102f. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal Rural de Pernambuco, Recife, 2004.

FERREIRA, M. M. FERNANDES, B. & CURI, N. Influência da mineralogia da fração argila nas propriedades físicas de Latossolos da região Sudeste do Brasil. **R. Bras. Ci. Solo**, 23:515-524, 1999.

FROUZ J, PRACH K, PI LV, HÁNĚL L, STARY J, TAJOVSKY K, MATERNA J, BALÍK V, KAL ÍK JÍ, EHOUNKOVÁ K. Interactions between soil development, vegetation and soil fauna during spontaneous succession in post mining sites. **European Journal of Soil Biology**, v.44, Issue 1, p.109-121, 2008

GILLMAN, G. P. The influence of net charge on water dispersible clay and sorbed sulfate. *Australian Journal Soil Research*, v.12, p. 176, 1974.

GUEBERT, M.D.; GARDNER, T.W. Macropore flow on a reclaimed surface mine: infiltration and hillslope hydrology. **Geomorphology**, v.39, p.151-169, 2001.

HORBE A.M.C. & COSTA M.L. Solos gerados a partir do intemperismo de crostas lateríticas sílico-ferruginosas. **Acta Amazônica** 27:241-256, 1997.

HYDRO. **Mineração de Bauxita**. Disponível em: <<http://www.hydro.com/pt/Aluminio/A-Hydro-no-Brasil/Sobre-o-aluminio/Ciclo-de-vida-do-aluminio/Mineracao-de-bauxita/>>. Acesso em 22 de julho de 2017.

INSTITUTO BRASILEIRO DE MINERAÇÃO. **Informações sobre a economia mineral brasileira 2015**. Brasília, 2015. 25 p.

IUSS Working Group WRB: **World Reference Base for Soil Resources 2014**, Update 2015. *World Soil Resources Reports 106*, FAO, Rome 2015.

JOSA, R.; JORBA, M. & VALLEJO, V.R. Opencast minerestoration in a Mediterranean semiarid environment: Failure of some common practices. **Ecological Engineering**, 42:183-191, 2012.

KÄMPF, N. et al. Propriedades, pedogênese e classificação de solos construídos em áreas de mineração na bacia carbonífera do baixo Jacuí (RS). **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.21, p.79-88, 1997.

KER, J. C. Latossolos Do Brasil : uma revisão. *Geonomos*, v. 5, n. 1, p. 17–40, 1994.

LIMA NETO, J. A.; RIBEIRO, M. R.; CORRÊA, M. M. et al. Atributos químicos, mineralógicos e micro morfológicos de horizontes coesos de latossolos e argissolos dos tabuleiros costeiros do estado de alagoas. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**. 34:473-486, 2010.

LIU X, WANG Q, DENG J, ZHANG Q, SUN S, MENG J. Mineralogical and geochemical investigations of the Dajia Salento-type bauxite deposits, western Guangxi, China. **J Geochem Explor**. 2010;105:137-152.

LUCAS Y, LUIZÃO F.J., CHAUVEL A., ROUILLER J., NAHON D. The relation between biológica activity of the rain forest and mineral composition of soils. **Science**, 260:521-523, 1993.

LYNCH, L.S. **Indicadores de recuperação de áreas degradadas pela exploração de bauxita em Porto Trombetas- PA**. (Tese Doutorado), Universidade Federal de Viçosa, Curso de Solos e Nutrição de Plantas, 2004.

MACDONALD, S. E., LANDHÄUSSER, S. M., SKOUSEN, J., FRANKLIN, J., FROUZ, J., HALL, S., QUIDEAU, S. Forest restoration following surface mining disturbance: Challenges and solutions. **New Forests**, 46, 703–732. 2015.

MAGALHÃES, V. L.; LEOPOLD, V; CUNHA, J. E.; NÓBREGA, M. T..Dinâmica físico-hídrica de um sistema pedológico Latossolo-Nitossolo. **Mercator**, Fortaleza, v. 16, e16022, 2017.

MALAVOLTA, E.; VITTI, G. C.; OLIVEIRA, S. A. de. **Avaliação do estado nutricional da planta: Princípios e aplicações**. Piracicaba: Potafos, 1997. p.115-230.

MELO, V. F.; NOVAIS, R. F.; SCHAEFER, C. E. G. R.; FONTES, M. P. F.; SINGH, B. Mineralogia das frações areia, silte e argila de sedimentos do grupo barreiras no município de Aracruz, Estado do Espírito Santo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, 26:29-41, 2002

MELO, V.F. **Potássio e magnésio em minerais de solos e relação entre propriedades da caulinita com formas não trocáveis destes nutrientes**. Viçosa, Universidade Federal de Viçosa, 1998. 205p. (Tese de Doutorado)

MELLO, V. F.; WYPYCA, F. VII Caulinita e halosita. In MELO, V. F.; ALEONI, L. R. F. **Química e mineralogia do solo: Parte I – Conceitos básicos**, p. 427-504, 2009.

MARTINS, H. D.; NUNES, S. S.; SALOMÃO, R. R.; OLIVEIRA JR., L.A.; BATISTA, R. W.; MARTINS, J. R.; SOUZA JR., C. M. Mapeamento da cobertura do solo de Paragominas-PA com imagens de satélite de alta resolução: aplicações para o Cadastro

Ambiental Rural (CAR). **XVI Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto - SBSR**, Foz do Iguaçu, PR, Brasil, 13 a 18 de abril de 2013.

MATEUS, A. C.C.; OLIVEIRA, F.S.; FORTES, A.; VARAJÃO, D. C.; SOARES, C.C.V. Genesis of Soils from Bauxite in Southeastern Brazil: Resilication as a Soil-Forming Process. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**;41:e 0160507, 2017

NGUYEN, C., Q.; GUPPY, C.; & MOODY, P. Effect of P and Si amendment on the charge characteristics and management of a Geric soil. World Congress of Soil Science, Soil Solutions for a Changing World 57 1 – 6 August 2010, Brisbane, Australia. Published.

NUNES, W.A.G.A.; SCHAEFER, C.E.G.R.; KER, J.C. & FERNANDES FILHO, E.I. Caracterização micropedológica de alguns solos da zona da mata mineira. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, 24:103-115, 2000.

OLIVEIRA, C.V.; KER, J.C.; DUARTE, M.N.; CURTI, N. & FONTES, L.E.F. Atributos micromorfológicos de solos do Projeto Jaíba, norte de Minas Gerais. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, 24:117-128, 2000.

OLIVEIRA F.S, VARAJÃO AFDC, VARAJÃO CAC, BOULANGÉ B. A Comparison of properties of clay minerals in isalteritic and in degraded facies. **Clay Miner.** a;48:697-711, 2013.

OLIVEIRA F.S, VARAJÃO AFDC, VARAJÃO CAC, BOULANGÉ B, SOARES CCV. Mineralogical, micromorphological and geochemical evolution of the facies from the bauxite deposit of Barro Alto, Central Brazil. **Catena**. 2013;105:29-39

OLIVEIRA FILHO, L. C. I.; BARETTA, D.; VIAPIANA1, C. M. E SANTOS, J. C. P. Mesofauna de solo construído em área de mineração de carvão. **Revista de Ciências Agroveterinárias**, Lages, v.14, n.1, p.55-64, 2015

OLIVEIRA, J.B. **Pedologia aplicada**. 3.ed. Piracicaba, FEALQ, 2005. 592p

PASSIOURA, J.B. Soil structure and plant growth. **Australian Journal of Soil Research** ., 29:717-728, 1991.

PINTO, A.; AMARAL, P.; SOUZA JR, C.; VERÍSSIMO, A.; SALOMÃO, R.; GOMES, G.; BALIEIRO, C. Diagnóstico socioeconômico e florestal do município de Paragominas. Belém: IMAZON, 2009. 65p. (Relatório Técnico).

RESENDE, M.; CURTI, N.; KER, J. C.; REZENDE, S. B. Mineralogia de solos brasileiros: Interpretações e Aplicações. 2. ed. Lavras: UFLA, 2011. 206p

RODRIGUES, T. E.; SILVA, R. das C.; SILVA, J. M. da L. da; OLIVEIRA JUNIOR, R. G. de; GAMA, R. J. N. F.; VALENTE, M. A. **Caracterização e classificação dos solos do município de Paragominas, Estado do Pará**. Belém: Embrapa, 2003. 51 p. (Série Documentos, n.162)

RUIVO, M.D.P. **Vegetação e cracterização do solo como indicadores de reabilitação de áreas mineradas na Amazônia Oriental**. (Tese Doutorado), Universidade Federal de Viçosa, Curso de Solos e Nutrição de Plantas, 1998

RUIVO, M. L. P.; SCHAEFER, C. E. G. R.; BARROS, N. F.; ALBUQUERQUE, M. A.; RIBEIRO, L. M. Caracterização Micropedológica de Solos Reabilitados Após Exploração de Bauxita em Porto Trombetas (PA). **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, 26:759-767, 2002

RUIVO, M.L.P. & SCHAEFER, C.E.G.R. Formas e distribuição de carbono em diferentes classes de agregados em sítios recuperados após exploração de bauxita na Amazônia. In: REUNIÃO BRASILEIRA DE MANEJO E CONSERVAÇÃO DE SOLO E DA ÁGUA, 12, Fortaleza, 1988. Resumo Expandidos 12, Fortaleza, **Sociedade Brasileira de Ciência de Solos**, 1998. p.392-393

SANTOS, R. D. dos; LEMOS, R. C. de; SANTOS, H. G. dos; KER, J. C.; ANJOS, L. H. C. dos; SHIMIZU, S. H. **Manual de descrição e coleta de solo no campo**. 6. ed. rev. e ampl. Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo / Ed. Suprema Gráfica e Editora Ltda, 2013. 100 p.

SANCHEZ, P.A; LOGAN, I.J. Myrths and science about the chemistry and fertility of soils in the tropics. In: LAL, R; SANCHEZ, P.A. (Ed.). Myrths and science of soils of the tropics. Madison: **Soil Science Society of America**, 1992 p.18-33.

SCHAEFER, W. M.; NIELSEN, G. A.; NETTLETON, W. D. Minesoil Genesis and Morphology in a Spoil Chronosequence in Montana. **Soil Sci. Soc. Am. J.**, v. 44, p.802-807, 1980.

SETA, A. K. & KARATHANASIS, A. D. Water dispersible colloids and factours influencing their dispersibility from soil aggregates. **Geoderma**, 74:255-266, 1996

SHORT, T.A.; MENZIES, N.W.; MULLIGAN, D.R. **Mining disturbance alters phosphorus fractions in northern Australian soils** Aust. J. Soil Res., 38 (2000), pp. 411-421

SILVA, K.A.; MARTINS, S. V.; NETO, A. M.; DEMOLINARI, R. A.; LOPES, A. T. Restauração Florestal de uma Mina de Bauxita: Avaliação do Desenvolvimento das Espécies Arbóreas Plantadas. **Floresta e Ambiente**, 2016.

SILVA, E. N.; SANTANA, A. C. Modelos de regressão para estimação do volume de árvores comerciais, em florestas de Paragominas. **Revista Ceres**, v.61, n.5, p.631-636, 2014.

SILVA LFO, QUEROL X, DA BOIT KM, FDEZ-ORTIZ VS, MADARIAGA JM. Brazilian coal mining residues and sulphide oxidation by Fenton's reaction: an accelerated weathering procedure to evaluate possible environmental impact. **J Hazard Mater** 186:516–525, 2011

SILVA LFO, VALLEJUELO SFO, MARTINEZ-ARKARAZO I, CASTRO K, OLIVEIRA MLS, SAMPAIO CH, BRUM IAS, LEA~O FB, TAFFAREL SR, MADARIAGA JM. Study of environmental pollution and mineralogical characterization of sediment rivers from Brazilian coal mining acid drainage. **Sci Total Environ** 447:169–178, 2013

SILVA, V.R. Compressibilidade de um Podzólico e um Latossolo em função do estado inicial de compactação e saturação em água. Santa Maria, RS, 1999. 116p. Dissertação

(Mestrado em Agronomia/Biodinâmica de Solos) – Programa de Pós-graduação em Agronomia, Universidade Federal de Santa Maria, 1999.

SILVA, V. R.; REINERT, D. J.; REICHERT, J. M. Resistência mecânica do solo à penetração influenciada pelo tráfego de uma colhedora em dois sistemas de manejo do solo. *Ciência Rural*, v. 30, n. 5, 2000

SOUSA, D. M. G.; LOBATO, E.; REIN, T. A. Uso de gesso agrícola nos solos do Cerrado. Planaltina: Embrapa Cerrados, 2005. 19p. Circular Técnica, 32

TEMUR, S.; KANSUN, G. Geology and petrography of the Masatdagi diasporic bauxites, Alanya, Antalya, Turkey **Journal of Asian Earth Sciences**, 27 (2006), pp. 512-522

TÓTOLA, M. R.; BORGES, A. C. Growth and nutritional status of Brazilianwood species *Cedrella fissilis* and *Anadenanthera peregrina* in bauxite spoil in response to arbuscular mycorrhizal inoculation and substrate amendment. **Brazilian Journal of Microbiology**, São Paulo, v. 31, n. 4, p. 257-265, 2000.

TRUCKENBRODT W., KOTSCHOUBEY B., SCHELLMANN W. Composition and origin of the clay cover on north brazilian laterites. **Geologische Rundschau**, 80:591-610, 1991.

TWUM E. K. A. & NII-ANNANG S. Impact of Soil Compaction on Bulk Density and Root Biomass of *Quercus petraea* L. at Reclaimed Post-Lignite Mining Site in Lusatia, Germany. **Applied and Environmental Soil Science** Volume 2015, Article ID 504603, 5 pages

UNITED STATES DEPARTMENT OF AGRICULTURE - USDA. **Soil taxonomy: a basic system of soil classification for making and interpreting soil surveys**. Washington, 1999

VAN BREEMEN, N. & BUURMAN, P. **Soil formation**. Dordrecht, Kluwer Academic Publishers, 1998. 337p.

VANDEN, A. J.; BYGAART, C. A. FOX, D. J. FALLOW, PROTZ, R. **Estimating Earthworm-Influenced Soil Structure by Morphometric Image Analysis** SOIL SCI. SOC. AM. J., VOL. 64, MAY–JUNE 982-988, 2000.

VARAJÃO AFDC, GILKES RJ, HART RD. The relationships between kaolinite crystal properties and the origin of materials for a Brazilian kaolin deposit. *Clays Clay Miner.*;49:44-59, 2001.

VIANA, J. H. M.; FERNANDES FILHO, E. I.; & SCHAEFER, C. E. G. R. Efeitos de ciclos de umedecimento e secagem na reorganização da estrutura microgranular de Latossolo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, 28:11-19, 2004

WESSELINK L.G. Aluminum weathering in soil acidification modelling. **Chemical Geology** 94:150-152, 1990.

WICK, A.F. INGRAM, L.J. STAHL P.D. **Aggregate and organic matter dynamics in reclaimed soils as indicated by stable carbon isotopes** Soil Biol. Biochem., 41 (2009), pp. 201-209.

ZHU, F.; LIAO, J.; XUE, S.; HARTLEY, W.; ZOU, Q.; WUA, H. Evaluation of aggregate microstructures following natural regeneration in bauxite residue as characterized by synchrotron-based X-ray micro-computed tomography. **Science of the Total Environment** 573:155–163, 2016.

3 COMPORTAMENTO FÍSICO-HÍDRICO DE SOLOS RECENTEMENTE CONSTRUÍDOS APÓS MINERAÇÃO DE BAUXITA, PARAGOMINAS- PA

RESUMO

Solos construídos após mineração de bauxita têm suas propriedades físicas, químicas e biológicas alteradas, demandando intervenções para sua recuperação. Nesse sentido, este trabalho foi desenvolvido com o objetivo de estudar a evolução de atributos físico-hídricos de solos recentemente construídos e submetidos a diferentes técnicas e tempos de recuperação após a mineração de bauxita, tendo como parâmetro de comparação o solo natural sob floresta. Amostras de solos deformadas e indeformadas foram coletadas em 15 pontos nas profundidades de 0- 10, 10- 20 e 20- 40 cm em todas as áreas dos sistemas de plantio de mudas e regeneração natural implantadas em 2009 (PL09; RN09), e em áreas de plantio, regeneração natural e nucleação, instaladas em 2014 (PL14; RN14; N14) e em área de floresta nativa (FLO) que serviu como sistema referência. Foram realizadas análises de pH, matéria orgânica do solo, CTC, densidade do solo, porosidade total, macroporosidade, microporosidade, estabilidade de agregados em água e infiltração de água no solo. As áreas com maior tempo de condução da recuperação apresentaram maiores valores de DMP e DMG na camada superficial que as áreas mais recentes. Entre os sistemas em recuperação, a regeneração natural com 9 anos de condução e com melhor cobertura vegetal, se destacou por apresentar maior teor de matéria orgânica, tanto em superfície como em profundidade, como também foi o sistema que mais se aproximou do solo sob a floresta referência em relação às variáveis CTC, VIB e DMG e agregados da classe de 2 mm, além da MOS, demonstrando ser o sistema mais promissor na recuperação da qualidade do solo até esta fase de estudo. A recuperação da maioria dos atributos do solo em profundidades menos influenciadas pela cobertura vegetal demandará mais tempo.

Palavras-chave: Amazônia. Atributos físicos. Recuperação do solo. Solos de mina. *Techinosol*

ABSTRACT

Soils built after bauxite mining have their physical, chemical and biological properties altered, requiring interventions for their recovery. In this sense, this work was developed with the objective of studying the evolution of physical-hydric attributes of soils recently built and submitted to different techniques and recovery times after bauxite mining, using the natural soil under forest as a comparison parameter. Deformed and undisturbed soil samples were collected at 15 points at depths of 0-10, 10-20 and 20-40 cm in all areas of the seedling planting and natural regeneration systems implemented in 2009 (PL09; RN09), and in planting areas, natural regeneration and nucleation, installed in 2014 (PL14; RN14; N14) and in a native forest area (FLO) that served as a reference system. Analyzes of pH, soil organic matter, CTC, soil density, total porosity, macroporosity, microporosity, aggregate stability in water and water infiltration in the soil were performed. The areas with the longest recovery time showed higher values of DMP and DMG in the surface layer than the more recent areas. Among the systems under recovery, natural regeneration with 9 years of driving and with better vegetation coverage, stood out for having a higher content of organic matter, both in surface and in depth, as it was also the system that came closest to the soil under the reference forest in relation to the CTC, VIB and DMG variables and aggregates of the 2 mm class, in addition to the MOS, demonstrating to be the most promising system in the recovery of soil quality until this study phase. The recovery of most soil attributes at depths less influenced by vegetation cover will take more time.

Keywords: Amazon. Physical attributes. Soil recovery. Mine soils. Technosol.

