



**MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO  
UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DA AMAZÔNIA  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIAS FLORESTAIS**

**ALBERTO BENTES BRASIL NETO**

**EFEITOS DA RESTAURAÇÃO FLORESTAL SOBRE OS ATRIBUTOS DO  
SOLO E DA VEGETAÇÃO APÓS A MINERAÇÃO DE BAUXITA EM  
PARAGOMINAS, PARÁ**

**BELÉM**

**2017**

**ALBERTO BENTES BRASIL NETO**

**EFEITOS DA RESTAURAÇÃO FLORESTAL SOBRE OS ATRIBUTOS DO  
SOLO E DA VEGETAÇÃO APÓS A MINERAÇÃO DE BAUXITA EM  
PARAGOMINAS, PARÁ**

Dissertação apresentada à Universidade Federal Rural da Amazônia, como parte das exigências do Curso de Mestrado em Ciências Florestais para obtenção do título de Mestre.

Orientador: Dr. Gustavo Schwartz

Co-orientador: Norberto Cornejo Noronha;  
Marcos André Piedade Gama

**BELÉM**

**2017**

---

Brasil Neto, Alberto Bentes

Efeitos da restauração florestal sobre os atributos do solo e da vegetação após a mineração de bauxita em Paragominas, Pará/  
Alberto Bentes Brasil Neto. – Belém, PA, 2017.

81 f.

Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais – Manejo de Ecossistemas Florestais) – Universidade Federal Rural da Amazônia.

Orientador: Gustavo Schwartz.

1. Restauração Florestal. 2. Mineração de Bauxita 3. Restauração – Áreas Mineradas. 4. Regeneração Natural - Floresta. 5. Atributos físicos e químicos do solo I. Schwartz, Gustavo, (orient.) II. Título

CDD – 634.956

---

ALBERTO BENTES BRASIL NETO

**Efeitos da restauração florestal sobre os atributos do solo e da vegetação após a mineração de bauxita em Paragominas, Pará**

Dissertação de mestrado apresentada a Universidade Federal Rural da Amazônia como parte dos requisitos para obtenção do título de mestre em Ciências Florestais.

Data de Aprovação:

Banca Examinadora:

---

Dr. Gustavo Schwartz - Orientador  
Embrapa Amazônia Oriental

---

Dr. Rafael de Paiva Salomão – 1º Examinador  
Museu Paraense Emílio Goeldi

---

Dra. Sônia Maria Schaefer Jordão – 2º Examinador  
Embrapa Amazônia Oriental

---

Dr. Eduardo Jorge Maklouf Carvalho – 3º Examinador  
Universidade Federal Rural da Amazônia

## AGRADECIMENTOS

A Deus pelo dom da vida e tantas graças alcançadas.

À Virgem Maria, por contar sempre com sua intercessão e acolhida maternal.

À minha querida UFRA e ao Programa de Pós Graduação em Ciências Florestais e seus professores pelo aprendizado.

À Embrapa Amazônia Oriental, pela parceria na realização deste trabalho.

À minha família: meus pais Enilson Rabelo e Terezinha Brasil, pela educação, amor e carinho que sempre tive; minha irmã Giselle Cristina Brasil; meus avós, tios e primos.

Ao orientador, Dr. Gustavo Schwartz, por todo apoio, liberdade, paciência, valiosíssimos conselhos e sua competente orientação.

Ao co-orientador, professor Norberto Cornejo Noronha, pela amizade, conselhos valiosos e sua competente orientação.

Ao co-orientador, professor Marcos André Piedade Gama, pelas oportunidades, seus conselhos, sempre muito valiosos, e todo o suporte para execução deste trabalho.

À Mineração Paragominas S.A e a todo grupo Hydro pela concessão da área de estudo e financiamento para execução deste trabalho. De forma especial, agradeço à gerência de Meio Ambiente por todo suporte logístico e a solicitude dos seus funcionários.

Ao projeto Biodiversidade e solos, parceria da UFRA, MPEG e Hydro, pela oportunidade de realização deste trabalho. Em especial agradeço aos coordenadores e membros dos subprojetos solos e flora, que não mediram esforços para colaborar no que fosse necessário para realização deste trabalho: Prof. Gracialda Ferreira; Dra. Lourdes Ruivo; Prof. Selma Ohachi; Prof. Dêmora Araújo; Prof. Telma Batista; Rodrigo Barbosa; Sabrina; Denes; Márcio; Joyce; Raimundo Goulart; José Marques e Luan Cardoso.

Ao amor da minha vida, Aline Nascimento Braga, pelo companheirismo, amizade, ensinamentos e conselhos.

Ao meu amigo Cássio Rafael pela amizade e pelo grande apoio na realização deste trabalho.

À minha amiga Arllen Élide pela sua amizade e conselhos.

A todos os colegas do subprojeto solos que foram fundamentais na coleta e análises laboratoriais: Suany Couto; Riquelly Souza; Natally Said; Lorena; Yorrana; Isabelly; Marina; Victória; Marcus; Luana; Roberta; Diego; Alessandro e Riquelly.

Aos colegas do PPGCF e outras pessoas aqui não citadas que, de forma não menos importante, contribuíram direta e indiretamente na realização deste trabalho.

Ao meu Deus Amado e meus  
queridos pais: Enilson Sérgio e  
Terezinha Brasil.

Dedico.

## SUMÁRIO

RESUMO .....	9
ABSTRACT .....	10
CONTEXTUALIZAÇÃO .....	11
REFERÊNCIAS .....	15
<b>Capítulo 1:</b> Regeneração natural para restauração de áreas mineradas após a lavra de bauxita: um estudo de caso em Paragominas, Amazônia.....	17
RESUMO .....	17
INTRODUÇÃO.....	17
MATERIAIS E MÉTODOS.....	20
Área de estudo .....	20
Quantificação da matriz florestal e manchas predominantes na escala de paisagem .	21
Áreas de estudo .....	22
Delineamento para a amostragem da vegetação e solo.....	23
Variáveis analisadas.....	24
RESULTADOS .....	25
a) Matriz de dominância da vegetação.....	25
b) Vegetação .....	26
c) Atributos do solo.....	30
d) Relações entre vegetação e solo .....	34
DISCUSSÃO .....	40
a) Matriz de dominância da vegetação.....	40
b) Vegetação .....	40
c) Atributos do solo.....	42
d) Relações entre vegetação e solo .....	43
CONCLUSÕES .....	44
REFERÊNCIAS .....	45
<b>Capítulo 2:</b> Plantio de mudas e procedimentos operacionais para restauração de áreas mineradas após a lavra de bauxita: um estudo de caso em Paragominas, Amazônia.....	49
RESUMO .....	49
INTRODUÇÃO.....	49
MATERIAIS E MÉTODOS.....	52
Área de estudo .....	52

Áreas de estudo .....	53
Delineamento amostral do solo e da vegetação .....	55
Variáveis analisadas.....	56
RESULTADOS .....	58
DISCUSSÃO .....	72
CONCLUSÃO.....	76
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	76
CONCLUSÕES GERAIS .....	78
APÊNDICE 1 .....	79



## RESUMO

O presente estudo teve como objetivo avaliar o efeito da restauração florestal sobre os atributos do solo e da vegetação em áreas mineradas após a lavra de bauxita em áreas sobre dois métodos de restauração: Indução da Regeneração Natural e Plantio de mudas, em áreas com dois e sete anos sob ambos os métodos. Para tanto, avaliou-se: (I) quantificação das matrizes que circundam as áreas estudadas, numa escala de paisagem, na área sobre Regeneração Natural;(II) riqueza e diversidade da vegetação em três estratos: superior, médio e inferior e (III) atributos físicos e químicos do solo nas áreas de estudo sob os métodos de plantio e regeneração natural. O estudo foi realizado em uma área de atividade mineraria pertencente a Mineração Paragominas S.A., localizada no município de Paragominas, Sudeste do estado do Pará. Nas áreas de regeneração natural, mesmo numa paisagem de entorno predominantemente florestal, a baixa diversidade e a alta dominância de indivíduos regenerantes levam ao desaparecimento repentino e abrupto dos componentes arbóreos durante a fase de transição sucessional, ocasionando a exposição do solo à colonização por espécies pioneiras ou herbáceas, como gramíneas. O sistema de regeneração natural aos sete anos foi altamente eficiente na recuperação de importantes atributos relacionados à qualidade do solo em superfície. No estrato superior, o plantio de mudas com sete anos foi eficiente na formação de uma comunidade florestal próxima a uma floresta de referência no que se refere a diversidade e equabilidade. Porém a falta de um critério na distribuição das mudas em campo e a operação de capina para controle de indivíduos regenerantes nos cinco primeiros anos afetou não somente a formação de uma fisionomia florestal, como também permitiu a ocorrência de grandes áreas com solo exposto, resultando em substrato com sérias limitações físicas e estruturais no sistema de plantio com sete anos.

**Palavras-Chave:** Sucessão Ecológica; mineração de bauxita; dinâmicas de transição; restauração florestal; atributos físicos e químicos do solo.

## ABSTRACT

The present study aimed to evaluate the effect of forest restoration on soil and vegetation attributes in mined areas after bauxite mining in areas on two restoration methods: Induction of Natural Regeneration and Planting of seedlings in areas with two and Seven years under both methods. In order to do so, we evaluated: (i) quantification of the matrices that surround the studied areas, on a landscape scale, in the Natural Regeneration area; (ii) vegetation richness and diversity in three strata: upper, middle and lower and ) Physical and chemical attributes of the soil in the study areas under the methods of planting and natural regeneration. The study was carried out in an area of mining activity belonging to Mineração Paragominas SA, located in the municipality of Paragominas, Southeastern state of Pará. In the areas of natural regeneration, even in a predominantly forested landscape, the low diversity and the high dominance of Regenerating individuals lead to sudden and abrupt disappearance of tree components during the successional transition phase, causing soil exposure to colonization by pioneer or herbaceous species, such as grasses. The natural regeneration system at seven years was highly efficient in recovering important attributes related to surface soil quality. In the upper stratum, planting of seven-year-old seedlings was efficient in the formation of a forest community close to a reference forest in terms of diversity and equability. However, the lack of a criterion in the distribution of seedlings in the field and the weeding operation to control regenerating individuals in the first five years affected not only the formation of a forest physiognomy, but also allowed the occurrence of large areas with exposed soil, resulting in Substrate with serious physical and structural limitations in the seven-year planting system.