3.1 INTRODUÇÃO

Com o crescimento e desenvolvimento das cidades ao longo das últimas décadas foi necessário o aumento do uso de recursos naturais em todo o mundo, incluindo-se aí os minérios que são utilizados como matéria prima em vários ramos industriais, construção civil, medicina, entre outros. Neste contexto a mineração é um contribuinte importante para a melhoria das condições de vida na sociedade (CARVALHO, 2011). No entanto, a atividade mineraria produz vasto impacto na paisagem e, quando realizada na superfície, é condicionada à remoção da cobertura vegetal, profunda movimentação das camadas do solo, modificação da topografia e alteração do regime de escoamento de água, tornando-se uma fonte potencial de problemas de natureza física, química e biológica (ZHANG et al., 2015; MUKHOPADHYAY et al., 2013; LONGO et al., 2011).

Desta forma, por exigência da Lei n. 6.938 de 1981 que instituiu a Política Nacional do Meio Ambiente, após a extração do minério é necessário que as empresas mineradoras executem a recuperação das áreas que foram mineradas, de maneira que os solos construídos possam ser utilizados de acordo com o um plano preestabelecido, objetivando uma estabilidade do meio ambiente (BRASIL, 1981). Entretanto, até que ocorra o estabelecimento da cobertura vegetal e o recobrimento superficial, os solos nas áreas em recuperação sofrem efeitos ambientais significativos, pois são expostos à ação dos raios de sol e ao impacto de gotas de chuva o que promove a destruição dos agregados. Além disso, partículas soltas de solo podem se acomodar e formar crostas superficiais (VALENTIN e BRESSON, 1992) e o tráfego de veículos pesados causa deformidades estruturais e compactações (BRADSHAW E CHADWICK, 1980). Estes processos podem contribuir para retardar o acúmulo de carbono e nitrogênio no solo, prejudicando a recuperação da atividade microbiana (STROO e JENCKS, 1982), além de determinar, entre outras alterações, aumento na densidade e baixas taxas de infiltração de água no solo, proporcionando condições para o escoamento superficial e erosão hídrica (KÄMPF et al., 1997; GUEBERT & GARDNER, 2001) com transporte e deposição de partículas sólidas nos cursos d'água (SILVA et al., 2010; BEZERRA e CANTALICE, 2009). No entanto, a compactação pode ser evitada se o manejo do solo não for realizado em períodos úmidos ou muito secos (SCHWENKE et al., 2000).

Cheng et al. (2015), argumentam que a agregação, estabilidade dos agregados e porosidade do solo influenciam na infiltração de água, transporte de nutrientes e na

retenção de água no solo. Contudo a ação da chuva e do escoamento superficial podem reduzir a rugosidade superficial dos solos descobertos, rugosidade esta que é criada pelos resíduos vegetais e atividade biológica e confere maior estabilidade ao solo (PANACHUKI et al., 2010).

Diferentes propriedades físicas relativas à forma e estabilidade estrutural vêm sendo usadas para quantificar os impactos causados pelo uso do solo, tais como a densidade, porosidade e a estabilidade de agregados do solo (ARATANI et al., 2009). Segundo Almajmaie et al. (2017), a estabilidade de agregados é largamente empregada como um indicador da qualidade e da susceptibilidade à erosão hídrica do solo. Mendes et al., (2006) afirmam que a estrutura é um atributo importante para avaliar a qualidade do solo por complementar o estudo dos arranjos entre a parte sólida e vazios que a compõe. Estes autores apontam que a avaliação quantitativa dos agregados pode ser realizada pela quantidade de agregados estáveis em água ou à seco; ou avaliação direta pelos atributos densidade do solo; porosidade; grau de floculação e infiltração da água no solo.

De acordo com Bernardo et al. (2006), a velocidade de infiltração de água no solo depende da textura; estrutura; temperatura; porosidade dos solos; existência de camada com menor permeabilidade ao longo do perfil; cobertura vegetal; dentre outros. Neste sentido a diminuição da macroporosidade e da infiltração de água provoca aumento do escoamento superficial e transporte de partículas sólidas pela erosão, comprometendo o processo de recuperação das áreas degradadas (GUEBERT & GARDNER, 2001). Portanto é importante o reconhecimento de que a degradação das características físicas do solo afetará o nível de produtividade da área, mesmo com uso de fertilizantes, espécies adaptadas e controle de pragas e doenças (SILVA E RIBEIRO, 1992).

Devido aos impactos ambientais ocasionados pela atividade de mineração é extremamente relevante investigar se os processos de recuperação ambiental de áreas mineradas alteram significativamente os atributos físicos do solo. Assim, o objetivo deste trabalho foi estudar a evolução de atributos físico-hídricos de solos recentemente construídos e submetidos a diferentes técnicas e tempos de recuperação após a mineração de bauxita, tendo como parâmetro de comparação o solo natural sob floresta.

3.2 MATERIAL E MÉTODOS

3.2.1 Área de estudo

O estudo foi desenvolvido em área minerada por bauxita na empresa Mineração Paragominas S.A., do grupo Hydro, no Platô Miltônia 3 (3°15'38"S e 47°43'28" W). A classe de solo predominante em situação de Platô na região é Latossolo Amarelo Distrófico típico, textura muito argilosa.

O clima da região é do tipo “Aw”, conforme a classificação de Köppen-Geiger, caracterizado como quente e úmido com estações de chuva e de seca bem definida, temperatura média anual entre 26,3 °C e umidade relativa do ar em torno de 81% na média anual (BASTOS et al., 2006).

3.2.2 Caracterização da área de estudo

Nas áreas da Mineração Paragominas S.A. (Figura 1), a jazida de bauxita geralmente se apresenta em uma camada mineralizada horizontal e sob um capeamento composto de material estéril (horizonte B) e *topsoil* (horizonte A), com espessura média de 11,4 m (variando entre 2,1m a 16,5 m). A mineração é realizada a céu aberto, em um processo conhecido como *strip mining method* (mineração em tiras ou faixas), após a remoção da cobertura vegetal e do *topsoil*. Esse método consiste em lavar o depósito em faixas paralelas, com aproximadamente 30 metros de largura e comprimentos variáveis (400 m a 1000 m), com o estéril sendo disposto na área da tira anteriormente lavrada. O *topsoil* é armazenado e posteriormente espalhado sobre o estéril. Após a extração do minério, conformação do terreno e construção do solo nas áreas degradadas, são utilizados três diferentes métodos para recuperação das áreas mineradas: plantio de mudas, regeneração natural e nucleação.

Figura 1 - Procedimento operacional de lavra de bauxita na empresa Mineração Paragominas S. A., grupo



Fonte: Mineração Paragominas S.A.

Desta forma, o presente estudo compara os sistemas em diferentes idades de condução (4 e 9 anos) em cinco áreas de recuperação pós- mineração de bauxita. Sendo: regeneração natural; plantio de mudas; nucleação e uma área sob floresta Ombrófila com registo de exploração madeireira convencional realizada no ano de 2003, cujo solo serviu como referência no seu estado natural (Quadro 1). Foram recuperados 21,04 ha e 71,44 ha nos sistemas RN09 e PL09 e por meio dos sistemas RN14, PL14 e N14 foram recuperados 238,6 ha, 240,36 ha e 44,78 ha respectivamente.

Quadro 1- Relação dos diferentes sistemas avaliados nas áreas de recuperação e Floresta nativa

Sigla do sistema	Sistema	Ano de implantação
FLO	Floresta nativa	-
RN09	Regeneração natural	2009
PL09	Plantio de mudas	2009
RN14	Regeneração natural	2014
PL14	Plantio de mudas	2014
N14	Nucleação	2014

Para a recuperação da área após a extração da bauxita, inicialmente foi realizada a conformação morfológica do terreno, com auxílio de tratores de esteiras D8 para o aplainamento das áreas, para que estas se aproximassem o mais fielmente possível do relevo original. Em seguida, realizou-se a deposição de uma camada de cerca de 30 cm de *topsoil* proveniente dos primeiros 40 cm dos horizontes superficiais do solo natural.

Para a implantação dos sistemas PL09 (abril de 2009) e PL14 (janeiro de 2014) (Figura 2), após o nivelamento do estéril e recobrimento deste com *topsoil*, foi realizada subsolagem até 60 cm de profundidade no preparo da linha do plantio, com aplicação conjunta de fosfato natural reativo (33% P₂O₅ Total, 10% solúvel em ácido cítrico) em profundidade entre 20 e 30 cm. O plantio foi realizado com espaçamento 3m x 3m, com 1.111 mudas/ha em covas de 0,30 m x 0,30 m x 0,30 m. As covas foram adubadas com 200g da formulação NPK 6-30-6 + 0,5 % B, 0,5 % Cu, 0,5 % Zn. Além disso, utilizou-se 2,5 kg/cova de composto orgânico (formado por caroço de açaí carbonizado, palha de arroz carbonizado, cama de frango e esterco de ovino curtidos e triturados, em partes iguais). No plantio foram utilizadas aproximadamente 104 espécies em diferentes grupos

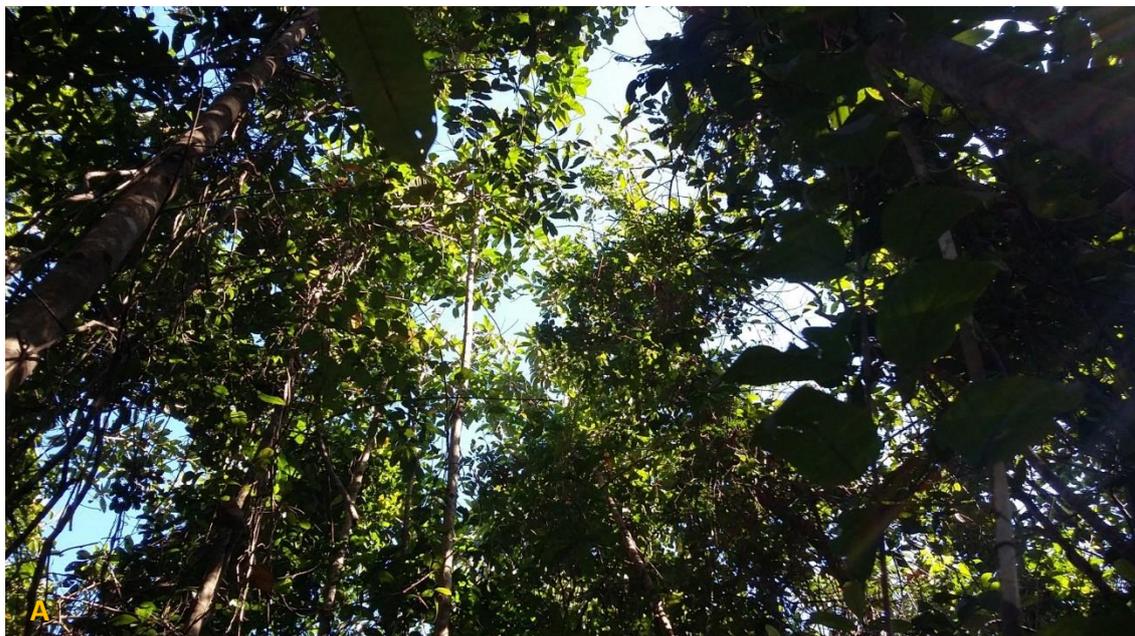
ecológicos, dispostas ao acaso nas covas. A manutenção inicial do plantio constituiu no controle inicial de formigas cortadeiras com aplicação de formicida na dosagem de 10 g/m² em uma distância de até 100 m das bordas do reflorestamento do formigueiro e capinas manuais.

Figura 2 - Regeneração Natural com 9 anos de implantação (RN09): Bosque com domínio de *Croton* (A); formação de clareiras devido à mortalidade de *Croton* (B).



Fonte: Autora.

Figura 3 - Regeneração Natural com 9 anos de implantação (RN09): Aspecto geral do dossel com domínio de *Croton* (A); Clareiras em áreas de mortalidade de *Croton*, detalhe de um indivíduo do gênero *Cecropia* ao centro (B).



Fonte: Autora.

Figura 4- Sistemas plantio de mudas com 9 (A, PL09) e 4 (B, PL14) após instalação. Notar clareiras com solo exposto.



Fonte: Autora.

Nas áreas submetidas ao sistema de regeneração natural RN09 e RN14 (Figura 3) os procedimentos adotados para instalação foram: conformação do terreno com espalhamento do estéril e recobrimento deste com o *topsoil* para favorecer a regeneração através dos propágulos presentes no solo armazenado.

Figura 5- Sistema regeneração natural com 4 anos de implantação (RN14). Notar a irregularidade de cobertura vegetal na área com áreas sombreadas com melhor cobertura (A) e clareira com solo exposto (B).



Fonte: Autora.

Em dezembro de 2014, foi iniciado a técnica de nucleação (N14) realizando-se a deposição e nivelamento do estéril nas áreas após a mineração; distribuição irregular e intercalada do *topsoil* e galharia (galhos, folhas e material reprodutivo) da vegetação que foi suprimida para realização da lavra para criar rugosidades no terreno e de modo que a galharia formasse um ambiente atrativo para a fauna local. Na área de nucleação (Figura 4) em 15,76 hectares foi realizado o plantio manual de mudas. Às mudas foram plantadas em covas previamente abertas, recobertas com solo e vegetação para se manter a umidade do solo. Foi realizado também a aplicação manual de fertilizante, com 300g/cova, e adubação de cobertura com aplicação de NPK 6-30-6 na proporção de 160g/muda após o plantio e realizou-se replantio de aproximadamente 430 mudas em 0,86 ha na área.

Figura 6 – Nucleação com 4 anos de implantação. Notar a disposição de montes de *topsoil* intercalados com pilhas de restos vegetais provenientes da supressão, solo exposto e domínio de *Cecropia*.



Fonte: Projeto Biodiversidade e Solos.

3.2.3 Delineamento amostral e coleta de amostras do solo e vegetação

O levantamento florístico, as coletas de solo e os testes de infiltração nas áreas de estudo foram realizadas em 2018, salvo para as coletas de amostras indeformadas destinadas à análise de estabilidade de agregados em água, que foram feitas em 2016.

Para avaliação dos atributos físico-hídricos do solo em todos os sistemas (RN09, RN14, PL09, PL14, N14 e FLO) foram utilizadas em 15 parcelas de 200 m² (20 m x 10 m) por sistema, seguindo um delineamento inteiramente casualizado, nas quais procederam-se coletas de amostras deformadas e indeformadas nas profundidades de 0-10, 10-20 e 20-40 cm em todas as áreas para solo e testes de infiltração de água.

As amostras indeformadas de solo foram obtidas com auxílio de anéis volumétricos de aço, com volume interno de 100 cm³, para obter as variáveis: Densidade do Solo, Porosidade Total, Macroporosidade, Microporosidade, Distribuição do tamanho dos Poros. Amostras deformadas foram obtidas para caracterização das áreas estudadas quanto a seus atributos químicos (pH em água e KCl, matéria orgânica do solo (MOS) e capacidade de troca catiônica (CTC). Monólitos de solo de aproximadamente 100 cm³ foram coletados para avaliação da estabilidade de agregados em água.

3.2.4 Análise da Vegetação

Em todas as parcelas das áreas em estudo foram realizadas contagens e identificação dos indivíduos de espécies arbóreas e arbustivas com $DAP \geq 5$ cm, consideradas como pertencentes ao estrato superior. Para o reconhecimento e identificação dos indivíduos a nível de espécie e no mínimo gênero, foram coletados materiais vegetais que foram condicionados em exsiccatas para secagem e após isso, a identificação e catalogação foi realizada.

Dos indivíduos do estrato superior foram determinadas: Abundância; riqueza de espécies e percentagem das 5 espécies mais abundantes, mediante o total por sistema. Foi realizado a caracterização fitossociológica dentro de cada sistema.

3.2.5 Análises físicas

3.2.5.1 Densidade e Porosidade do solo

Os dados das variáveis densidade do solo e porosidade foram obtidos conforme metodologia apresentada em Embrapa (1997).

A densidade do solo (D_s) foi obtida a partir de coleta de amostras em anel volumétrico, que foram secas em estufa à 105°C , para obtenção da massa seca. Com isso se utilizou equação: $D_s = \text{peso do solo seco à } 105^\circ\text{C} / \text{volume interno do anel}$. A porosidade total (P_t) foi calculada após a determinação de densidade do solo e densidade da partícula, com $P_t = (1 - D_s/D_p)$, sendo densidade da partícula considerada igual a $2,65 \text{ kg dm}^3$.

Para determinação da macroporosidade, microporosidade foram utilizadas as mesmas amostras indeformadas coletadas em anéis volumétricos para obtenção da densidade do solo. A microporosidade foi obtida por meio da curva de retenção de água no solo, na tensão à 6 KPa, e a macroporosidade foi obtida através da diferença entre porosidade total e microporosidade.

3.2.5.2 Distribuição de agregados estáveis em água em diferentes classes de tamanho

Para avaliação da estabilidade dos agregados em água foram coletadas amostras indeformadas, esculpindo monólitos de solos de aproximadamente $10 \text{ cm} \times 10 \text{ cm} \times 10 \text{ cm}$, nas 15 parcelas de cada um dos sistemas estudados, nas profundidades de 0-10, 10-

20 e 20-40 cm. As amostras de solos foram mantidas à sombra até atingirem o ponto de friabilidade e depois cuidadosamente destorroadas manualmente, de modo que o volume total da amostra fosse fracionado para transpassar a peneira de 9,52 mm de abertura de malha. As amostras foram secas ao ar à sombra em temperatura ambiente e conservadas até serem submetidas à análise da estabilidade dos agregados através da separação dos agregados em classes de tamanho por peneiramento em coluna de água, utilizando o aparelho de oscilação vertical de Yoder (1936), conforme Kemper e Rosenau (1986) e adaptado Salton et al. (2012).

As amostras de aproximadamente 50 g de solo foram umedecidas em lâmina d'água destilada por 16 horas, em seguida foram transferidas cuidadosamente para um conjunto de peneiras com aberturas de 4,76 mm, 2,00 mm, 1,00 mm, 0,50 mm, 0,25 mm, 0,105 mm e 0,053 mm, que ficaram acopladas ao aparelho Yoder em agitação vertical por 15 minutos. Cessada a agitação, as amostras de cada peneira foram transferidas para Becker de vidro, identificadas e levadas à estufa para secarem à 105 °C.