**Keywords:** Ecological Succession; Bauxite mining; Transition dynamics; Forest restoration; Physical and chemical attributes of the soil.

## CONTEXTUALIZAÇÃO

O Brasil é um país de destaque no cenário mundial em reservas e produção mineral. Em 2014 a produção mineral atingiu o valor de US\$ 40 bilhões, equivalente a 5% do PIB industrial Brasileiro (IBRAM, 2015). O Pará é um dos estados que mais contribui para o desenvolvimento do setor mineral brasileiro, sendo a mineração de bauxita um dos grandes destaques, com cerca de 32,45 milhões de toneladas extraídas no ano de 2016 (DNPN, 2017), o que representou mais de 80% da produção nacional.

No entanto, a atividade minerária envolve a supressão da cobertura florestal, através de corte raso da vegetação e total remoção da camada de solo, promovendo a destruição completa dos ecossistemas naturais, podendo ser considerada como um extremo da degradação antrópica (HÜTTL e WEBER, 2001; SALOMÃO, 2015). Desse modo, a restauração ecológica dos ecossistemas torna-se fundamental. Além disso, tais ecossistemas devem possuir resiliência suficiente para resistir a condições naturais de estresse e interagir com os demais ecossistemas, por meio de fluxos bióticos e abióticos (MARTINS, 2015; SALOMÃO, 2015).

Nesse sentido, o processo de reconstrução da funcionalidade dos ecossistemas alterados está associado à recuperação das propriedades físicas e químicas do solo, haja vista que o solo é o gerenciador de diversos processos associados a restauração ecológica. Como consequência da melhoria do solo, ocorre um aumento da biodiversidade do ecossistema por meio do restabelecimento da estrutura e composição de espécies arbóreas nativas e da fauna, e do funcionamento e manutenção dos processos e serviços ecossistêmicos (CHAZDON e GUARIGUATA, 2016). Para tanto, tem-se adotado diversos métodos de restauração florestal, como a indução da regeneração natural e o plantio de mudas de diversas espécies nativas no solo em construção após a mineração.

A regeneração natural se dá por meio da sucessão natural de espécies arbóreas e depende fundamentalmente da resiliência do local a ser restaurado e também do nível de degradação da paisagem (PICKETT et al., 2001). Tal situação está vinculada ao fato de a flora regenerante depender fundamentalmente da expressão do banco de sementes, da rebrota de estruturas vegetativas de plantas e da presença de propágulos oriundos de remanescentes florestais adjacentes (VALE et al., 2015; CÉSAR et al, 2016).

Quando o nível de degradação local e da paisagem é muito alto, o aproveitamento inicial da regeneração natural é comprometido pela baixa resiliência e a pouca ou nenhuma adição de propágulos na área (VALE et al., 2015; CÉSAR et al., 2016). Logo, a implantação de uma comunidade vegetal nativa torna-se uma importante alternativa de restauração. A área degradada é colonizada novamente por meio da fauna e flora e as funções e processos naturais são reestabelecidos. Normalmente este reflorestamento é feito por meio de semeadura direta ou plantio de mudas e tem como característica a possibilidade de escolha das espécies que serão introduzidas e da distribuição espacial dos grupos de plantio, podendo, com isso, obter maior controle sobre a composição e estrutura da vegetação a ser estabelecida (SALOMÃO, 2015).

No entanto, a escolha do método não é suficiente para restaurar uma área degradada, haja vista que o sucesso do projeto de restauração depende fundamentalmente da implantação adequada de procedimentos operacionais que efetivem o método adotado (BRANCALION et al., 2015). Estes procedimentos implicam diretamente na eficiência ecológica da restauração, bem como nos custos do projeto. Portanto, os procedimentos operacionais como: a) conformação do estéril na paisagem e construção do solo após a lavra do minério, b) preparo e adubação do solo para o plantio de mudas, c) controle de plantas competidoras, d) controle de formigas cortadeiras, e e) manutenção das áreas sob restauração, tornam-se fundamentais para o sucesso ou fracasso do projeto de restauração.

O processo de restauração ecológica é composto de diferentes fases que variam conforme o nível de degradação, condições ambientais e processos ecológicos (OLIVER e LARSON, 1996). Existem períodos específicos que podem demandar intervenções para garantir seu progresso (PICKETT et al., 2009), haja vista que as comunidades estabelecidas são transitórias e serão substituídas no decorrer do tempo. Brancalion et al. (2015) discorrem sobre três fases no processo de restauração de uma floresta tropical: (1) Fase de estruturação; (2) Fase de consolidação e (3) fase de maturação.

Segundo estes autores, na fase de estruturação deve ser estabelecida nos primeiros anos a formação de um dossel dominado por espécies pioneiras. A fase da consolidação varia desde a senescência destas espécies até a criação de um novo dossel formado por espécies secundárias iniciais. Quando um novo dossel é formado por espécies secundárias iniciais na fase de consolidação, tem-se o início da fase de maturação. Nesta fase, ocorrem

espécies que garantem a formação de uma floresta com maior sustentação e maturidade, tendo como característica o aumento da complexidade de interações ecológicas.

A transição da fase de estruturação para a de consolidação requer atenção, visto que a fase de consolidação pode não se efetivar se houver uma dominância de poucas espécies pioneiras ou a ocorrência de condições que não permitam a substituição da comunidade. Caso os processos de substituição não ocorram de maneira adequada, as áreas sob restauração podem ser novamente abertas e ocupadas por gramíneas exóticas agressivas ou então regresse à fase de estruturação, com a germinação de novas pioneiras (WALKER e MORAL, 2008).

Neste contexto, é possível constatar que os processos ecológicos não se perpetuam sem biodiversidade suficiente para garantir a sustentação e manutenção do ecossistema sob restauração. Neste sentido, poderá haver um retrocesso ou estagnação da trajetória do ecossistema no decorrer do tempo (BRANCALION et al., 2015), independentemente do método de restauração adotado.

Deste modo, é fundamental a constante avaliação dos métodos e procedimentos adotados na restauração, visando aperfeiçoar o que está sendo feito e corrigir erros, de tal modo que a restauração possa ser cada vez mais precisa, com menores custos e possa se sustentar em menor intervalo de tempo. A compreensão do efeito de métodos e procedimentos operacionais pode ser obtida por meio da investigação dos atributos físicos e químicos do solo e da vegetação estabelecida (WALKER e REDDELL, 2007).

O solo recém reconstruído apresenta atributos completamente alterados e degradados devido a: a) processos erosivos, b) perda de matéria orgânica, nutrientes e c) mudanças na estrutura, porosidade e permeabilidade do solo. Isto leva à redução da capacidade do solo em sustentar processos ecossistêmicos e seres vivos nos locais recém minerados.

Além da recuperação dos atributos do solo, o sucesso da restauração de áreas mineradas está diretamente associada ao restabelecimento dos componentes arbóreos (SALOMÃO et al., 2007). A criação de habitats, dinâmicas e processos relativos à biodiversidade da fauna e da flora estão estritamente relacionados à presença, manutenção e sustentação de uma comunidade florestal de alta complexidade e biodiversidade.

Assim, a análise dos atributos do solo integrados ao estudo da vegetação arbórea estabelecida é fundamental para a compreensão dos processos de recuperação de áreas degradadas como: a) condições edáficas para crescimento e desenvolvimento radicular de plantas; b) agregação e aumento da porosidade do solo; e c) disponibilidade de ar, água e nutrientes (FROUZ et al., 2013), fornecendo importantes subsídios para: a) conhecer o nível de alteração dos ecossistemas e b) direcionar práticas de manejo dentro do procedimento de restauração.

No sudeste do estado do Pará se encontra a terceira maior mina de bauxita do mundo, com capacidade de produção média de 9,9 milhões de toneladas do minério por ano. Além desta produção, a empresa planeja ampliar a produção anual para 14,8 milhões de toneladas nos próximos anos (HYDRO, 2015). As primeiras experiências de restauração de áreas mineradas da empresa Mineração Paragominas S.A, pertencente ao Grupo Hydro, iniciaram em 2009, com adoção dos métodos de plantio de mudas nativas de diversas espécies e indução da regeneração natural.

São vários os desafios e lacunas associadas ao conhecimento sobre restauração ecológica no contexto regional, reforçando a importância de avaliar, compreender e corrigir a trajetória do processo de restauração. Com base nos atributos do solo e da vegetação estabelecida, este trabalho enfoca duas questões científicas: 1) quais fatores relacionados aos métodos de regeneração natural e plantio de mudas estão influenciando a trajetória da restauração florestal nas áreas da empresa Mineração Paragominas S.A.? 2) Os métodos e procedimentos operacionais adotados são suficientes para garantir a resiliência do ecossistema sob restauração?

As hipóteses testadas são: (1) O método de condução da regeneração natural tende a um retrocesso na trajetória do ecossistema devido à baixa diversidade de espécies arbóreas; (2) A área reconstruída sob o método de condução da regeneração natural apresenta atributos físicos e químicos do solo próximos ao solo natural sete anos após a reconstrução do solo. (3) O controle inicial de espécies regenerantes em meio a indivíduos arbóreos estabelecidos, via método de plantio, vão retardar a trajetória da restauração florestal e reduzir a qualidade do solo.