Para o cálculo do diâmetro médio ponderado e diâmetro médio geométrico foram utilizadas as seguintes fórmulas de Van Bavel (1949) e Mazurak (1950), respectivamente:

$$DMP = \sum_{i=1}^n (x_i \cdot w_i)$$

Na qual:

DMP= diâmetro médio ponderado;

w_i= massa de cada classe em gramas;

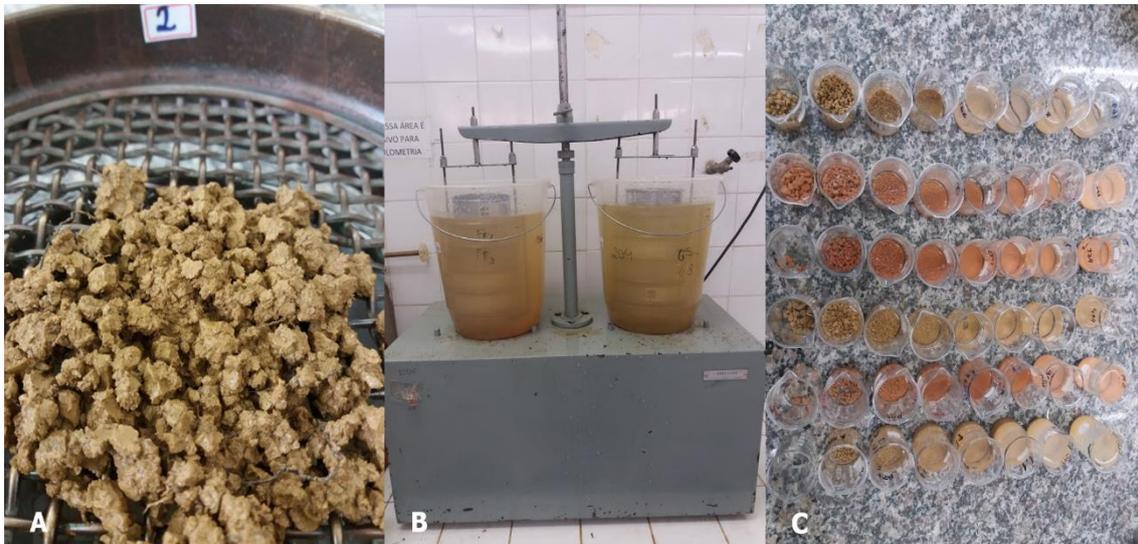
x_i= diâmetro médio das classes expressa em mm.

$$DMG = \text{antilog} \left(\frac{\sum (w_i \log x_i)}{\sum (w_i)} \right)$$

Na qual:

DMG= diâmetro médio geométrico.

Figura 7- Peneiramento do torrão em malha de 9,52 mm (A); oscilação vertical no aparelho Yoder (B) e separação dos agregados em diferentes classes de tamanho, pós peneiramento vertical.



Fonte: Projeto Biodiversidade e Solos.

3.2.6. Infiltração de água no Solo

A determinação da infiltração de água no solo foi realizada em estação seca, pelo método dos anéis, constituído por um cilindro externo metálico com 20 cm de diâmetro por 20 cm de altura e outro cilindro interno com 10 cm de diâmetro por 20 cm de altura, cravados no solo de modo concêntrico. Foi utilizada uma régua graduada para a medição da infiltração de água no solo durante intervalos de tempo, com reposição de água efetuada sempre que o nível de água se aproximava de 8 cm de altura. Foi considerada infiltração constante quando o valor da leitura na régua se repetia ao menos três vezes. Esses dados foram anotados em uma planilha, para posteriormente serem obtidas as curvas de infiltração acumulada (IA) que corresponde à lâmina de água infiltrada acumulada no solo em função do tempo acumulado (T). Através da IA foram obtidos os parâmetros (k, a) do modelo de regressão não linear proposto por Kostiaikov (1932):

Segundo o modelo, o volume de água que penetra no solo em função do tempo é expressado conforme equação 1 e 2:

$$IA = k * T^a \quad (1)$$

A partir da derivação da função da estimativa da infiltração pelo tempo, encontra-se o modelo potencial da velocidade de infiltração de água no solo (VI):

$$\frac{dI}{dT} = VI = k * a * T^{a-1} \quad (2)$$

Nas quais:

IA = infiltração acumulada (cm);

k e a = constante dependente do solo;

T = tempo (min).

VI = velocidade de infiltração.

A velocidade básica de infiltração (VIB) foi estimada através das equações 3.

$$VIB = 60 * k * a * \left[\frac{-0,01}{60 * k * a * (a - 1)} \right]^{\frac{a-1}{a-2}} \quad (3)$$

3.2.7 Análise química

A caracterização química das amostras deformadas de solos foi realizada nas 15 parcelas de todos os sistemas de recuperação e floresta nativa. O pH foi determinado em água e KC 1 mol L⁻¹. O carbono orgânico do solo e os cátions básicos trocáveis extraídos e a acidez potencial foram determinados seguindo os procedimentos de Embrapa (1997). A partir da obtenção dos valores dos cátions básicos trocáveis e da acidez potencial foi estimada a capacidade de troca de cátions potencial (CTC) = SB + (H + Al³⁺).

3.2.8 Análise estatística

Os dados foram primeiramente submetidos ao teste de normalidade dos resíduos (Shapiro-Wilk); para os conjuntos de dados que não atingiram a normalidade foi realizado a transformação Box Cox e após isso, a análise de variância (ANOVA) e comparação de médias pelo teste de Tukey a 5%. A análise multivariada foi realizada com os dados de solo e infiltração em duas profundidades (0-10 e 20-40cm), para tanto foi avaliada a normalidade dos dados por Henze-Zirkler; para os dados não normais foi realizada a

transformação Box- Cox (BOX; COX, 1964); teste de homogeneidade de variância Barlett e análise dos componentes principais pelo programa R Studio versão 1.1.442.

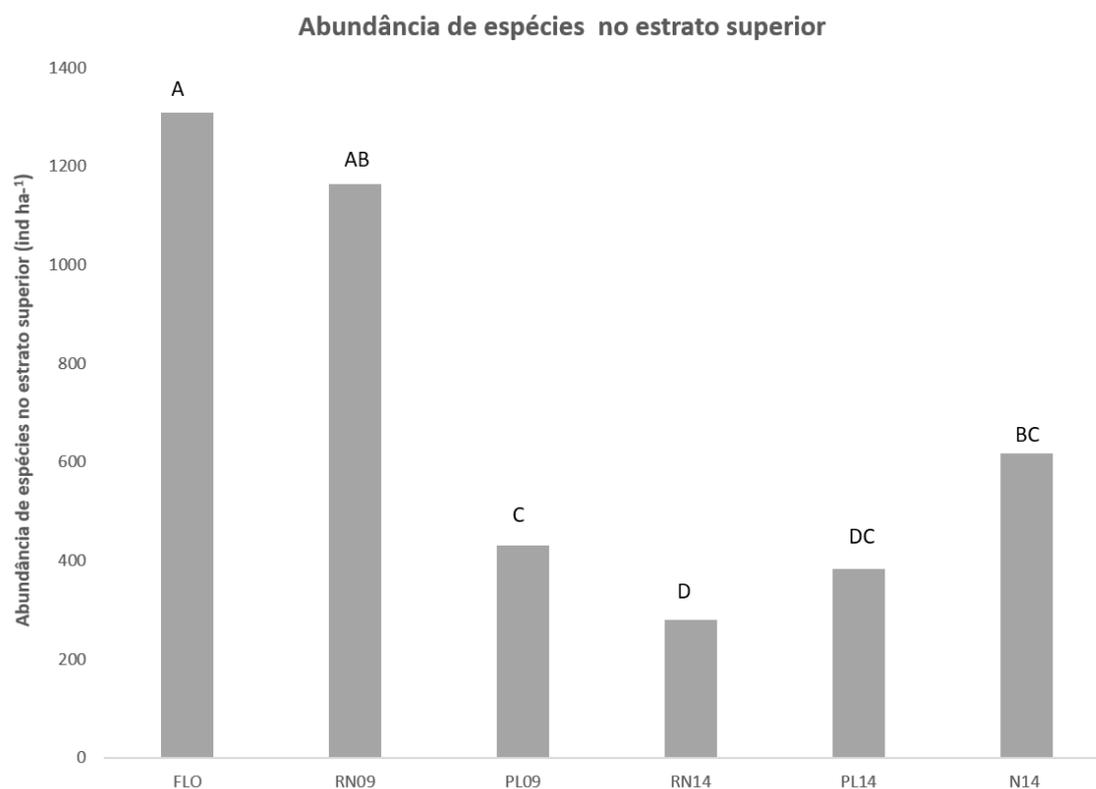
3.3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.3.1 Vegetação

A abundância no estrato superior (Figura 8) da floresta nativa (FLO) foi maior que a encontrada em PL09 e nas áreas em recuperação mais recentes (RN14, PL14 e N14), seguido da área de regeneração natural de 9 anos (RN09). Apesar da baixa riqueza com dominância de plantas do gênero *Croton* (Tabelas, 1 e 2, respectivamente) e da perda e vigor e mortalidade desta espécie em alguns sítios na área observadas em campo (Figura 2, B), RN09 apresentou abundância de indivíduos arbóreos no estrato superior equivalente à encontrada no sistema referência (FLO), o que confere uma melhor cobertura do solo e confirma as observações de campo, onde foi notório que este sistema possuiu dossel mais fechado e propiciou um melhor sombreamento da superfície (Figuras 2A e 3A). Nas áreas afetadas pela mortalidade ou queda de *Croton* em RN09, plantas do gênero *Cecropia* são as mais comuns atingindo o estrato superior (Figura 3B).

Ainda que PL09 tenha apresentado a maior riqueza (Tabela 1) de espécies entre as áreas em recuperação, em campo foram observadas várias áreas com solo ainda exposto evidenciando o difícil estabelecimento da vegetação plantada neste sistema (Figura 4 A). A respeito das áreas mais recentes, instaladas em 2014, ou seja, com 4 anos de recuperação, RN14 e PL14 apresentaram menor abundância de plantas no estrato superior em relação a RN09, o que propiciou menor cobertura do solo. Embora a abundância de plantas do estrato superior em N14 tenha sido significativamente distinta da encontrada em RN14 e PL14, devido à grande heterogeneidade entre as parcelas, esta diferiu da encontrada no sistema referência FLO e igualou-se aos valores encontrados nas áreas mais recentes em recuperação (RN09 e PL09). Em N14, no entanto, há domínio absoluto do gênero *Cecropia* e *Solanum* (Tabela 2 e Figura 6) que não propicia proteção eficiente da superfície do solo.

Figura 8 - Abundância de plantas no estrato superior nas áreas em recuperação com 9 (RN09 e PL09) e com 4 anos (RN14, PL14 e N14) e no sistema referência de floresta nativa (FLO).



n=15, médias seguidas de mesma letra não diferem entre si pelo teste de Tukey a 5%.

Tabela 1: Riqueza de espécies no estrato superior em floresta nativa e nas áreas em recuperação florestal em Paragominas, Amazônia.

Sistemas	Riqueza de espécies
FLO	71
RN09	11
PL09	38
RN14	8
PL14	21
N14	6

Os valores de riqueza de espécies são oriundos de contagem em cada sistema.

Tabela 2 Percentual de ocorrência das cinco espécies arbóreas/arbustivas mais abundantes no estrato superior por sistema.

Espécies nos sistemas	Percentual
----- FLO -----	
<i>Apeiba albiflora</i> Ducke	14,5
<i>Guatteria poeppigiana</i> Mart.	9,9
<i>Talisia microphylla</i> Uittien.	7,9
<i>Inga thibaudina</i> DC.	6,4
<i>Chrysophyllum prieurii</i> A.DC.	4,8
	Total 43,5
----- RN09 -----	
<i>Croton matourensis</i> Aubl.	51,0
<i>Byrsonima crassifolia</i> (L.) Kunth	12,6
<i>Cecropia</i> sp.	12,6
<i>Casearia javitensis</i> Kunth	12,3
<i>Vismia guianensis</i> (Aubl.) Choisy	6,6
	Total 95,1
----- PL09 -----	
<i>Inga thibaudina</i> DC.	10,1
<i>Astronium lecointei</i> Ducke	10,1
<i>Acacia polyphylla</i> DC.	8,5
<i>Byrsonima crassifolia</i> (L.) Kunth	6,2
<i>Caesalpinia ferrea</i> Mart. ex Tul.	6,2
	Total 41,1
----- RN14 -----	
<i>Croton matourensis</i> Aubl.	86,9
<i>Solanum</i> sp.	3,6
<i>Vismia guianensis</i> (Aubl.) Choisy	2,4
<i>Solanum fulvidum</i> Bitter	2,4
<i>Cecropia</i> sp.	1,2
	Total 96,4
----- PL14 -----	
<i>Solanum</i> sp.	15,7
<i>Croton matourensis</i> Aubl.	14,8
<i>Schizolobium parahyba</i>	13,0
<i>Adenanthera pavonina</i> L.	10,4
<i>Ceiba pentandra</i>	7,8
	Total 61,7
----- N14 -----	
<i>Cecropia distachya</i> Huber	43,8
<i>Cecropia</i> sp.	37,3
<i>Solanum</i> sp.	10,3
<i>Solanum paniculatum</i> L.	7,0
<i>Solanum fulvidum</i> Bitter	1,1
	Total 99,5

3.3.2 Atributos químicos

Em relação ao pH do solo, tanto em água ($\text{pH}_{\text{H}_2\text{O}}$) quanto em KCl (pH_{KCl}), observou-se que os valores $<5,0$ caracterizam os ambientes estudados com alto nível de acidez, embora a variação de valores entre os dois métodos de pH (ΔpH) demonstre predominar o balanço de cargas negativas no solo (Tabela 3). Em relação ao $\text{pH}_{\text{H}_2\text{O}}$, nas profundidades 0-10 e 10-20 cm, observou-se não haver diferença significativa entre os sistemas de recuperação e destes com a floresta e na camada mais profunda (20-40 cm), a diferença mais significativa foi observada entre os sistemas de regeneração natural (RN14 e RN19) e floresta.

O conteúdo de matéria orgânica do solo em todos os sistemas foi maior na camada 0-10 cm do solo e diminuiu com a profundidade. Em superfície, a floresta nativa apresentou maior valor de MOS que os encontrados nos sistemas em recuperação e, entre estes, RN09 se destaca dos demais para esta variável. Abaixo de 10 cm, o valor de MOS de RN09, igualou-se ao obtido em FLO e não diferiu de PL09, no entanto foi superior aos obtidos nos sistemas mais novos a 10-20 cm e aos encontrados nos sistemas em recuperação a 20-40 cm. A propósito dos menores valores de MOS encontrados em solos construídos, em relação a solos sob floresta, Schwenke et al. (2000), apontam a mistura do solo e subsolo como possibilidade de causa, sendo os solos construídos mais rasos, compactos e com cascalhos. No presente estudo, a superioridade dos valores de MOS de RN09 em relação às demais áreas em recuperação coincide com a abundância de árvores no estrato superior neste sistema (Figura 6), e um maior potencial de formar dossel (Figuras 7A e 8A) e liteira para cobrir o solo, corroborando pelo que foi encontrado por Martins et al. (2018) em seu estudo, que encontrou as maiores médias de serapilheira nas áreas de RN.

Em relação à capacidade de troca de cátions, observou-se que, de forma geral, os resultados acompanham os obtidos para a matéria orgânica, já que essas variáveis possuem relação direta. Isso pode ser melhor observado na camada superficial, onde o sistema referência FLO apresentou CTC mais elevada e coincidente com maior teor de MOS, quando comparado aos sistemas em recuperação.

Em contraste ao sistema referência, os menores valores de CTC em N14 foram concordantes com os baixos conteúdos de MOS em todas as camadas neste sistema (Tabela 3). Esses resultados reiteram a relevante contribuição da matéria orgânica para

o aumento da capacidade de troca catiônica (NOVAIS et al., 2011) e, conseqüentemente, da fertilidade do solo (BAYER e MIELNICZIK, 2008) e reafirmam a colaboração da produção de biomassa vegetal como um dos fatores chaves na evolução dos processos de recuperação de áreas mineradas. Os baixos valores de MOS e CTC em N14 podem ter relação com os pontos onde as coletas foram realizadas neste sistema, compreendendo áreas mais planas existentes entre as pilhas de galhos da supressão e os montes de *topsoil*, o que leva a essa superfície apresentar maior contribuição do material estéril de menor fertilidade, além da atualmente pobre cobertura vegetal deste sistema, com domínio de *Cecropia*, que não tem muita eficiência na cobertura da superfície do solo (ALMEIDA, 2016).

Tabela 3: Atributos químicos e físicos do solo nos sistemas sob regeneração natural (RN9 e RN4), plantio de mudas (PL09 e PL14) e nucleação (N14) e fragmento de floresta nativa (FLO), usada como ecossistema de referência, em áreas pós mineração de bauxita em Paragominas, Pará.

Sistema	pH água	pH KCl	MOS	CTC	DS	Porosidade (m ³ /m ³)		
			(g kg ⁻¹)	cmolc dm ⁻³	kg dm ⁻³	Pt	Ma	Mi
.....0-10 cm.....								
FLO	4,89 a	4,31 a	32,87 a	9,14 a	0,94 c	0,65 a	0,25 ab	0,40 a
RN09	4,85 a	3,97 b	25,10 b	5,45 b	0,97 c	0,63 a	0,29 a	0,34 b
PL09	4,61 a	4,14 ab	19,11 c	5,02 bc	1,15 ab	0,57 c	0,22 ab	0,35 b
RN14	4,70 a	4,07 ab	17,46 c	5,25 b	1,00 c	0,62 a	0,28 a	0,34 b
PL14	4,63 a	4,21 ab	15,67 c	5,37 b	1,04 bc	0,61 ab	0,27 a	0,34 b
N14	4,70 a	4,40 a	6,31 d	3,85 c	1,16 a	0,57 c	0,20 b	0,37 ab
.....10-20 cm.....								
FLO	4,57 a	4,19 ab	22,21 a	6,84 a	1,15 bc	0,57 ab	0,16 c	0,41 a
RN09	4,69 a	3,89 c	18,25 ab	4,90 bc	1,06 c	0,60 a	0,25 a	0,35 bc
PL09	4,51 a	4,12 bc	14,95 b	4,34 bc	1,22 ab	0,54 bc	0,18 bc	0,36 bc
RN14	4,67 a	4,11 bc	10,37 c	4,59 bc	1,08 c	0,59 a	0,25 ab	0,35 bc
PL14	4,54 a	4,18 ab	8,64 cd	5,40 ab	1,12 bc	0,58 ab	0,24 ab	0,34 c
N14	4,67 a	4,42 a	4,69 d	3,66 c	1,35 a	0,50 c	0,12 c	0,38 ab
.....20-40 cm.....								
FLO	4,45 c	4,13 bc	14,37 a	4,21 a	1,19 bc	0,55 ab	0,14 ab	0,41 a
RN09	4,81 a	4,02 c	13,10 a	3,78 ab	1,15 c	0,57 a	0,20 a	0,36 b
PL09	4,64 abc	4,35 ab	6,63 b	3,22 ab	1,31 ab	0,50 bc	0,15 ab	0,36 b
RN14	4,70 ab	4,34 abc	3,97 bc	3,18 ab	1,19 bc	0,55 ab	0,19 a	0,36 b
PL14	4,58 bc	4,39 ab	3,92 c	3,50 ab	1,18 bc	0,56 ab	0,21 a	0,35 b
N14	4,67 abc	4,62 a	2,60 c	3,02 b	1,43 a	0,46 c	0,09 b	0,37 ab

M.O – Matéria Orgânica; CTC – Capacidade de troca catiônica; Ds – Densidade do solo; Pt – Porosidade total; Ma – Macroporosidade; Mi – Microporosidade e AD – Água disponível. Para cada variável, os valores seguidos da mesma letra, nas colunas, não diferiram entre si pelo teste de Tukey ($p < 0,05$).

3.3.3. Densidade, Porosidade do Solo

No que se refere à densidade do solo (DS), os valores médios variaram de 0,94 a 1,43 kg dm⁻³ (Tabela 3) nas diferentes áreas e profundidades estudadas e se encontram abaixo do limite crítico ao desenvolvimento da vegetação estabelecido por Reichert et al. (2003) para solos argilosos. Em todas as profundidades estudadas, a densidade do solo das áreas em recuperação não diferiu estatisticamente dos valores encontrados sob o sistema referência FLO, salvo os sistemas de nucleação e P09 em superfície.

Os maiores valores de DS encontrados no sistema sob nucleação provavelmente se devem ao fato de que as coletas das amostras basicamente foram realizadas em sítios entre os montes de *topsoil* e as pilhas de galhos da supressão, onde, quando muito, o estéril é coberto por uma fina camada de *topsoil* ou fica exposto com frequente formação de crostas. Além disso este sistema foi o que apresentou menor riqueza de espécies com domínio de plantas dos gêneros *Cecropia* e *Solanum* (Tabela 2) que não cobrem efetivamente o solo (Figura 6). Aqui é oportuno ressaltar que as operações de deposição do *topsoil* e das pilhas de galhos foram realizadas em época com alta intensidade pluviométrica. O tráfego de veículos e máquinas em solo muito argiloso e muito úmido ou molhado colaborou para compactação do solo (CHONG e COWSERT, 1997 e BOHRER et al., 2017).

A proximidade dos valores de densidade do solo de PL09 aos valores obtidos em N14 pode estar igualmente relacionada às operações de preparo da área em período chuvoso e, especificamente em PL09, à dificuldade de estabelecimento das espécies selecionadas para o plantio, como também aos tratos culturais com repetidas capinas que foram realizadas no decorrer do primeiro ano neste sistema, o que provavelmente diminuiu a incidência de plantas regenerantes espontâneas e proporcionou maior exposição do solo em áreas onde a vegetação plantada não se estabeleceu, formando clareiras que se perpetuaram com o tempo (Figura 2A). O solo descoberto se torna vulnerável ao impacto das gotas de chuva e entupimento dos poros (NUNES et al. 2010; EFFGEN et al. 2012) e contribui para a formação de selamento superficial ou crostas (TACKETT e PEARSON, 1964) que se agrava em período seco. O encrostamento superficial também impede o desenvolvimento radicular da vegetação, conforme foi reportado por Brady e Weil, (2013).

A porosidade total não se diferiu entre os sistemas RN09, RN14, PL14 e FLO em todas as profundidades, no entanto, em superfície PL09 e N14 apresentaram os menores valores de PT, quando comparados ao valor obtido no sistema natural. Em superfície N14 também apresentou o menor valor para essa variável em relação aos demais sistemas e não diferiu de PL09. A menor porosidade total encontrada em N14 está compatível ao menor valor de macroporosidade neste sistema, em comparação aos demais em recuperação, salvo PL09 que também não diferiu de N14. Isso reforça a hipótese de que as operações de mobilização de materiais e preparo do solo realizadas em período chuvoso, em PL09 e N14, estão relacionadas à tendência de compactação nestas áreas.

Os poros pequenos têm efeito na capacidade de retenção de água no solo e disponibilidade de água às plantas que está condicionada principalmente à textura e ao conteúdo de matéria orgânica do solo (SILVA & KAY, 1997). Apesar de não haver diferenças significativas entre os sistemas em recuperação para essa variável, estes apresentaram valores inferiores ao encontrado em FLO em todas as profundidades, salvo em N14. Uma vez que a textura das áreas estudadas é semelhante, os valores relativamente superiores de microporosidade do solo observados em FLO podem ser relacionados ao conteúdo de MOS geralmente mais elevado neste sistema.

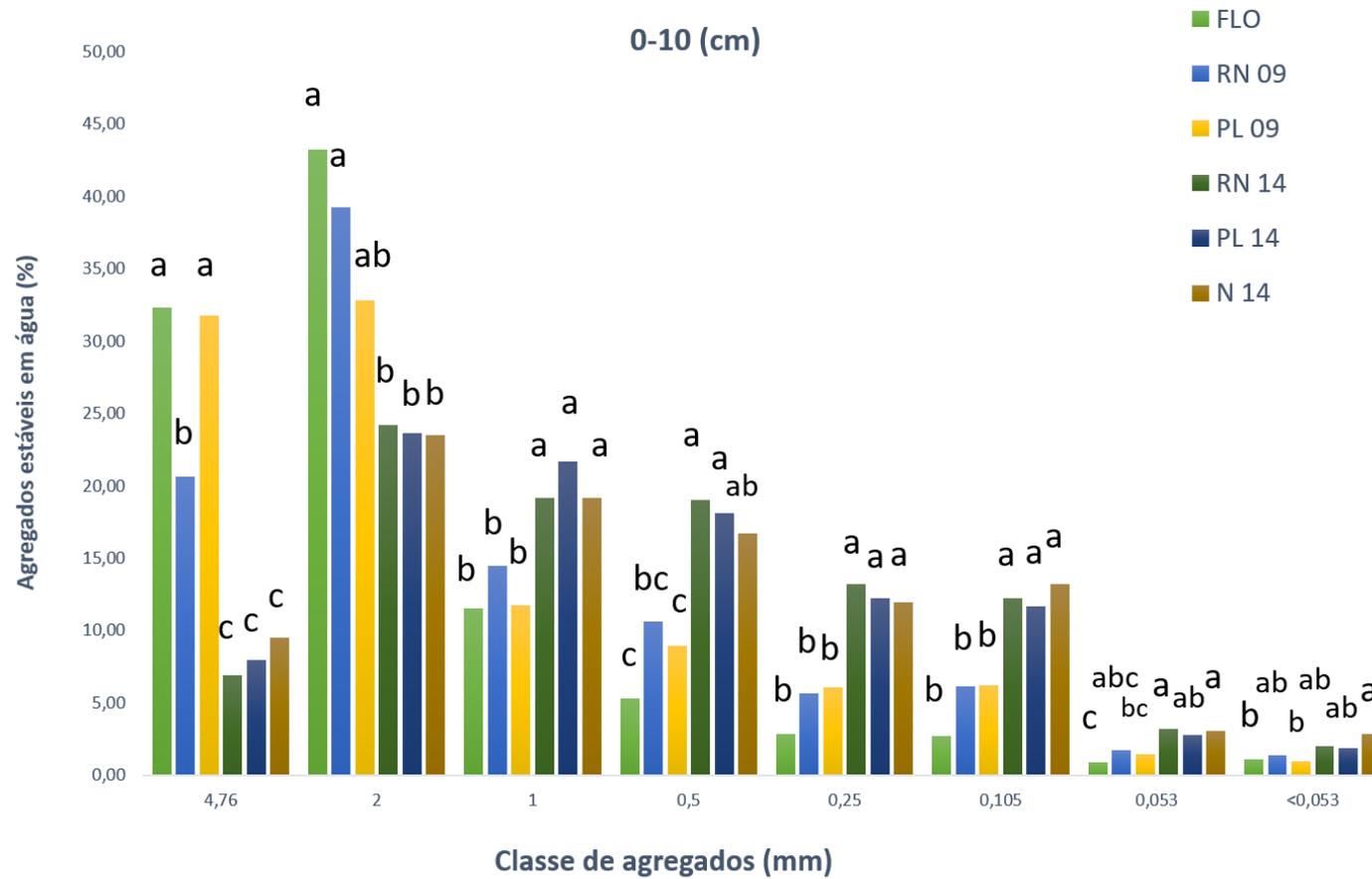
A construção do solo muitas vezes ocasiona o aumento da densidade do solo e conseqüente diminuição da infiltração da água, com isso há o aumento do escoamento superficial no perfil compactado (HARMS & CHANASYK, 2000).

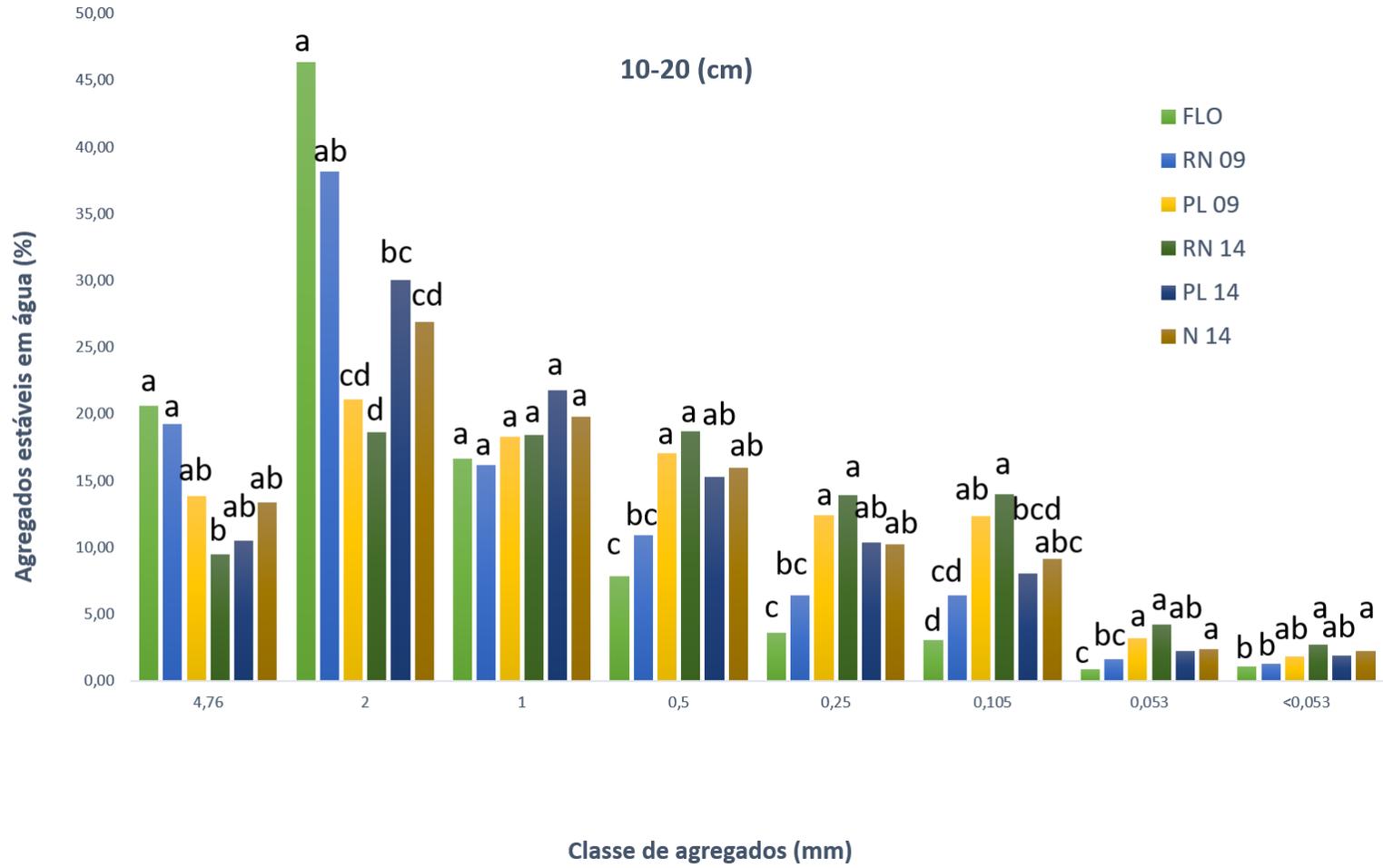
3.3.4. Distribuição de agregados estáveis em água e diâmetro médio de agregados

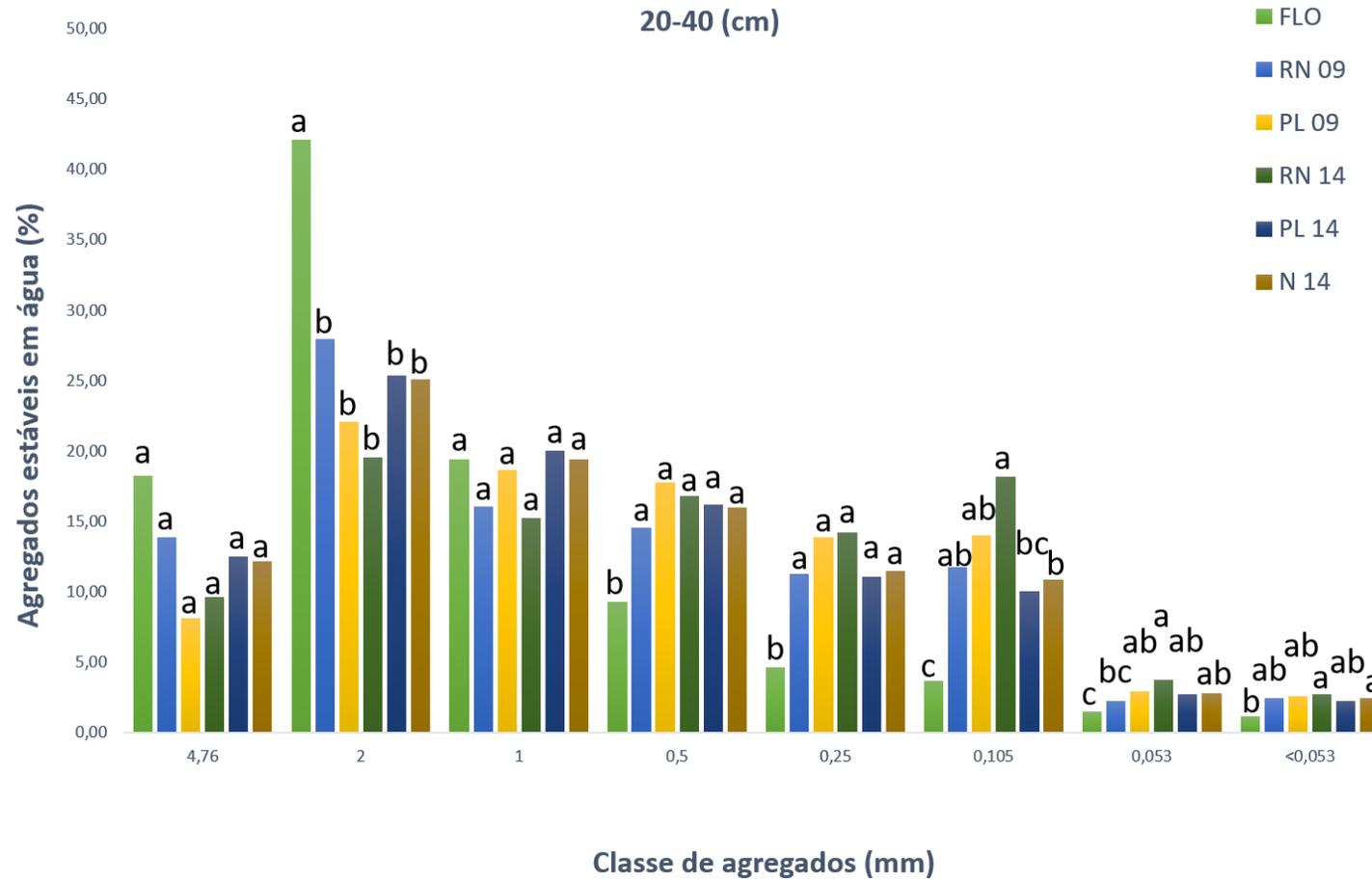
As diferenças existentes entre os sistemas, bem como entre as idades de recuperação foram mais expressivas na camada 0-10 cm, em que FLO e os sistemas com maior tempo de recuperação se destacaram com maior porcentagem de agregados grandes. Desse modo, em superfície, FLO e os sistemas com maior tempo de condução (RN09 e PL09) apresentaram maior percentual de agregados na classe $\geq 4,76$ mm em relação aos sistemas mais novos, instalados em 2014. Para classe de agregados com diâmetro $< 4,76$ a 2 mm, FLO e RN09 foram equivalentes entre si e significativamente superiores aos sistemas mais novos e não se diferiram de PL09. Por outro lado, os sistemas mais novos apresentaram, maior percentual de agregados das classes entre < 2 mm a 0,105mm, salvo N14 que não se diferenciou de RN09 na classe entre < 1 e 0,5mm. Isso é uma evidência que o tempo de recuperação colabora no aumento da proporção de

macroagregados e diminuição de microagregados, como observado em Wick et al., (2009), e pode se relacionar à maior abundância da vegetação no estrato superior em RN09 (Figura 8) e consequente aumento do conteúdo de matéria orgânica do solo com o aumento do tempo de recuperação (SCHOMAKERS et al, 2018) e ao efeito físico de raízes (D'ANDRÉA et al., 2002) que se concentram na camada mais superficial do solo (WICK et al., 2009). Em PL09 ainda pode ser considerada a possibilidade de formação de agregados coesos ocasionada pelo tráfego de máquinas pesados durante a recomposição da área minerada (STUMPF et al. 2017), por ocasião da construção do solo nesta área se deu em período chuvoso.

Figura 9- Distribuição dos agregados estáveis em água nas profundidades de 0-10, 10-20 e 20- 40 cm nos sistemas regeneração natural; plantio de mudas e nucleação implantados nos anos de 2009 e 2014, em áreas em processo de recuperação pós mineração de bauxita localizadas em Paragominas- PA.







Em cada classe, os valores seguidos da mesma letra, nas colunas, não diferiram entre si pelo teste de Tukey ($p < 0,05$).

O maior percentual de agregados grandes nos sistemas com maior tempo de condução e no sistema referência influenciou nos elevados valores para os índices de diâmetro médio geométrico (DMG) e diâmetro médio ponderado (DMP) na superfície (Tabela 4). Nota-se que, dentre os sistemas de recuperação, na profundidade de 0-10 cm, os sistemas com maior tempo de condução apresentaram maiores valores de DMG e DMP, sendo também os que, de forma geral, apresentaram maiores valores de matéria orgânica do solo (Tabela 3), evidenciando a importância da matéria orgânica para a formação de agregados maiores. Resultados semelhantes foram encontrados por Palmeira et al. (1999) e Hickmann et al. (2011) que obtiveram valores mais elevados de DMP nos sistemas com maior conteúdo de matéria orgânica.