Para responder estas questões, esta dissertação foi estruturada em dois capítulos:

- **Capítulo 1** – Regeneração natural para restauração de áreas mineradas após a lavra de bauxita: um estudo de caso em Paragominas, Amazônia. Este artigo teve por objetivo avaliar o sucesso da restauração florestal em função da indução da regeneração natural em áreas com dois e sete anos após a mineração de bauxita e reconstrução do solo. A avaliação foi feita por meio da quantificação da matriz florestal e manchas oriundas do uso do solo que estão adjacentes as áreas estudadas, numa escala de paisagem, e a composição estrutural e florística da vegetação e atributos físicos e químicos do solo da área estudada.
- **Capítulo 2** – Plantio e condução de espécies arbóreas para a restauração de áreas mineradas após a lavra de bauxita: um estudo de caso em Paragominas, Pará. Este artigo teve por objetivo analisar a restauração ecológica por meio do reflorestamento com plantio e manutenção de mudas diversas com dois e sete anos após a mineração de bauxita e reconstrução do solo. A avaliação do tratamento foi feita através dos atributos físicos e químicos do solo e da estrutura e composição florística da área restaurada.

## REFERÊNCIAS

- BRANCALION, P. H.; GANDOLFI, S.; RODRIGUES, R. R. **Restauração Florestal**. São Paulo: Oficina de textos, 2015.
- CÉSAR, R. G.; HOLL, K. D.; GIRÃO, V. J.; MELLO, F. N.A.; VIDAL, E.; ALVES, M. C.; BRANCALION, P. H.S. Evaluating climber cutting as a strategy to restore degraded tropical forests. **Biological conservation**, n 201, 309-313, 2016.
- CHAZDON, R. L.; GUARIGUATA, M. R. Natural regeneration as a tool for large-scale forest restoration in the tropics: prospects and challenges. **Biotrópica** 48(6): 716-730, 2016.
- CLEWEL, A.F. ARONSON, I, J. **Ecological Restoration: Principles, Values, and Structure of an Emerging Profession**. Island Pres, 2008.
- DNPN. **Informe mineral do estado do Pará: ano base 2016**. Disponível em: [http://www.dnpm.gov.br/dnpm/informes/informe\\_mineral\\_0\\_2016](http://www.dnpm.gov.br/dnpm/informes/informe_mineral_0_2016). Acesso em 13/06/2017.
- FROUZ, JAN.; KOVA, M. L.; ALBRECHTOVA, J.; CHRONÁKOVA, A.; CAJTHAML, T.; PIZ, V.; HANE, L.; STARY, J.; BALDRIAN, P.; LHOTAKOVA, Z.; ŠIMACÁKOVA, H.; CEPÁKOVA, S. Is the effect of trees on soil properties mediated by

soil fauna? A case study from post-mining sites. **Forest Ecology and Management**. 309. ed, 2013, p. 87–95.

HÜTTL, R.F. WEBER, E. Forest ecosystem development in post-mining landscapes: a case study of the Lusatian lignite district. **Naturwissenschaften**, 88, pp. 322–329, 2001.

HYDRO. **Notícias**, 2015. Disponível em: <http://www.hydro.com/pt-BR/a-hydro-no-brasil/Imprensa/Noticias/2015/Estabelecida-nova-politica-fiscal-de-ICMS-de-longo/>. Acesso em 01/05/2017.

IBRAM. **Instituto Brasileiro de Mineração: Informações sobre a economia mineral Brasileira 2015**. Disponível em: <http://www.ibram.org.br/sites/1300/1382/00005836.pdf>. Acesso em: 25/03/2017.

MARTINS, S. V. **Restauração Ecológica de ecossistemas degradados**. 2. Ed. – Viçosa, MG: ed. UFV, 2015.

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

SALOMÃO, R. P. **Restauração Florestal de Precisão: dinâmica e espécies estruturantes. Evolução de áreas restauradas em uma Unidade de conservação na Amazônia – Porto Trombetas, PA**. Novas edições acadêmicas, 2015.

OLIVER, C. D.; LARSON, B.C.1996. **Forest stand dynamics**. Willey, New York, USA. 520p.

PICKETT, S.T.A.; CADENASSO, M.L.; BARTHA, S. Implications from the Buell-Small Succession Study for vegetation restoration. **Applied Vegetation Science** 4: 41-52, 2001.

PICKETT, S.T.A.; CADENASSO, M.L.; MEINERS, S. J. Ever since Clements: from succession to vegetation dynamics and understanding to intervention. **Applied Vegetation Science** 12: 9–21, 2009.

VALE, I.; MIRANDA, I. S.; MITJA, D.; GRIMALDI, M.; NELSON, B. W.; DESJARDINS, T.; COSTA, L. G. S. Tree Regeneration Under Different Land-Use Mosaics in the Brazilian Amazon -Arc of Deforestation-. **Environmental Management (New York)**, v. 56, p. 342-354, 2015.

WALKER, L. R.; R. DEL MORAL. **Transition Dynamics in Succession: Implications for Rates, Trajectories and Restoration**. In *New Models for Ecosystem Dynamics and Restoration*, edited K. Suding e R. J. Hobbs, 33– 49, 2008.

WALKER, J.; REDDELL, P. **Retrogressive succession and restoration in old landscapes**. In: Walker, L.R., Walker, J. & Hobbs, R.J. (eds.) *Linking restoration and ecological succession*. pp. 69–89. Springer, New York, NY, USA, 2007.