Na profundidade de 10-20 cm o percentual de agregados da classe ≥ 4 mm em FLO não se diferiu dos encontrados nas áreas em recuperação, com exceção a RN14. Na classe de agregados entre < 4 a 2 mm RN09 se iguala à FLO e está se destaca das demais áreas em recuperação. Por outro lado, o sistema natural FLO apresentou menor porcentagem de agregados menores ($< 0,5$ mm a 0,053 mm) que PL09 e as áreas com menor tempo de recuperação, salvo PL14 para classe 0,105 mm. Isso implicou nos maiores valores de DMG e DMP obtidos na floresta, que os encontrados em P09 e nas áreas mais novas.

Tabela 4- Índices de diâmetro médio geométrico (DMG), índice de diâmetro médio ponderado (DMP) de diferentes sistemas pós mineração de bauxita em Paragominas- PA, coletados no primeiro ano de estudo.

Sistema	DMG	DMP
	----- mm-----	
	-----0-10 cm-----	
FLO	2,89 a	4,00 a
RN09	2,11 b	3,13 a
PL09	2,56 ab	3,66 a
RN14	1,07 c	1,82 b
PL14	1,15 c	1,90 b
N14	1,16 c	1,96 b
	-----10-20 cm-----	
Floresta	2,43 a	3,37 a
RN09	2,03 ab	3,02 ab
PL09	1,35 bc	2,17 bc
RN14	0,93 c	1,80 c
PL14	1,38 bc	2,26 bc
N14	1,33 bc	2,34 bc
	-----20-40 cm-----	
Floresta	2,14 a	3,11 a
RN09	1,45 b	2,35 ab
PL09	1,04 b	1,82 b
RN14	0,91 b	1,79 b
PL14	1,24 b	2,23 ab
N14	1,25 b	2,19 b

Os valores seguidos da mesma letra, nas colunas, não diferiram entre si pelo teste de Tukey ($p < 0,05$).

Na camada de 20-40 cm, na classe < 4 a 2 mm, o solo sob floresta apresentou maior porcentagem de agregados que os sob sistemas em recuperação, o que resultou em um menor percentual de agregados pequenos, < 1 mm até 0,053 mm no solo sob sistema

natural, em relação aos sistemas em recuperação, salvo RN14 e RN09 que não diferiram de floresta nas classes de agregados de 0,105 mm e 0,053 mm, respectivamente. No que se refere ao índice DMG nessa camada, os sistemas em recuperação não diferiram estaticamente entre si, diferindo apenas de FLO. Enquanto que para o DMP também não houve diferenças entre os sistemas alterados, no entanto, os RN09 e PL14 se aproximaram aos valores obtidos para floresta. FLO e RN09 também não diferenciaram entre si quanto a MOS nesta profundidade, com maiores valores de matéria orgânica do solo (Tabela 3).

Como observado neste estudo, a maior estabilidade de agregados encontra-se na camada mais superficial do solo, diminuindo com a profundidade, como também reportado em Stumpf et al. (2017). Isso provavelmente se deve à diminuição da matéria orgânica do solo em profundidade e menor influência dos ciclos de umedecimento e secagem que são mais evidentes nas camadas mais superficiais (WICK et al., 2009), além de menor desenvolvimento do sistema radicular em profundidade (STUMPF et al., 2017). Segundo Siqueira et al. (1994), para o desenvolvimento e sustentabilidade vegetal é necessário uma boa estruturação do solo, que se evidencia pela presença de agregados estáveis com diâmetro maior que 1 mm. Desta forma, na camada mais superficial, verificou-se que os sistemas de recuperação mais antigos, implantados em 2009, apresentaram maior porcentagem de agregados maiores que 2 mm e maiores DMG e DMP, evidenciando que o início do processo de recuperação estrutural nestes solos de mina construído se dá, principalmente, na camada superficial nos sistemas sob maior tempo de recuperação, o que coincidiu com a maior abundância de plantas no estrato superior, notadamente em RN09 (Figura 8) que apresentou, de forma geral, maior cobertura vegetal (observações em campo, Figuras 2A e 3A).

Desta forma, necessita-se de uma melhor avaliação das estratégias atualmente adotadas na recuperação, no sentido de promover um rápido recobrimento do solo com material vegetal e, conseqüente, o incremento de matéria orgânica que irão influenciar positivamente na agregação dos solos em processo de recuperação. Efeito este verificado nos trabalhos de Campos et al., (1995); Campos & Alves, (2008) em que a deposição contínua do material orgânico pela serapilheira e excreções radiculares, agiram como agente de formação e estabilização dos agregados, dando uma melhor estruturação aos solos estudados. Taboada-Castro et al. (2009) verificaram os efeitos de matéria orgânica na recuperação de áreas degradadas, obtendo aumento do diâmetro médio ponderado de

agregados na camada superficial, resultados semelhantes foram encontrados no presente estudo.

Comparando-se o solo natural com os sistemas de recuperação implantados mais recentemente, todas as classes de agregados em todas as profundidades foram impactadas pelas atividades de mineração. Na maioria dos casos estas perturbações mecânicas provocaram uma diminuição da matéria orgânica e dos tamanhos de agregados presentes no solo. No entanto, o crescimento das plantas e o desenvolvimento da cobertura do solo e, conseqüente, incremento de matéria orgânica nas áreas em recuperação com maior tempo de recuperação, fizeram com que iniciasse a recuperação da agregação do solo principalmente na superfície do solo das áreas mais antigas. Resultados semelhantes foram encontrados por Wick et al., (2009).

3.3.5 Infiltração de água no Solo

Os valores médios para velocidade de infiltração básica (VIB), as equações básicas e os coeficientes de determinação (R^2) para os respectivos sistemas de recuperação pós mineração estudados podem ser observados na Tabela 5. Os valores de VIB foram classificados como muito alto ($> 3 \text{ cm h}^{-1}$) para floresta e todos os sistemas de recuperação, conforme classificação proposta por Bernardo et al. (2006). O solo sob floresta apresentou VIB de $142,46 \text{ cm h}^{-1}$, distinguindo este sistema natural das áreas em recuperação. Esse valor médio de infiltração está acima do encontrado por Correia (1986) em Latossolo Amarelo Argiloso no Amazonas ($63,51 \text{ cm h}^{-1}$) sob floresta e acima também da condutividade hidráulica saturada obtida em superfície por Moraes et al, (2006) com permeâmetro Guelph em Paragominas.

O alto valor de VIB encontrado no solo sob floresta no presente estudo pode ter relação com a posição em que as parcelas sob a cobertura natural se encontram, geralmente na faixa que margeia a mina, entre as áreas de cava e as bordas do platô, o que acarretaria na formação de juntas de alívio de pressão verticais que, juntamente a uma trama porosa contínua, típica dos Latossolos bem estruturados facilita a infiltração da água.

Tabela 5: Velocidade de Infiltração Básica – VIB (cm h⁻¹), equação de ajuste da velocidade de infiltração e coeficiente de determinação.

Sistema	VIB (cm h ⁻¹)	Equação de ajuste	R ²
FLO	162,46 a	VI=10,441 T ^{-0,176}	0.9999
RN09	63,20 b	VI= 6,296 T ^{-0,243}	0.9999
PL09	42,64 bc	VI= 2,2495 T ^{-0,175}	0.9998
RN14	32,29 bc	V I =1,6567 T ^{-0,193}	0.9999
PL14	37,60 bc	VI= 2,864 T ^{-0,219}	0.9967
N14	27,12 c	VI= 0,8168 T ^{-0,134}	0.9987

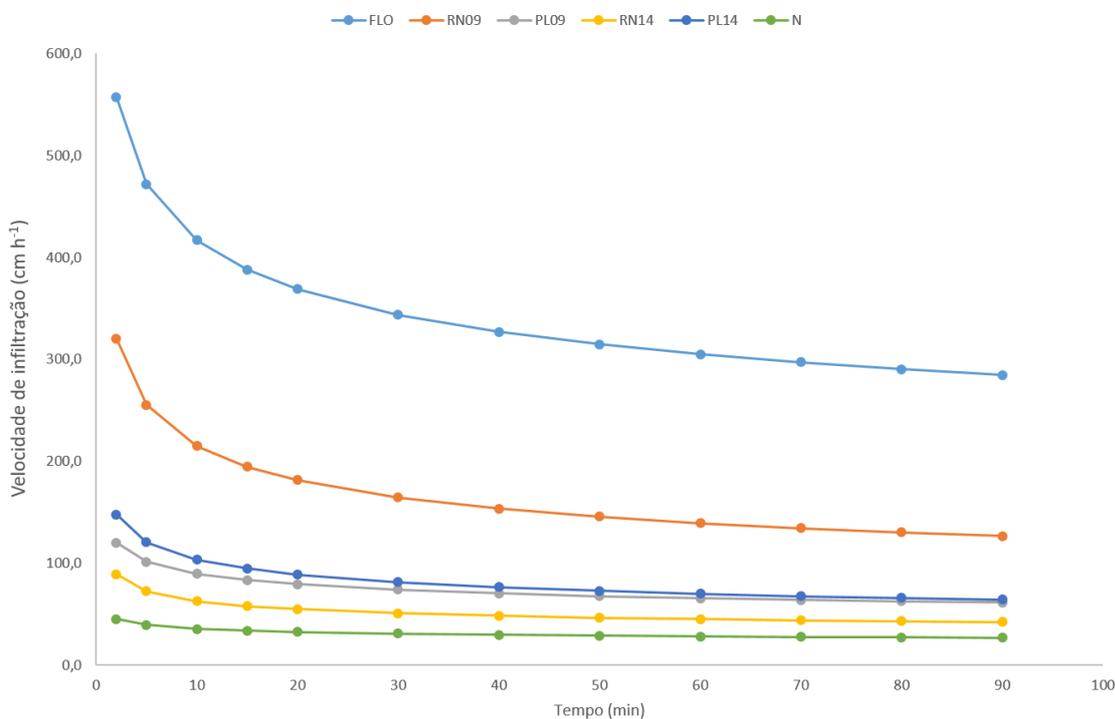
*Médias seguidas de mesma letra nas colunas não diferem estatisticamente conforme o teste de Tukey, a 5% de significância.

Apesar de que a construção do solo muitas vezes ocasiona o aumento da densidade e consequente diminuição da infiltração da água no solo (HARMS & CHANASYK, 2000), o tempo de recuperação e a formação de uma cobertura vegetal sobre o solo podem mitigar os efeitos negativos (GUEBERT & GARDNER, 2001, NUNES et al., 2012). Entre os sistemas em recuperação RN09, PL09, RN14 e PL14 não foram observadas diferenças significativas nos valores de VIB. No entanto, RN09 atingiu valor médio muito próximo ao encontrado por Corrêa (1986), anteriormente citado. Apesar da baixa diversidade em RN09, esse sistema apresentou valor de abundância de plantas no estrato superior equivalente ao encontrado na floresta, o que proporcionou um melhor recobrimento do solo e um maior teor de matéria orgânica em superfície, em relação ao demais sistemas em recuperação. Além disso, a melhor cobertura vegetal neste sistema, provavelmente fez com que se estabelecessem caminhos preferenciais formados pelas raízes e por elementos da macrofauna edáfica, proporcionando uma maior velocidade de infiltração, em relação à N14 que, apesar da abundância de plantas no estrato superior ser equivalente a encontrada em RN09, tem predomínio de Cecropia e é mais compactado. Nunes et al. (2012) também encontraram maior infiltração de água nas áreas com maior cobertura do solo em relação às áreas descobertas. Desta maneira, confirma-se a importância da manutenção da cobertura do solo com resíduos vegetais para conservar os atributos físicos do solo e impedir a formação de selamento superficial, que colabora para a diminuição da infiltração de água no solo e, conseqüentemente, para a da erosão hídrica (PANACHUKI et al. 2011).

Sobre o arranjo estrutural do solo, a presença de macroporosidade associada, influencia na infiltração de água no solo (REICHERT et al., 2003; BRADY e WEIL, 2013). Solos com pouca macroporosidade exibem relevantes restrições ao crescimento da vegetação e à infiltração de água em área de mineração (LUNARDI et al, 2008). Neste contexto, apesar de algumas áreas em recuperação apresentarem valores equivalentes de porosidade total e de macroporosidade, ou em alguns casos, até superiores aos encontrados na floresta, a VIB nas áreas em recuperação foi menor que a obtida na floresta. A respeito disso é importante ressaltar que em solos revolvidos, a continuidade dos poros é interrompida, diminuindo-se assim a condutividade hidráulica saturada nestes sistemas (CHINN & PILLAI, 2008). Além disso, a área de regeneração natural com 9 anos (RN09) atualmente apresenta mortalidade de árvores, principalmente *Croton*, formado clareiras que possibilitam a incidência direta de raios solares e chuva sobre a superfície. Clareiras com solos exposto também são bem comuns em PL09 e nas áreas mais recentes com 4 anos (RN14, PL14 e N14). Com o solo descoberto, os fragmentos finos resultantes do colapso dos agregados são transportados pela água de percolação e ocupam espaços porosos nas camadas mais superficiais, promovendo alterações no arranjo e conectividade do sistema poroso (observações elucidadas no capítulo anterior), e colaboram, juntamente com as alterações no arranjo estrutural relatadas por Mcsweeney & Jansen (1984), para a menor infiltração do solo de mina em relação ao solo natural e mesmo que o solo apresente valores de densidades considerados baixos, a falta de conectividade do sistema poroso pode levar a diminuição do fluxo livre da água (MAGALHÃES et al 2017).

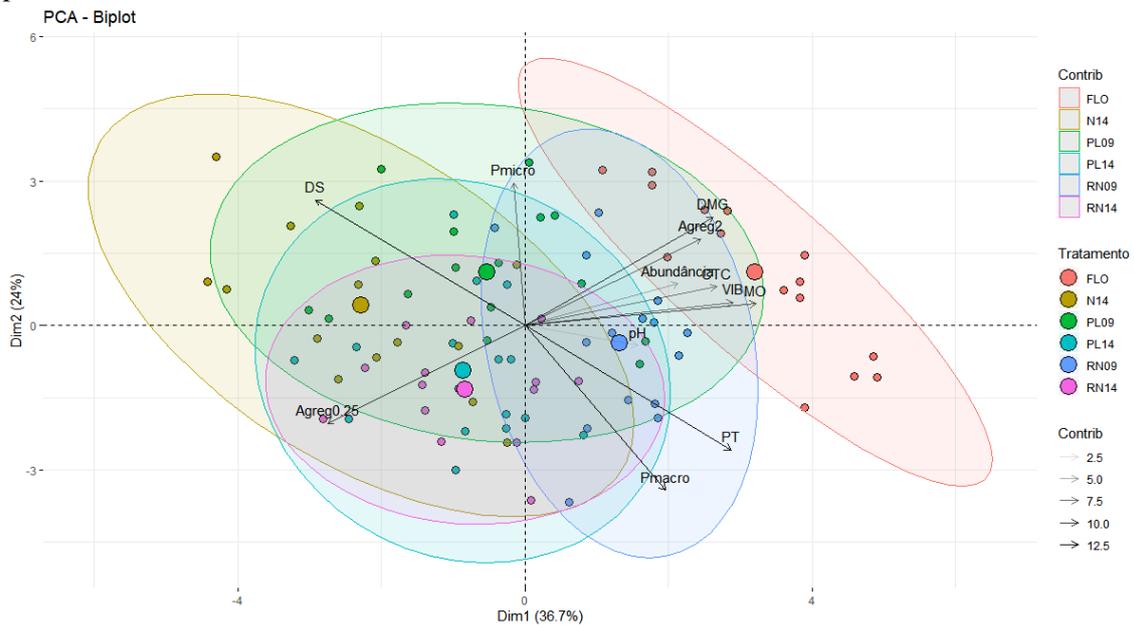
Na Figura 10 são apresentadas as curvas de velocidade de infiltração de água no solo estimadas até o tempo de 90 minutos nas diferentes áreas em recuperação após mineração de bauxita e no sistema referencial FLO. Através da observação dos resultados obtidos fica evidente a diminuição da velocidade de infiltração de água nas áreas em recuperação em relação ao solo natural sob floresta. No entanto, apesar de não haver diferenças nos valores de VIB para as áreas em recuperação, salvo entre RN09 e N14, a regeneração natural de 9 anos se destaca das demais, deixando evidente a importância do tempo de recuperação associado à eficiência do recobrimento do solo para a recuperação estrutural nas áreas degradadas.

Figura 10- Velocidade de infiltração de água no solo (cm h^{-1}), em floresta FLO e nos sistemas regeneração natural, plantio de mudas e nucleação implantados nos anos de 2009 (RN09, PL09) e 2014 (RN14, PL14, N14).



A Figura 11 apresenta a representação gráfica da análise dos componentes principais (ACP) das variáveis do solo a 0-10 cm e da vegetação e os diferentes sistemas de recuperação estudados. Pode-se notar uma grande heterogeneidade no padrão de dispersão das parcelas, principalmente na área de recuperação. Mesmo assim é perceptível que as parcelas das áreas em recuperação mais recentes, instaladas em 2014, se distanciam do sistema referência FLO. Por outro lado, observa-se que a abrangência das parcelas instaladas em 2009 (RN09 e PL09) se justapõe à da floresta. Em superfície o DMG, agregados do solo com diâmetro de 2 mm, VIB, matéria orgânica, a abundância de espécies vegetais no estrato superior e a CTC estão mais relacionadas FLO e RN09.

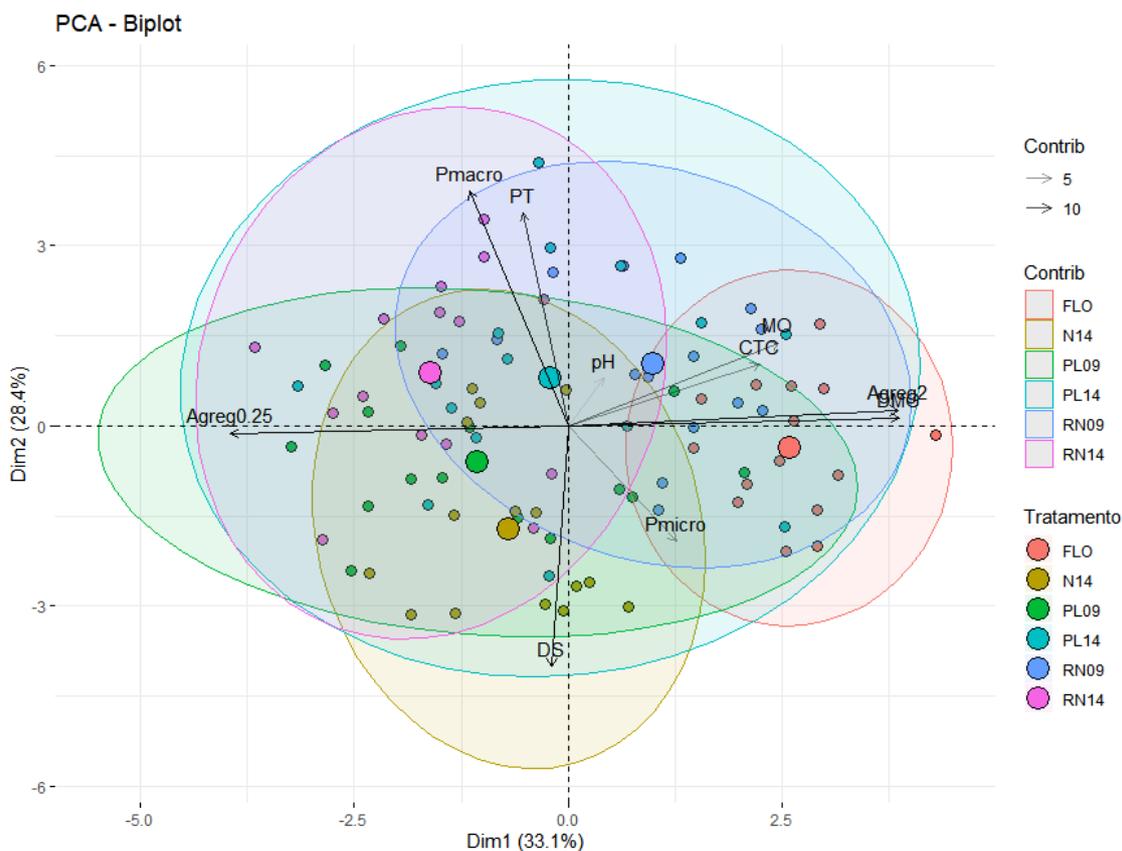
Figura 11- Análise de componentes principais (PCA) com base nas variáveis do solo nos diferentes sistemas de recuperação estudados: FLO= Floresta; N14= Nucleação; PL09 e PL14= Plantio; RN09 e RN14= Regeneração Natural, implantados em 2009 e 2014. 0–10 cm profundidade.



Abundância= Abundância de espécies vegetais; Agreg2= Agregados de 2 mm; Agreg0,25= Agregados de 0,25 mm; DMG= Diâmetro médio geométrico; MO= Matéria Orgânica do solo; PT= Porosidade total; Pmacro= Macroporosidade; Pmicro= Microporosidade; pH em água; CTC= Capacidade de troca catiônica; DS= Densidade do solo; VIB= Velocidade de infiltração básica.

Os sistemas com menor tempo de condução (RN14, PL14 e N14) se apresentaram relacionados aos agregados de 0,25 mm (pequenos), indicando que a ineficiência da cobertura vegetal nestes sistemas afetou negativamente a estrutura do solo em superfície. A macroporosidade e a PT estão correlacionadas ao sistema RN09 e a microporosidade à PL09. A nucleação de 4 anos e PL09, que tiveram solo preparado em condições de excesso de umidade, apresentam-se relacionados à DS, confirmando que o tráfego de maquinário pesado em solo muito úmido provoca deformações estruturais no solo (CHINN & PILLAI, 2008).

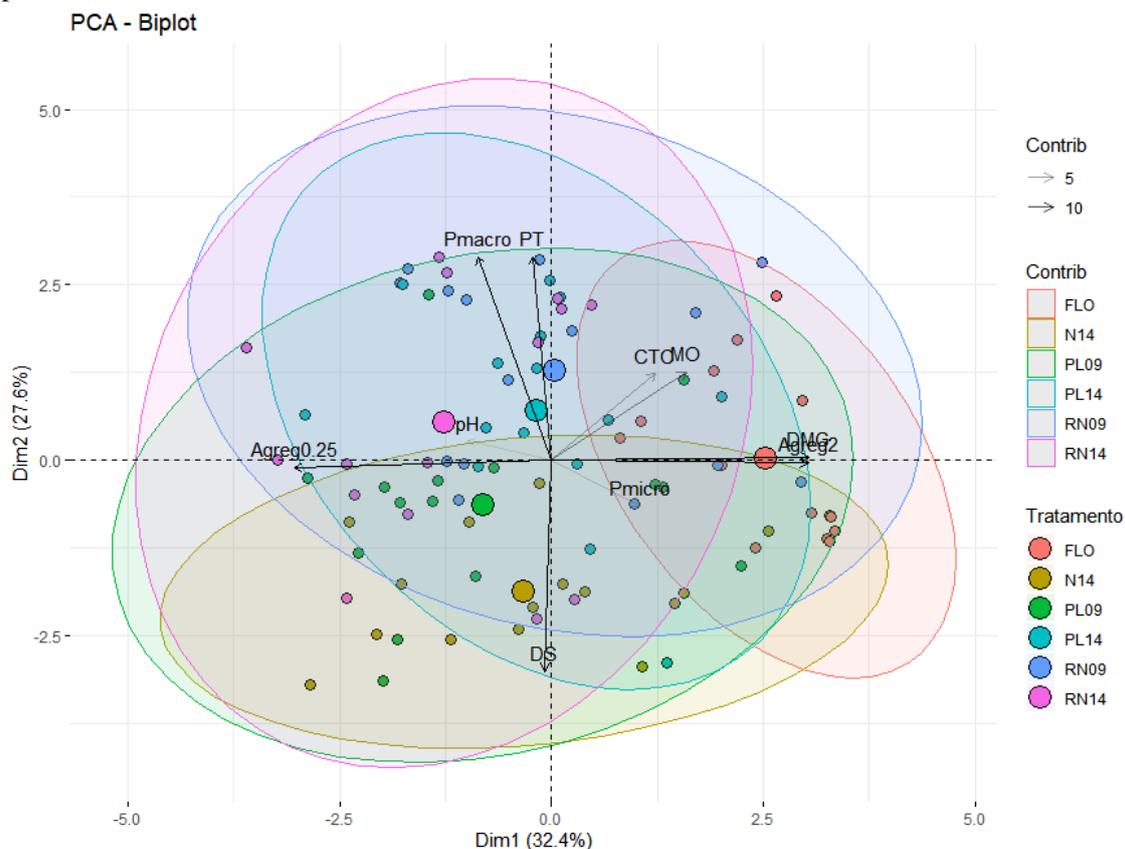
Figura 12- Análise de componentes principais (PCA) com base nas variáveis do solo nos diferentes sistemas de recuperação estudados: FLO= Floresta; N14= Nucleação; PL09 e PL14= Plantio; RN09 e RN14= Regeneração Natural, implantados em 2009 e 2014 10–20 cm profundidade.



Abundância= Abundância de espécies vegetais; Agreg2= Agregados de 2 mm; Agreg0,25= Agregados de 0,25 mm; DMG= Diâmetro médio geométrico; MO= Matéria Orgânica do solo; PT= Porosidade total; Pmacro= Macroporosidade; Pmicro= Microporosidade; pH em água; CTC= Capacidade de troca catiônica; DS= Densidade do solo; VIB= Velocidade de infiltração básica.

Em subsuperfície, nas profundidades de 10-20 e 20-40 cm, as ACPs apresentam comportamento relativamente semelhante (Figuras 11 e 12, respectivamente), com grande dispersão das parcelas, levando a uma menor distinção dos ambientes, em comparação ao que foi observado na camada superficial. Isso é reflexo da grande heterogeneidade das áreas de solos construídos e mostra que estes solos, nessas profundidades, são menos sensíveis a fatores de evolução pedogenética a curto prazo que na camada superficial. No entanto, nestas camadas, as variáveis do solo mais claramente relacionadas com o sistema de floresta são DMG e agregados de diâmetro de 2mm, mas também MOS e CTC, estas últimas relacionadas também a RN09 a 10-20 cm, enquanto a densidade continua relacionada aos sistemas N14 e PL09, por motivos já explicitados.

Figura 13- Análise de componentes principais (PCA) com base nas variáveis do solo nos diferentes sistemas de recuperação estudados: FLO= Floresta; N14= Nucleação; PL09 e PL14= Plantio; RN09 e RN14= Regeneração Natural, implantados em 2009 e 2014. 20–40 cm profundidade.



Abundância= Abundância de espécies vegetais; Agreg2= Agregados de 2 mm; Agreg0,25= Agregados de 0,25 mm; DMG= Diâmetro médio geométrico; MO= Matéria Orgânica do solo; PT= Porosidade total; Pmacro= Macroporosidade; Pmicro= Microporosidade; pH em água; CTC= Capacidade de troca catiônica; DS= Densidade do solo; VIB= Velocidade de infiltração básica.

Com referências às Figura 11, 12 e 13, percebe-se que as variáveis do solo que mais refletem a qualidade do solo em superfície no sistema natural FLO são MOS, VIB e as variáveis ligadas à estrutura (agregados da classe de 2mm e DMG). As variáveis de estrutura e, secundariamente, a MOS e CTC também foram as que mais se relacionaram ao sistema referência FLO em subsuperfície podem ser interpretadas como bons indicadores da qualidade do solo neste estudo. Apesar da grande variabilidade de condições existentes no solo de mina, RN09 foi o que mais se aproximou de sistema referência para as citadas variáveis.

3.4 CONCLUSÃO

O tempo de condução afetou positivamente a recuperação da estrutura do solo na camada superficial, em que as áreas com maior tempo de recuperação, apresentaram maiores valores de DMP e DMG que as áreas mais recentes. No entanto os sistemas não atingiram qualidade estrutural compatível à da floresta em profundidade para a classe de agregados de 2 mm e DMG.

Dentre os sistemas em recuperação, o sistema de regeneração natural com 9 anos (RN09) se destacou por apresentar maior teor de matéria orgânica em superfície e em profundidade que os demais.

Em relação a N14, RN09 apresentou maior VIB, maiores valores PT e PMa e menores valores de DS.

As áreas de solos construídos apresentaram diminuição da VIB e dos valores de matéria orgânica e CTC em superfície, quando comparadas ao sistema referência FLO. No entanto, a ACP indica que a RN09, apresentando maior eficiência na cobertura do solo, foi o sistema que mais se aproximou do solo referência sob floresta natural pelas variáveis MOS, CTC, VIB e DMG e agregados da classe de 2 mm nas camadas superficiais, indicando que esse é o que mais promissor na recuperação da qualidade do solo até esta fase de estudo.

Os solos construídos não responderam a fatores de evolução pedogenética a curto prazo para a maioria das variáveis na camada de 20-40 cm, portanto, a recuperação destes atributos em maiores profundidades demandará muito mais tempo.

3.5 REFERÊNCIAS

ALBUQUERQUE, A.L.; JALMEIDA, A.; MAFRA, J.A.; MEDEIROS, A.L.; ALBERTON, J.C.; A. Atributos físicos do solo em área de mineração de carvão influenciados pela correção da acidez, adubação orgânica e revegetação. **Revista Brasileira de Ciência do solo**. 32:1379-1388, 2008.

ALMAJMAIE, A.; HARDIE, M.; ACUNA, T.; BIRCH, C. **Evaluation of methods for determining soil aggregate stability** Soil Tillage Res., 167 (2017), pp. 39-45

ALMEIDA, DS. Alguns princípios de sucessão natural aplicados ao processo de recuperação. In: Recuperação ambiental da Mata Atlântica [online]. 3rd ed. rev. and enl. Ilhéus, BA: Editus, 2016, pp. 48-75

ARATANI, R. G. et al. Qualidade física de um Latossolo Vermelho acriférrico sob diferentes sistemas de uso e manejo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, MG, v. 33, n. 3, p. 677-687, maio/jun. 2009.

BALL, C. Ball, T. Batey, L. Munkholm **Field assessment of soil structural quality a development of the Peerkamp test** Soil Use Manag., 23 (2007), pp. 329-337

BASTOS, T. X.; SILVA, G. de F. G. ; PACHECO, N. A.; FIGUEIREDO, R. de O. Informações agroclimáticas do município de Paragominas para o planejamento agrícola. Separatas, **Embrapa Amazônia Oriental**, 2006.

BAYER, C.; MIELNICZUK, J. Dinâmica e função da Matéria Orgânica - Fundamentos da matéria orgânica do solo: ecossistemas tropicais e subtropicais. Gabriel de Araújo Santos (ed.). [et al.] – 2.ed. Porto Alegre: Metrópole, 2008.

BENDFELDT, E.S.; BURGER, J.A. & DANIELS, W.L. Quality of amended mine soils after sixteen years. **Soil Sci. Soc. Am. J.**, 65:1736-1744, 2001.

BERNARDO, S; SOARES, A. A.; MANTOVANI, E. C. **Manual de irrigação**. 8. Ed. Atual. e Ampl. Viçosa: UFV, 2006. 625p.

BEZERRA, S. A.; CANTALICE, J. R. B. Influência da cobertura do solo nas perdas de água e desagregação do solo em entressulcos. **Caatinga**, Mossoró, v. 22, n. 3, p. 18-28, 2009.

BOHRER, S.L., LIMB, R.F., DAIGH, A.L.M., VOLK, J.M., Below-Ground attributes on reclaimed surface minelands over a 40-year chronosequence. **Land Degrad.Dev.** 2017.

BRADSHAW A.D.; CHADWICK M.J. The restoration of land the ecology and reclamation of derelict and degraded land. **Blackwell Scientific Publishers**: Oxford, 1980

BRADY, N. C; WEIL, R. R. **Elementos da Natureza e propriedades do solo**. Editora Bookman, 3ªed. 2012.

BRASIL. Lei 6.938, de 31 de agosto de 1981. Disponível em: http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/leis/l6938.htm. Acesso em 22/05/2019.

CARVALHO, R. P. B. Contribuições da análise de geossistemas na recuperação de áreas degradadas por mineração. **Caderno de Geografia**, Belo Horizonte, v.21, n.36, p.13-28, jul./dez., 2011.

CAMPOS, B.C.; REINERT, D.J.; NICOLODI, R.; RUEDELL, J. & PETRERE, C. Estabilidade estrutural de um Latossolo Vermelho-Escuro distrófico após sete anos de rotação de culturas e sistemas de manejo de solo. *R. Bras. Ci. Solo*, 19:121-126, 1995.

CAMPOS, F.S. & ALVES, M.C. Uso de lodo de esgoto na reestruturação de solo degradado. *R. Bras. Ci. Solo*, 32:1389-1397, 2008.

CHENG, M., XIANG, Y., XUE, Z., AN, S., DARBOUX, F., 2015. Soil aggregation and intra-aggregate carbon fractions in relation to vegetation succession on the Loess Plateau, China. **Catena** 124, 77–84.

CHINN, C. & PILLARI, U.P.P. Self- repair of compacted Vertisols from Central Queensland. *Geoderma*, 144: 491-504, 2008.

CHONG, S.K. & COWAERT, P.T. Infiltration in reclaimed mined land ameliorated with deep tillage treatments. **Soil Till. Res.**, 44:255-264, 1997.

CORRÊA, J. C. Características físicas de um Latossolo Amarelo muito argiloso (Typic Acrorthox) do estado do Amazonas, sob diferentes métodos de preparo de solo Pesquisa . *Agropecuária Brasileira*, Brasília, 20(12):1381-1387, dez. 1985.

D'ANDRÉA, A.F.; SILVA, M.L.N.; CURTI, N. & FERREIRA, M.M. Atributos de agregação indicadores da qualidade do solo em sistemas de manejo na região dos cerrados no sul do Estado de Goiás. **R. Bras. Ci. Solo**, 26:1047-1054, 2002

EFFGEN, T.A.M.; PASSOS, R.R.; ANDRADE, F.V.; LIMA, J.S.L.; REIS, E.F. & BORGES, E.N. Propriedades físicas do solo em função de manejos em lavouras de café conilon. *R. Ceres*, 59:414-421, 2012

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA — EMBRAPA. **Manual de métodos de análises de solo**. 2.ed. Rio de Janeiro, Ministério da Agricultura e do Abastecimento, 1997. 212p.

GUIMARÃES, R. M. L.; BALL, B. C.; TORMENA, C. A. Improvements in the visual evaluation of soil structure. **Soil Use and Management**, v. 27, n. 3, p. 395-403, 2011.

HICKMANN, C.; COSTA, L. M.; SCHAEFER, C.E.G.R.; FERNANDES, R.B.A. Morfologia e estabilidade de agregados superficiais de um Argissolo Vermelho Amarelo sob diferentes manejos de longa duração e mata atlântica secundária, **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, 35:2191-2198, 2011.

HORBE, A. M. C. & COSTA, M. L. Relações genéticas entre Latossolos e crostas lateríticas aluminosas e alumino-ferruginosas na região de Paragominas, Pará, **Revista Brasileira de Geociências** 29(4):497-504, dezembro de 1999

HYDRO. **Mineração de Bauxita**. Disponível em: <<http://www.hydro.com/pt/Aluminio/A-Hydro-no-Brasil/Sobre-o-aluminio/Ciclo-de-vida-do-aluminio/Mineracao-de-bauxita/>>. Acesso em 22 de julho de 2017.

IZQUIERDO, I. F. CARAVACA, M.M. ALGUACIL, G. HERNANDEZ, A. ROLDAN
Use of microbiological indicators for evaluating success in soil restoration after revegetation of a mining area under subtropical conditions *Appl. Soil Ecol.*, 30 (2005), pp. 3-10

JACKSON, R.B. J. CANADEL, J.R. EHLERINGER, H.A. MOONEY, O.E. Sala, E.D. Schulze
A global analysis of root distributions for terrestrial biomes *Oecologia*, 108 (1996), pp. 389-411

KÄMPF, N. et al. Propriedades, pedogênese e classificação de solos construídos em áreas de mineração na bacia carbonífera do baixo Jacuí (RS). **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.21, p.79-88, 1997.

KEMPER, W.D. & ROSENAU, R.C. Aggregate stability and size distribution. In: KLUTE, A., ed. *Methods of soil analysis; Physical and mineralogical methods*. Madison, **American Society of Agronomy**, 1986. Parte 1. p.425-443

KRUMMELBEIN, J.; HORN, R.; PAGLIAI, M. (Eds.), *Soil Degradation. Advances in Geocology*, vol. 42, **Catena Verlag**, pp. 89-103, 2013

LONGO, R. M.; RIBEIRO, A. I.; MELO, W. J. Recuperação de solos degradados na exploração mineral de cassiterita: biomassa microbiana e atividade da desidrogenase. **Bragantia**, Campinas, v.70, n.1, p.132-138, 2011.

LUNARDI NETO, A.; ALBUQUERQUE, J.A.; ALMEIDA, J. A.; MAFRA, A. L.; MEDEIROS, J. C.; ALBERTON. A. Atributos físicos do solo em área de mineração de carvão influenciados pela correção da acidez, adubação orgânica e revegetação. **Revista Brasileira Ciência do Solo**, 1379-1388, 2008

MARTINS, W. B. R.; FERREIRA, G. C.; SOUZA, F. P.; DIONÍSIO, L. F. S.; OLIVEIRA, F. A. Deposição de serapilheira e nutrientes em áreas de mineração submetidas a métodos de restauração florestal em Paragominas, Pará. *Floresta*, Curitiba, v. 48, n. 1, p. 37-48, 2018.