## **Regeneração natural para restauração de áreas mineradas após a lavra de bauxita: um estudo de caso em Paragominas, Pará**

### **RESUMO**

O presente estudo teve como objetivo investigar a restauração florestal em função da indução da regeneração natural em sistemas com dois e sete anos após a mineração de bauxita e reconstrução do solo, por meio da: (I) quantificação das matrizes que circundam as áreas estudadas, numa escala de paisagem; (II) riqueza e diversidade da vegetação e (III) atributos físicos e químicos do solo nas áreas de estudo. O estudo foi realizado em uma área de atividade minerária pertencente a Mineração Paragominas S.A., localizada no município de Paragominas, Sudeste do estado do Pará. Avaliou-se: (I) a área dos fragmentos florestais adjacentes por meio de técnicas de sensoriamento remoto; (II) a abundância de espécies, famílias, dominância, diversidade de Shannon e a distribuição das espécies arbóreas nos diferentes grupos ecológicos em três estratos: inferior, médio e superior; (III) as espécies indicadoras de cada sistema por meio do valor de espécies indicadoras (IndVal); e (IV) os atributos do solo: pH em H<sub>2</sub>O e KCl, fósforo; potássio; cálcio; magnésio; alumínio; soma de bases; capacidade de troca catiônica; densidade do solo; porosidade total e infiltração de água no solo. Nas áreas de regeneração natural, mesmo numa paisagem de entorno predominantemente florestal, a baixa diversidade e a alta dominância de poucas espécies pioneiras levam ao desaparecimento repentino e abrupto dos componentes arbóreos durante a fase de transição sucessional, ocasionando a exposição do solo à colonização por espécies pioneiras ou herbáceas, como gramíneas. O sistema de regeneração natural aos sete anos foi altamente eficiente na recuperação de importantes atributos relacionados à qualidade do solo em superfície, como a matéria orgânica, disponibilidade de nutrientes, densidade e infiltração de água no solo. No entanto, são necessárias intervenções adaptativas para corrigir e garantir que haja trajetória do ecossistema de maneira rápida e eficiente, principalmente com a introdução de espécies secundárias iniciais e tardias.

**Palavras-chaves:** Sucessão ecológica; mineração de bauxita; Dinâmicas de transição; Restauração florestal; Atributos físicos e químicos do solo.

### **INTRODUÇÃO**

A atividade minerária requer uma completa reconstrução dos ecossistemas, partindo de um “ponto zero”, devido à supressão da vegetação nativa e remoção do solo para lavra do minério (HÜTTL E WEBER, 2001). Após as operações de mineração, a área explorada deve ser reconstruída e reflorestada com espécies nativas, visando restabelecer processos ecológicos naturais por meio da perpetuação de dinâmicas sucessionais da floresta (PARROTA et al., 1997; SALOMÃO, 2007).

A utilização da regeneração natural para restauração de áreas mineradas tem sido amplamente utilizada por empresas de Mineração na Amazônia (PARROTA et al., 1997;

SALOMÃO 2007; SALOMÃO, 2015). No caso da empresa Mineração Paragominas S.A, no estado do Pará, as primeiras experiências com o uso da regeneração natural como cerne da restauração iniciaram no ano de 2009 (RIBEIRO, 2016). Sua principal particularidade foi a inserção numa região da Amazônia conhecida como “arco do desmatamento”, marcada pela conversão da matriz florestal nativa em matrizes agrícolas, pastagens, fragmentos florestais em estágios iniciais de sucessão e a grande ocorrência de áreas degradadas pelo esgotamento produtivo (RIVERO et al., 2009; DOMINGUES E BERMANN, 2012; CARVALHO et al., 2016).

O aproveitamento inicial da regeneração natural de espécies nativas é fundamental para aumentar a efetividade e a eficiência da restauração, além de reduzir os custos associados à atividade (CHAZDON e GUARIGUATA. 2016; LATAWIEC et al., 2016). No entanto, diversos condicionantes como a qualidade do substrato, condições ambientais e a presença de propágulos vão determinar o ritmo da colonização da área (HOLL et al., 1999; WALKER e REDDELL, 2007). Além do nível de degradação local, a frequência e a abundância de diferentes tipos de populações, bem como as interações bióticas dependerão da distribuição e conservação de remanescentes florestais em escala de paisagem (PICKETT et al., 2001; VALE et al., 2015; CÉSAR et al, 2016).

Entre os modelos e teorias sobre a trajetória do ecossistema no processo de restauração (CANDENASSO et al., 2003; PULSFORD et al., 2014) existe o modelo de Pickett et al. (2009). Nele, três processos determinam a sucessão: (1) disponibilidade diferencial de sítios e condições favoráveis para o desenvolvimento vegetal; (2) fornecimento contínuo de espécies vegetais permitindo assim substituições e (3) que as espécies apresentem diferentes comportamentos e exigências ecológicas.