MATERECHERA S. A.; DEXTER, A. R.; ALSTON, A. M. Formation of aggregates by plant roots in homogenised soils. **Plant and Soil**, Volume 142, Issue 1, pp 69–79, April 1992.

MAZURAK, A. P. Effect of gaseous phase on water-stable synthetic aggregates. *Soil Sci.*, 69:135-148,1950
 MENDES, F. G.; MELLONI, E. G.P.; MELLONI, R. Aplicação de atributos físicos do solo no estudo da qualidade de áreas impactadas, em Itajuba/MG. **Cerne**, Lavras, v. 12, n. 3, p. 211-220, jul./set. 2006

McKEAGUE, J.A. & DAY, J.H. Dithionite and oxalate-extractable Fe and Al as aids in differentiating various classes of soils. **Can. J. Soil Sci.**, 46:13-22, 1966.

MENTGES, M. I. **Implicações do uso do nas propriedades físico-hídricas e mecânicas de um argissolo vermelho amarelo e de um gleissolo háplico**. Dissertação de Mestrado. Centro de Ciências Rurais, Universidade Federal de Santa Maria, 108 p., 2010.

MEHRA, O.P. & JACKSON, M.L. Iron oxide removal from soils and clays by a dithionite-citrate system buffered with sodium bicarbonate. In: **CLAYS & CLAY MINERAL CONFERENCE**, London, 1960. **Proceedings**. London, v.7, 1960. p.317-327.

MORAES, J.M.; SCHULER, A.E.; DUNNE, T. FIGUEIREDO, R.O; VICTORIA, R.L. Water storage and runoff processes in plinthic soils under forest and pasture in Eastern Amazonia. **HYDROLOGICAL PROCESSES** Hydrol. Process. 20, 2509–2526. 2006

MOREIRA, P.R. **Manejo do solo e recomposição da vegetação com vistas a recuperação de áreas degradadas pela extração de bauxita, Poços de Caldas, MG.** (Tese Doutorado) Universidade Estadual Paulista “Julio de Mesquita Filho”, Doutorado em Ciências Biológicas, 2004.

MUKHOPADHYAY, S.K. MAITI, R.E. MASTO **Use of Reclaimed Mine Soil Index (RMSI) for screening of tree species for reclamation of coal mine degraded land** **Ecol. Eng.**, 57, pp. 133-142. 2013

NOVAIS, R.F.; MELLO, J.W.V. Relação solo-planta. In: NOVAIS, R.F.; ALVAREZ V., V.H.; BARROS, N.F.; FONTES, R.L.F.; CANTARUTTI, R.B.; NEVES, J.C.L. Fertilidade do solo. Viçosa, MG, **Sociedade Brasileira de Ciência do Solo**, 2007. p.276-374.

NUNES L.A.P.L.; DIAS L.E.; JUCKSCH I & BARROS N.F. Atributos físicos do solo em área de monocultivo de cafeeiro na Zona da Mata de Minas Gerais. **Bioscience Journal**, 26:71-78, 2010.

OHARMS, T.E. & CHANASYK, D.S. Plot and small-watershed scale runoff from two reclaimed surface-mined watersheds in Alberta. **Hydrol. Proc.**, 14:1327-1339, 2000.

PALMEIRA, P.R.T.; PAULETTO, E.A.; TEIXEIRA, C.F.A.; GOMES, A.S. & SILVA, J.B. Agregação de um Planossolo submetido a diferentes sistemas de cultivo. **R. Bras. Ci. Solo**, 23:189-195, 1999.

PANACHUKI, E. et al. Rugosidade da superfície do solo sob diferentes sistemas de manejo e influenciada por chuva artificial. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, MG, v. 34, n. 2, p. 443-452, 2010.

PINTO, L.F.S. **Potencial de acidificação e neutralização dos materiais geológicos para a composição do solo construído em áreas de mineração de carvão.** 1997. 186f. Tese (Doutorado em Agronomia – Ciências do Solo) - Faculdade de Agronomia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul

REICHERT, J. M.; REINERT, D. J.; BRAIDA, J. A. Qualidade dos solos e sustentabilidade de sistemas agrícolas. **Ciência & Ambiente**, v.27, p. 29-48, 2003.

REYNOLDS, W. D.; BOWMAN, B. T.; DRURY, C. F.; TAN, C. S.; LU, X. Indicators of good soil physical quality: density and storage parameters. **Geoderma**, v. 110, n. 1-2, p. 131-146, 2002

RODRIGUES, T. E.; SILVA, C. R.; SILVA J., M., L.; JÚNIOR, R., C., O.; GAMA, J., R., N., F.; VALENTE, M., A. EMBRAPA. Caracterização e Classificação dos solos do

Município de Paragominas, Estado do Pará. (**Comunicado técnico**, 1.ed. Belém, Embrapa Amazônia Oriental, 2003. Documento 162. 55p).

SALOMÃO, R.P.; ROSA, N. A.; MORAI, K. A. C. Dinâmica da regeneração natural de árvores em áreas mineradas na Amazônia. **Boletim Museu Paraense Emílio Goeldi. Ciências Naturais**, Belém, v. 2, n. 2, p. 85-139, 2007.

SALTON, J.C.; SILVA, W.M.; TOMAZI, M. & HERNANI, L.C. **Determinação da agregação do solo - Metodologia em uso na Embrapa Agropecuária Oeste**. Dourados, Embrapa Agropecuária Oeste, 2012. 8p. (Comunicado Técnico, 184)

SANTOS, R. D. dos; LEMOS, R. C. de; SANTOS, H. G. dos; KER, J. C.; ANJOS, L. H. C. dos; SHIMIZU, S. H. **Manual de descrição e coleta de solo no campo**. 6. ed. rev. e ampl. Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo / Ed. Suprema Gráfica e Editora Ltda, 100 p. 2013.

SCHWENKE, G.D.; MULLIGAN DR.; BELL L.C. Topsoil stripping and replacement for the rehabilitation of bauxite-mined land at Weipa. II. Two decades of mine soil development. **Australian Journal of Soil Research** 38, 371–93, 2000

SCOLFORO, J. R. S.; FIGUEIREDO, A.F. **Biometria Florestal**. Lavras: UFLA/FAEPE, 1998. 310p.

SILVA, M.S.L.; RIBEIRO, M.R. Influência do cultivo contínuo de cana-de-açúcar nas propriedades morfológicas e físicas de solos argilosos de tabuleiro no estado de Alagoas. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.16, p.397-402, 1992.

SILVA, E. N.; SANTANA, A. C. Modelos de regressão para estimação do volume de árvores comerciais, em florestas de Paragominas. **Revista Ceres**, v.61, n.5, p.631-636, 2014.

SILVA, J. V. et al. Perdas de solo e água por erosão hídrica em floresta equiânea em um Latossolo Vermelho-Amarelo. **Revista Brasileira de Ciências Agrárias**, Recife, v. 5, n. 4, p. 579-584, 2010.

STROO, H. F., & JENCKS, E. M. Enzyme Activity and Respiration in Minesoils1. **Soil Science Society of America Journal**, 46(3), 548, (1982)

SCHOMAKERS, J.; MAYER, H.; LEE, J.Y.; LEE, T.Y.; JIEN, S.H.; MENTLER, A.; HEIN, T.; HUANG, J.C.; HSEU, Z.Y.; CHENG, L.W.; YU, C.K.; ZEHETNER, F. Soil aggregate breakdown and carbon release along a chronosequence of recovering landslide scars in a subtropical watershed. **CATENA**, Volume 165, Pages 530-536, June 2018.

SILVA, I.F. & MIELNICZUK, J. Ação do sistema radicular de plantas na formação e estabilização de agregados do solo. **Revista Brasileira Ciência do Solo**, 21:113-117, 1997

SIQUEIRA, J. O.; MOREIRA, F. M.; GRISI, B. M.; HUNGRIA, M.; ARAÚJO, R. S. **Microrganismos e processos biológicos do solo: perspectiva ambiental**. Brasília, DF: Embrapa, 1994. 142 p.

STUMPF, L. E.A.; PAULETTO; SPINELLI L. F.P. Soil aggregation and root growth of perennial grasses in a constructed clay minesoil. **Soil and Tillage Research** Volume 161, Pages 71-78, August 2017.

TABOADA-CASTRO, M.M.; ALVES, M.C.; NASCIMENTO, V. & TABOADA-CASTRO, T. Revegetation on a removed topsoil: Effect on aggregate stability. *Comm. Soil Sci. Plant Anal.* 40:771-786, 2009.

TACKETT, J. L.; PEARSON, R. W. Some characteristics of soil crusts formed by simulated rainfall. **Soil Science**, Baltimore, v. 99, n. 6, p. 407-413, 1964.

TORBERT, J.L.; BURGER, J.A. & DANIELS, W.L. Pine growth variation associated with overburden rock type on a reclaimed surface mine in Virginia. *J. Environ. Qual.*, 19:88-92, 1990.

VALENTIN, C.; BRESSON, L.M. SOIL CRUSTING. Morphology, genesis and classification of surface crusts in loamy and Sandy soil. **Geoderma**, Amsterdam. V.55. p. 225-245, 1992

VAN BAVEL, C.H.M. Mean weight diameter of soil aggregates as a statistical index of aggregation. *Soil Sci. Soc. Am. Proc.*, Madison, 14:20-23, 1949

VAN GENUCHTEN, M. T. A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. **Soil Science Society America Journal**, Madison, v. 44, p. 892-898, 1980.

VILLA NOVA, N. A.; MOREIRA, P. R.; PEREIRA, A. B. Análise da eficiência de captura de energia solar por um dossel de *Eucalyptus pellita* F.Muell sob várias densidades de plantio. **Revista Brasileira de Agrometeorologia, Santa Maria**, v.11, n. 2, p. 269-274, 2003.

WICK, A.F. INGRAM, L.J. STAHL P.D. Aggregate and organic matter dynamics in reclaimed soils as indicated by stable carbon isotopes. **Soil Biol. Biochem.**, 41 (2009), pp. 201-209.

WISCHMEIER, W. H. Surface runoff in relation to physical and management factors . In: **Panamerican Soil Conservation Congress**, 1966, São Paulo. Proceedings São Paulo: SBCS, 1966. p. 237-244.

YODER, R.E. A direct method of aggregate analysis of soils and a study of the physical nature of erosion losses. **J. Am. Soc. Agron.** v.28, p.337-351, 1936.

ZHANG, L. W. JINMANWANG, Z. BAI, L.V. CHUNJUAN. Effects of vegetation on runoff and soil erosion on reclaimed land in an opencast coal-mine dump in a loess área **Catena**, 128 (2015), pp. 44-53

4 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Os solos construídos apresentam-se muito distintos do Latossolo original, tanto macro, quanto micromorfologicamente. As principais alterações nos solos construídos dizem respeito ao arranjo dos horizontes, à estrutura, à proximidade de camadas concrecionárias à superfície, à densidade, porosidade e fertilidade.

O conjunto de alterações podem dificultar a recuperação rápida no sentido da recuperação da área degradada, pois podem dificultar ou limitar química e fisicamente o desenvolvimento de plantas não adaptadas às novas condições ambientais.

Os progressos na pedogênese dos solos construídos são mais evidentes nas áreas mais antigas e estão relacionadas à qualidade da cobertura do solo, maior abundância de plantas no estrato superior e à atividade biológica que forma e mantém a nova estrutura biogênica que foi evidenciada nas camadas/horizontes mais superficiais.

O sistema de restauração por regeneração natural instalada em 2009, com 7 e 9 anos de condução apresentou horizonte A com organização estrutural mais próxima à encontrada no horizonte A1 do solo inalterado sob floresta, mostrando ser o melhor sistema de recuperação do solo até esta fase de estudo. RN09 também se mostrou mais eficiente na recuperação de importantes atributos relacionados à qualidade do solo em superfície, como MOS, CTC, VIB e DMG e agregados da classe de 2 mm nas camadas superficiais, indicando que esse é o mais promissor na recuperação da qualidade do solo até esta fase de estudo.

Os solos construídos não responderam a fatores de evolução pedogenética a curto prazo para a maioria das variáveis na camada de 20-40 cm, portanto, a recuperação destes atributos em maiores profundidades demandará muito mais tempo.

A recuperação dos atributos físicos dos solos construídos, especialmente abaixo da camada de 0- 10 cm, provavelmente ocorrerá em um maior tempo. Novas pesquisas devem ser realizadas com a finalidade de se encontrar maneiras de alcançar a melhor combinação dos atributos do solo para o uso pretendido da terra pós mineração.

APÊNDICES - Descrição morfológica dos perfis do solo natural, sob floresta alterada e dos solos construídos em área de mineração de bauxita.

**DESCRIÇÃO MORFOLÓGICA
FLORESTA NATURAL ALTERADA (FLO)
DESCRIÇÃO MORFOLÓGICA**

- A1 0-5 cm, bruno-escuro (10YR 3/3, úmida) e bruno (10YR 4/3, seca) e; muito argilosa; forte muito grande grumosa; muito dura, firme, plástica e pegajosa; transição plana abrupta.
- A2 5-7 cm, amarelo-brunado (10YR 6/6, úmida) e bruno-amarelo-escuro (10YR 4/6, seca); muito argilosa; forte média grumosa; muito dura, firme, plástica e pegajosa; transição abrupta.
- A3 7-17 cm, bruno-amarelado (10YR 5/4, úmida) e amarelo-brunado (10YR 6/6, seca); muito argilosa; moderada média grumosa e forte pequena blocos subangulares; dura, firme, plástica e pegajosa; transição plana clara.
- BA 17-34 cm, amarelo-brunado (10YR 6/6, úmida), mosqueados comuns, distintos, médios 5YR 5/8 (úmida); e proeminentes, pequenos vermelho (2,5YR 4/8, úmida); muito argilosa; moderada pequena blocos subangulares; forte média grumosa; dura, firme, plástica e pegajosa; transição plana clara.
- B1 34-82 cm, amarelo-avermelhado (7,5YR 7/8, úmida); muito argilosa; moderada pequena e média blocos subangulares; dura, firme, plástica e pegajosa; transição plana gradual.
- B2 82-118 cm, amarelo-avermelhado (7,5YR 6/8, úmida); muito argilosa; moderada pequena blocos subangulares; cerosidade fraca pouca; dura, firme, plástica e pegajosa; transição plana difusa.
- B3 118-200 cm+, coloração variegada, composta de amarelo-avermelhado (7,5YR 6/8, úmida), vermelho (2,5YR 5/8, úmida) e vermelho-claro (2,5YR 7/8, úmida); muito argilosa; moderada pequena blocos subangulares e moderada pequena granular; ligeiramente dura, friável, plástica e pegajosa.

RAÍZES- Comuns médias e finas nos horizontes A1, A2, A3; poucas e finas nos horizontes BA, B1 e B2; raras muito finas no B3.

OBSERVAÇÕES - Camada O não coletada, na profundidade de 1- 0 cm, com intensa atividade biológica e grande presença de material em decomposição.

- Biopedoturbações muitas nos Horizontes A. e poucas em BA e raras em B1

- Mosqueados comuns, distintos centimétricos na matriz do solo de 10% (5YR5/8, úmida); e proeminentes milimétricos nos canais radiculares (3%) vermelho (2,5YR 4/8, úmida) em BA.

- O variegado em B3 acontece em ambiente bem drenado, e provavelmente está relacionado a domínios goethíticos e hematíticos neste horizonte, processo de xantização.

**PLANTIO INSTALADO INSTALADO EM 2009
ÁREA COM 7 ANOS**

PERFIL 1 - PL09_7

DESCRIÇÃO MORFOLÓGICA

- A 0-5 cm, bruno-amarelado (10YR 5/6, seca) e bruno-amarelado-escuro (10YR 4/6, úmida); muito argilosa; moderada pequena grumosa e granular e moderada média blocos subangulares; ligeiramente dura, friável, plástica e pegajosa; transição descontínua e abrupta.
- C1 5-10 cm (0-15 cm), amarelo (10YR 7/8, seca) e amarelo-brunado (10YR 6/8, úmida); muito argilosa; forte média e grande blocos angulares e moderada média blocos subangulares ; muito dura a extremamente dura, firme, plástica e pegajosa; transição ondulada e abrupta.
- 2Cc 10-90 cm+, vermelho (2,5YR 5/8, úmida); muito argilosa cascalhenta; moderada pequena e moderada pequena blocos subangulares; muito pequena granular; ligeiramente dura, friável, plástica e pegajosa.

RAÍZES- Comuns finas e médias nas camadas no horizonte A e camada C; poucas finas em 2Cc. As raízes frequentemente se desenvolvem horizontalmente na transição da camada C para 2Cc.

OBSERVAÇÕES: A trincheira do PL09_7 foi aberta em uma área cuja superfície abrangia o limite da copa das árvores de um agrupamento vegetal, com parte da superfície do solo coberta por uma camada de liteira e parte exposta, sem cobertura vegetal ou liteira. Isso foi feito com o objetivo de caracterizar a influência destas duas condições sobre as características do *topsoil*.

- Clareiras com solo exposto intercaladas à vegetação plantada e em desenvolvimento; várias árvores mortas ao redor.
- Biopedoturbação comum no horizonte A;
- C Compactado com blocos massivos em seu interior, rompendo-se em planos angulares.
- Topo da camada 2Cc com selamento e compactação.
- Nódulos ferruginosos frequentes (40% do volume), pequenos e grandes e poucos calhaus e matacões; duros de irregulares, vermelhos em 2Cc.

ÁREA COM 9 ANOS

PERFIL 4 – PL09_9

DESCRIÇÃO MORFOLÓGICA)

- A 0-3 cm, Bruno-amarelado-escuro (10YR 4/4, úmida) e Bruno-amarelado (10YR 5/4, seca); muito argilosa; forte grande a pequena grumosa; ligeiramente dura, friável, plástica e pegajosa; transição plana abrupta.
- C/A 3-8 cm, bruno-amarelado (10YR 5/6, seca) bruno- amarelo- escuro (10YR 4/6, úmida); muito argilosa; fraca muito pequena blocos subangulares e moderada muito pequena granular; ligeiramente dura, friável, plástica e pegajosa; transição plana abrupta.