O primeiro passo da restauração é a formação de um dossel dominado por pioneiras (RODRIGUES et al., 2009), na fase denominada de estruturação. Nesta etapa, que varia de acordo com o nível de degradação e também com a composição e diversidade dos indivíduos arbóreos estabelecidos (SALOMÃO, 2012), espera-se que haja: (1) o sombreamento para eliminar espécies invasoras, como gramíneas exóticas (ENGEL, PARROTA, 2001); (2) a criação de um habitat florestal (BIZUTI et al., 2016); (3) o gradual aumento na oferta de alimentos, favorecendo o trânsito de populações da fauna para a introdução de propágulos (CROUZEILLES e CURRAN, 2016); (4) a recuperação dos atributos do solo, em especial com o acúmulo de matéria orgânica (BARROS et al.,

2013) e (5) o melhoramento das condições estruturais para favorecer as dinâmicas e processos ecológicos gerenciados pelo solo (WALKER e REDDELL, 2007).

No entanto, devido a fatores como senescência, exclusão competitiva ou condições ambientais adversas, as espécies pioneiras estabelecidas tendem a morrer e serem substituídas por espécies secundárias iniciais, em uma nova fase de transição da trajetória do ecossistema. De acordo com WALKER e MORAL (2008) e BRANCALION et al. (2015), as consequências desse processo podem: (1) favorecer a criação de um novo dossel dominado por espécies secundárias iniciais para a fase de consolidação da sucessão florestal, ou (2) gerar perda abrupta do dossel e o regresso ao estágio inicial de restauração e o surgimento de áreas abertas, devido à baixa densidade, diversidade e/ou condições inadequadas para o desenvolvimento de espécies secundárias iniciais.

No caso de um regresso na trajetória sucessional do ecossistema, boa parte dos benefícios acumulados pela implantação dessa comunidade pioneira pode ser perdida, fazendo com que o ecossistema retorne as condições iniciais da fase de estruturação (WALKER e MORAL, 2008). O conhecimento de como as espécies regenerantes interagem durante cada fase do seu ciclo de vida é fundamental para compreender os processos de transição e proceder com a restauração.

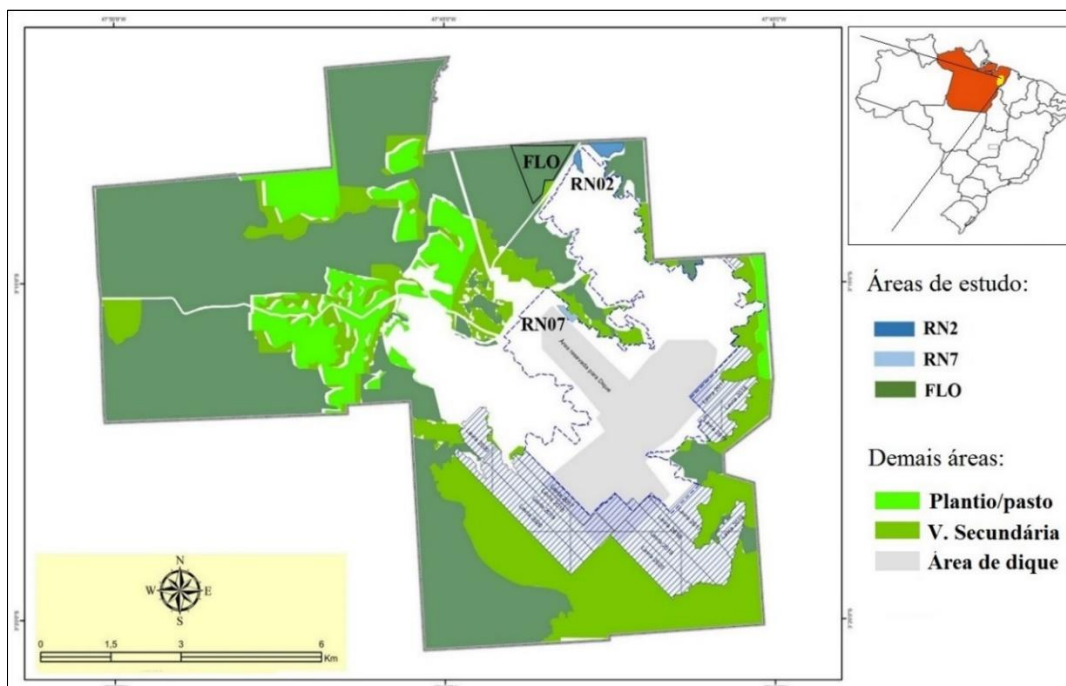
Desta forma, são apresentadas as seguintes perguntas neste estudo: a) como se dá a restauração ecológica nas áreas sob indução da regeneração natural? b) São necessárias ações corretivas para garantir sistemas sustentáveis nos primeiros anos da restauração? As hipóteses testadas são: (1) O método de condução da regeneração natural na área da Mineração Paragominas S/A tende a um retrocesso na trajetória do ecossistema devido à baixa diversidade de espécies arbóreas e (2) a área reconstruída sob o método de condução da regeneração natural apresenta atributos físicos e químicos do solo próximos ao solo natural sete anos após a reconstrução do solo.