- C1 8-22 cm, estriado- bruno amarelado (10YR 5/4 úmida), mosqueados vermelho (2,5YR 4/8, úmida); muito argilosa; forte muito grande blocos angulares e moderada muito pequena granular; dura a muito dura, firme a friável; plástica e pegajosa; transição plana abrupta.
- 2C2 22-80 cm, vermelho (2,5YR 5/6, úmida), mosqueado abundante, pequeno, proeminente, estriado bruno amarelado (10YR 5/4 úmida); muito argilosa; forte muito grandes blocos angulares; dura, firme, plástica e pegajosa; transição plana clara.
- 2C3 80 - 88 cm, vermelho (2,5YR 5/6, úmida); muito argilosa; maciça de rompendo em moderada média laminar; dura a muito dura, firme; plástica e pegajosa; transição plana abrupta.
- 2C4 88 - 100 cm+, vermelho (2,5YR 5/6, úmida), mosqueado abundante, pequeno, proeminente estriado bruno amarelado (10YR 5/6 úmida); maciça se rompendo em moderada média laminar; dura a muito dura, firme; plástica e pegajosa.

RAÍZES – Poucas muito finas e algumas medias, orientadas horizontalmente, na A; abundantes muito finas em C/A; comuns finas concentrada em canais, pedotubulos e fissuras do solo se desenvolvendo preferencialmente entre os blocos em C1; tendência horizontal entre C1 e 2C2 e poucas finas em 2C2.

OBSERVAÇÕES -- Área com plantas regenerantes e muitos formigueiros e cupenzeiros habitados e abandonados. Muitos indivíduos de Angico (*Anadenanthera colubrina*), Muravuvuia (*Croton matourensis*) e Pata-de-Vaca (*Bauhinia forficata*).

- Solo com pouca deposição de serapilheira e chegando a ser exposto em algumas áreas.

– Em C1 compactado, a atividade biológica assim como as estruturas granulares derivada e raízes finas se encontram em finas fendas verticais que atravessam o perfil e avançam em profundidade até o topo de 2C3. Estas fendas verticais separam volumes de solos e exibem periodicidade nas paredes da trincheira, espaçadas de 60 a 80 cm umas das outras.

-Durante a descrição da consistência em 2C3, o solo estava muito seco não absorvia bem a água mesmo com o molhamento.

-Camada 2C3 com selamento no topo.

- A partir de C1 as camadas tinham aspecto maciço, porém rompendo-se em blocos angulares sobre esforço em C1 e 2C2 e laminar em 2C3 e 2C4, sendo assim descritas as estruturas. Em C1 alguns blocos se desfaziam em granular.

- Mosqueados em 2C2 e 2C4 correspondem a volumes de solos de procedência distinta da matriz dominante. Pequenos, abundantes e proeminentes, 30% do volume do solo.

- Nódulos muito poucos (< 5%) duros, irregulares e vermelho argilo-ferruginosos a partir de 2C2.

- Na camada 2C3 era uma camada maciça muito dura que se separava na picareta em blocos alongados de 20 de comprimento x 15 cm altura). A camada era bem compacta e as rompia-se em lâminas que não se individualizavam facilmente, por isso seu grau de desenvolvimento foi identificado como moderado.

- Solo compactado até 100 cm de profundidade.

REGENERAÇÃO NATURAL INTALADA EM 2009

ÁREA COM 7 ANOS

PERFIL 1 - RN09_7

DESCRIÇÃO MORFOLÓGICA

- A 0-5 cm, bruno-amarelado-escuro (10YR 4/4, úmida) e bruno-amarelado (10YR 5/6, seca); muito argilosa; moderada pequena grumosa e moderada muito pequena granular; macia, friável, plástica e pegajosa; transição plana e abrupta.
- CA 5-25 (20-30) cm, amarelo-brunado (10YR 6/8, úmida) e amarelo (10YR 7/8, seca); muito argilosa; moderada pequena blocos subangulares e moderada pequena granular; dura, firme, plástica e pegajosa, transição ondulada e abrupta.
- 2Cc 25-130 cm+, vermelho (2,5 YR 4/6, úmida); muito argilosa; moderada pequena granular e moderada pequeno e bloco subangulares; ligeiramente dura, friável, plástica e pegajosa.

RAÍZES- Comuns finas no horizonte A , poucas camadas CAe raras muito finas em 2Cc.

OBSERVAÇÕES- Bosques com predomínio de Muravuvuia (*Crotom matourensis.*); as copas das árvores se coalescem e proporcionam grande cobertura de material vegetal depositado no solo. Clareira com Muravuvuia morta próxima ao local de abertura da trincheira.

- Camada O -5-0 cm, composta de folhas e gravetos em vários estágios de decomposição, não coletada.

Muitos poros pequenos e médios e poucos grandes e muito grandes em A e comuns pequenos e médios em CA;

- Intense atividade biológica no horizonte A e comum em CA

- Camada CA com hifas fúngicas, pouca bioturbação e nódulos poucos pequenos duros vermelhos ferruginosos.

- Nódulos poucos (10%) e CA e muito frequentes (60%), pequenos e grandes, duros, vermelhos ferruginosos da camada 2Cc.

ÁREA COM 9 ANOS

PERFIL 4 - RN09_9

DESCRIÇÃO MORFOLÓGICA (RN09_9)

- A 0-3 cm, bruno-amarelado (10YR 5/6, úmida); muito argilosa; moderada pequena granular e (10YR 3/2 úmida) forte média grumosa; friável, plástica e pegajosa; transição plana abrupta.

CA 3-22 cm, bruno- amarelado (10YR 5/4, úmida); muito argilosa; moderada pequena blocos subangulares, moderada pequena granular; firme à friável, plástica e pegajosa transição ondulada abrupta.

2Cc 22- 100 cm+; vermelha (3YR 4/8, úmida); fraca a moderada muito pequena granular; firme, friável, plástica e pegajosa.

RAÍZES – Comuns finas e muito finas e uma muito grossa em A, com tendência de desenvolvimento horizontal no contato entre os horizontes A e CA; comuns médias e uma grossa em CA e finas e poucas em 2Cc.

OBSERVAÇÕES – Parcela de regeneração natural com muravuvuia (*Croton matourensis*) caídas e rebrotando, com solo mais exposto se comparado com a parcela ao lado com o dossel mais fechado sem morte de muravuvuia.

Camada O (3-0 cm) constituída de folhas, galhos e gravetos em decomposição.

- No CA há algumas unidades de estrutura artificial forte blocos subangulares, muito firmes.

- Nódulos muito frequentes (60%), pequenos e grandes, duros, vermelhos ferruginosos da camada 2Cc.

- Conglomerados concrecionários fragmentário, composto de calhau duros, arredondados e vermelhos ($\pm 80\%$ do volume) na parede esquerda da trincheira em 2Cc dominante

- 2Cc com volume de solo distinto (amarelo- avermelhado 7,5YR 5/6 e bruno- amarelo-escuro 10YR 4/6, úmida) medindo 40 x 20 cm; forte muito pequenos blocos subangulares adensados firme.

ÁREAS IMPLANTADAS EM 2014

PLANTIO DE MUDAS INSTALADO EM 2014

ÁREA COM 2 ANOS

PERFIL2 - PL14_2

DESCRIÇÃO MORFOLÓGICA

C1 0-12 cm, bruno-amarelado (10YR 5/6, úmida) e amarelo (10 YR 7/6, seca); muito argilosa; moderada média grumosa e moderada pequena a média granular; ligeiramente dura, friável, plástica e pegajosa; transição plana abrupta.

2Cc 12-40 (30-50) cm, vermelho-amarelado (5YR 5/8, úmida); muito argilosa; moderada pequena a média blocos subangulares e muito pequena granular; ligeiramente dura, friável, plástica e pegajosa; transição ondulada abrupta.

2C2 40-130 cm; amarelo-avermelhado (5YR 7/8, úmida); muito argilosa; moderada muito pequena blocos subangulares e composta de moderada muito pequena granular; ligeiramente dura, friável, plástica e pegajosa; transição descontínua abrupta.

2Cc2 130-150 cm+, vermelho (2,5YR 5/6, úmida), bruno-amarelado (10YR 5/6, úmida) de mosqueados; muito argilosa; moderada muito pequena blocos subangulares e moderada muito pequena granular; ligeiramente dura, firme, plástica e pegajosa.

RAÍZES- Muitas médias na camada C1, tendência de desenvolvimento horizontal no contato com C2; comuns finas em C2; raras finas em C3.

OBSERVAÇÕES-- Camada C1 com poucos pedotúbulos recentes e pouca atividade biológica de formigas, minhocas, cupins, diplópode. Maioria da estrutura é herdada, ou deformada.

Cc1 com nódulos frequentes (20%), grandes (2-5 cm), duros irregulares, vermelhos, argilo-ferruginosos.

- Cc2 com nódulos, poucos (10%), grandes (2-5 cm), duros irregulares, vermelhos, argilo-ferruginosos.

ÁREA COM 4 ANOS

PERFIL 4 - PL14_4

DESCRIÇÃO MORFOLÓGICA

- A/C 0-10 cm, bruno (10YR 4/3, úmida) e bruno- amarelado (10YR 5/4, seco); muito argilosa; moderada grande blocos subangulares e forte grande grumosa; friável, plástica e pegajosa; transição plana abrupta.
- C/A 10-30cm, bruno- amarelado- escuro (10YR 4/6, úmida); muito argilosa muito cascalhenta; forte grandes blocos subangulares, forte pequena granular e forte grande grumosa; firme, friável, plástica e pegajosa; transição plana abrupta.
- 2Cc 30-100+ cm, vermelho (3YR 4/8, úmida); muito argilosa; moderada pequena blocos subangulares composta de moderada pequena à muito pequena granular; firme, friável, plástica e pegajosa.

RAÍZES – Raízes do pivotante do paricá muito grossa em A/C e C/A, diminuindo drasticamente seu diâmetro e comprimento a partir do topo do 2C, ficando tortuosa. Em C/A - comuns muitas finas; C2 poucas, finas e médias com tendência horizontal associadas à matéria orgânica.

OBSERVAÇÕES – Camada AC com restos de troncos e muita atividade biológica e estruturas biogênicas (10 YR 3/3, úmida);

-C/A com galhos e tocos em decomposição, canais, pedotubulos, atividade de cupins e minhocas. Estruturas biogênicas localizadas em sítios próximos aos galhos em decomposição. Blocos densos grandes artificiais, sendo que alguns eram parcialmente alterados pela atividade da fauna de invertebrados do solo. Estes blocos apresentam alguns mosqueados ferruginosos bem como de redução em seu interior.

Mosqueados ferruginosos distintos (5YR 4/6 e 3YR 4/8, úmida) na superfície de alguns blocos e na parede de canais na macrofauna e difuso de redução no interior de alguns blocos massivos.

-2Cc com nódulos, muito frequentes (60%), grandes (2-5 cm), duros irregulares, vermelhos, argilo-ferruginosos.

REGENERAÇÃO NATURAL INSTALADA EM 2014

ÁREA COM 2 ANOS

PERFIL 1 - RN14_2

DESCRIÇÃO MORFOLÓGICA

- C1 0-5 cm, amarelo-brunado (10YR 6/8, úmida), e amarelo (10YR 7/8, seca); muito argilosa; moderada pequena granular e moderada muito pequena blocos subangulares; ligeiramente dura, friável, plástica e pegajosa; transição plana e abrupta.
- C2 5-15 cm, bruno-amarelado (10YR 5/8, úmida) e amarelo-brunado (10YR 6/8, seca); muito argilosa; moderada pequena granular e moderada muito pequena blocos subangulares; ligeiramente dura, friável, plástica e pegajosa; transição plana e abrupta.
- C3 15-26 cm, amarelo-brunado (10YR 6/8, úmida); muito argilosa; moderada pequena granular e moderada pequena blocos subangulares; friável, ligeiramente dura, friável, plástica e pegajosa; transição plana e abrupta.
- 2C4 26-45 (35-53) cm, amarelo-avermelhado (5YR 6/8, seca); muito argilosa; fraca pequena granular e moderada pequena blocos subangulares; macia, friável, plástica e pegajosa; transição ondulada e abrupta.
- 2C5 45-83 cm+, vermelho-amarelado (5 YR 5/8, seca) muito argilosa; fraca muito pequena granular; macia, muito friável, plástica e pegajosa.

RAÍZES- Poucas finas nas camadas no, C1, C2 e C3; raras finas no 2C4 e 2C5

OBSERVAÇÕES- Área com pouca cobertura vegetal, presença de gramíneas.

- As camadas C1 e C2 apresentam pouca e incipiente atividade biológica e pedoturbação localizada.

- Camadas 2C4 e 2C5 com, respectivamente, poucos (15%) e muito poucos (5%) nódulos grandes (2-5 cm), duros irregulares, vermelhos, argilo-ferruginosos.

ÁREA COM 4 ANOS

PERFIL 4 - RN14_4

DESCRIÇÃO MORFOLÓGICA

- A/C 0-4 cm, bruno- amarelado- escuro (10YR 4/4, úmida); muito argilosa; moderada pequeno blocos subangulares, forte pequena granular e forte grande à média grumosa; ligeiramente dura, friável, plástica e pegajosa; transição plana clara.
- C/A 4-22 cm, bruno- amarelado- escuro (10YR 4/4, úmida); muito argilosa muito cascalhenta; moderada pequena blocos subangulares e forte pequena granular; ligeiramente dura, friável, plástica e pegajosa; transição plana abrupta.

- 2C1 22-100 cm+, vermelho (3YR 4/8, úmida); muito argilosa; moderada muito grande blocos subangulares e moderada pequena granular; muito dura, firme à muito firme, plástica e pegajosa, transição quebrada e abrupta para 2C2.
- 2C2 22-100 cm+, vermelho (3YR 4/8, úmida); muito argilosa; moderada grande blocos subangulares composta de moderada pequena à muito pequena granular; ligeiramente dura, friável, plástica e pegajosa.

RAÍZES – Raiz pivotante da muravuvuia (*Croton matourensis*) se desenvolvei verticalmente em sítio com estrutura granular muito friável. Ao lado desta seção encontravam-se blocos mais densos, mas que se desfaziam em granular.

OBSERVAÇÕES – Camada O (3-0 cm) composta por folhas, galhos e gravetos em decomposição.

- Horizonte A/C com pedalidade desenvolvida, biogênica e contemporânea (forte grumosa) que C/A e ambos conservam alguns blocos angulares grades e massivos ou com tendência laminar, formados artificialmente por ocasião do transporte e deposição do material para o preparo da área. O horizonte C/A apresou sítios escurecidos, com estrutura granular, de origem biogênica, localizados próximo a resíduos vegetais em decomposição. Essa matriz era distinta dos blocos mais adensados e de outras estruturas granulares com valor Munsell mais elevado. 2C1 ocorre verticalmente, entre 2C2.

NUCLEAÇÃO INSTALADA EM 2014

ÁREA COM 2 ANOS

PERFIL1 – N14_2

Área descoberta, com ondulações e pouca vegetação local de até 1m aproximadamente

DESCRIÇÃO MORFOLÓGICA

- C1 0-03 cm, amarelo-brunado (10YR 6/8, úmida) e amarelo (10YR 7/8, seca); muito argilosa; forte muito pequena blocos angulares; solta, solta, plástica e pegajosa; transição plana e abrupta.
- C2 03-10 cm, amarelo-brunado (10YR 6/8, úmida) e amarelo (10YR 7/8, seca); muito argilosa; fraca pequena e blocos subangulares e angulares; dura, firme, plástica e pegajosa; transição plana e abrupta.
- 2Cc1 10-21 cm, e vermelho-amarelado (5YR 5/8, úmida); muito argilosa cascalthenta; moderada pequena granular; moderada pequena laminar; ligeiramente dura, firme, plástica e pegajosa; transição plana e abrupta.
- 2Cc2 21-45 cm, vermelho (2,5YR 5/8, úmida); muito argilosa; moderada pequena laminar; muito dura, firme, plástica e pegajosa; transição plana e abrupta.
- 3C3 45-90 cm+, vermelho (3YR 4/8, úmida); muito argilosa pouco cascalthenta; moderada pequena laminar e moderada muito pequena granular; dura a ligeiramente dura, firme a friável, plástica e pegajosa.

RAÍZES- Poucas finas nas camadas C1, C2, 2Cc1 e 2Cc2

OBSERVAÇÕES-

- Camada C1 com torrões pequenos que ocorrem devido ao umedecimento e secagem, com conseqüentemente fragmentações formando blocos angulares soltos.
- Camada de selamento superficial fina no topo de C2 e 2Cc1
- Camada 2Cc1 com mosqueados poucos (2 %); pequenos; distintos; vermelho-amarelado (10YR 5/8). Estes mosqueados são decorrentes da mistura de materiais.
- Nódulos muito frequentes (40 %) em 2Cc1 e poucos (15%) em 2Cc2, irregular, duro, vermelho.
- 2Cc2 com mosqueados comuns (20%); médio; distintos; amarelos amarelo-brunado (10YR 6/8) decorrentes da mistura de volumes de solos que são, em condições naturais, provenientes de camadas distintas.

ÁREA COM 4 ANOS**PERFIL 4 - N14_4****DESCRIÇÃO MORFOLÓGICA**

- C1 22- 0 cm, amarelo- avermelhado (7,5YR 6/8, úmida); muito argilosa; moderada pequena blocos subangulares e moderada pequena a muito pequena granular; ligeiramente dura, friável, plástica pegajosa; transição descontínua e abrupta.
- A/C 0- 25 (5- 65) cm, bruno-amarelado-escuro (10YR 4/4, úmida); muito argilosa; forte grande grumosa, composta forte pequena granular; dura, firme, plástica pegajosa; transição descontínua abrupta.
- C/A 0-25 cm (20- 40 cm); bruno-amarelado-escuro (10YR 4/4, úmida); muito argilosa; moderada pequena a média blocos subangulares; forte grande grumosa, forte pequena a média granular dura, firme, plástica pegajosa; transição ondulada abrupta.
- 2Cc 25-125 cm+, (3YR 3/8, úmida); muito argilosa; moderada pequena blocos subangulares entremeados entre calhau, composta de moderada, muito pequena e pequena granular; dura, firme, plástica pegajosa.

RAÍZES- Mais associadas a material em decomposição próxima aos tocos, muito finas

OBSERVAÇÕES –As espécies que predomina no estrato superior é a *Cepropia sp.*

- O perfil da área de nucleação foi aberto de forma que abrangesse o monte de *topsoil* e o solo abaixo do monte de galhada, que são espalhados intercaladamente na área. Dessa forma, procurou-se caracterizar o solo nessa condição.

- Camada O (~10-0 cm) constituída da pilha de galhos. Atividade biológica intensa de cupins e formigas sobre A.

- Horizonte A/C contemporâneo se formou devido á intensa atividade biológica abaixo das pilhas de galhos. Neste ambiente o material dos montes de *topsoil* adjacentes desmoronam e se entremeiam nos espaços entre a galhada que se decompõe e vai sendo incorporada paulatinamente ao solo.

- Foi notado o desenvolvimento da estrutura no horizonte superficial, nesta condição, porém grande parte da superfície da área de N14_4 apresenta solo descoberto sem evolução de pedalidade.
- Nódulos muito frequentes (60%), pequenos a grandes, duros, vermelhos ferruginosos da camada 2Cc.