Assim, este estudo objetivou investigar a restauração florestal do ecossistema em função da indução da regeneração natural em áreas com dois e sete anos após a implantação dos procedimentos de restauração, por meio de: (1) identificação e quantificação da matriz florestal que circunda as áreas estudadas, numa escala de paisagem; (2) da composição estrutural e florística da vegetação das áreas estudadas e (3) dos atributos físicos e químicos do solo.

## MATERIAIS E MÉTODOS

### Localização da área de estudo

O estudo foi realizado em uma área de mineração de bauxita pertencente à Mineração Paragominas S.A., empresa do grupo Hydro, denominada Platô Miltônia 3, no município de Paragominas, PA. A área é parte da Microrregião de Paragominas e Mesorregião Sudeste do Estado do Pará (Figura 1). Na área de estudo o clima é do tipo Aw, segundo a classificação de Köppen, com período de estiagem entre os meses de junho a dezembro (BASTOS et al., 2005), temperatura média anual de 25°C, regime pluviométrico entre 2.250 e 2.500 mm e umidade relativa do ar média de 85% (SEPOF, 2014).



**Figura 1:** Localização das áreas com os diferentes sistemas de restauração estudados.

O processo de mineração de bauxita envolve as seguintes etapas: (1) a supressão vegetal, (2) decapeamento, (3) perfuração, (4) desmonte, (5) escavação, (6) carregamento, (7) transporte e (8) restauração florestal das áreas degradadas, conforme a figura 2. No ano de 2009, a área total que foi restaurada com o método de Regeneração natural foi de 21,04 ha e 71,44 ha foi recuperada com o método de plantio. Já no ano de 2014, a área restaurada com regeneração natural foi de 238,6 ha e 44,78 ha foram através

da metodologia de nucleação, 240,36 ha com a técnica tradicional de plantio de mudas.



**Figura 2.** Processo de mineração de bauxita e restauração de áreas degradadas. Fonte: Martins, 2016.

### **Quantificação da matriz florestal e manchas predominantes na escala de paisagem**

Para quantificação da matriz florestal e manchas predominantes na escala de paisagem, foi usada imagem do satélite Landsat 8, sensor Operacional Terra Imager (OLI), órbita/ponto 223/62, datada de 21/09/2016 e obtida do site EARTH EXPLORER (2013). A imagem tem resolução espacial de 30 m e composição Colorida RGB das bandas 6-5-4. Foi demarcado, a partir do entorno das áreas mineradas e destinadas para restauração, um raio de 10 km, de acordo com a recomendação feita por Crouzeilles e Curran (2016), para avaliação de fragmentos florestais para restauração ecológica na escala de paisagem.

Posteriormente foram aplicados os procedimentos referentes ao pré-processamento das imagens obtidas: recorte, correção radiométrica e georreferenciamento. A etapa de processamento das imagens foi realizada por meio da classificação supervisionada pelo algoritmo da Máxima Verossimilhança, na qual definiu-se as seguintes classes que compõe a paisagem: (1) Floresta densa: Floresta Ombrófila Densa de Terra Firme e fragmentos florestais em estágio avançado de sucessão; (2) Floresta em estágio intermediário de sucessão; (3) Floresta em estágio inicial de sucessão, matriz dominada pelas áreas sob pastagens degradadas e áreas agrícolas abandonadas; (4) Solo exposto (áreas em fase de preparo para implantação agropecuária e áreas de mineração recém mineradas ou não destinadas à restauração); (5) Queimadas ou desmatamento; (6) Áreas agrícolas ou pastagem produtiva e (7) corpos hídricos. Com o tratamento e a classificação da imagem, foi realizada a pós-classificação da mesma, sendo computada a área ocupada por cada matriz pré-determinada. Os softwares utilizados no pré-tratamento e tratamento

das imagens orbitais foram: Environment For Visualizing Images – (Envi) versão 4.5 e ArcGis 9.3.

### Áreas de estudo

O estudo foi desenvolvido em duas áreas submetidas à indução da regeneração natural em tempos diferentes: a) indução da regeneração natural de dois anos (RN2), implantado em março de 2014 e b) a) indução da regeneração natural de sete anos (RN7), implantado em maio de 2009 (Figuras 3 e 4). Os procedimentos realizados na área de indução da regeneração natural consistem em: a) Conformação do terreno com espalhamento do estéril; b) Cobrimento do estéril com camada de solo superficial oriundo da mesma área antes da lavra do minério, denominado de *topsoil*, com aproximadamente 30 cm de espessura, para favorecer a regeneração de propágulos presente no substrato; c) Isolamento da área, com nenhuma intervenção antrópica após este procedimento. Para avaliar a trajetória do ecossistema, foi usado como ecossistema de referência um fragmento de floresta nativa (FLO) - Floresta Ombrófila densa, com registo de exploração madeireira convencional realizada no ano de 2003.



**Figura 3:** Sistemas sob Regeneração Natural com dois anos (RN2): espécies pioneiras regenerantes (I); perfil de solo reconstruído (II) e copa das árvores pioneiras (III).



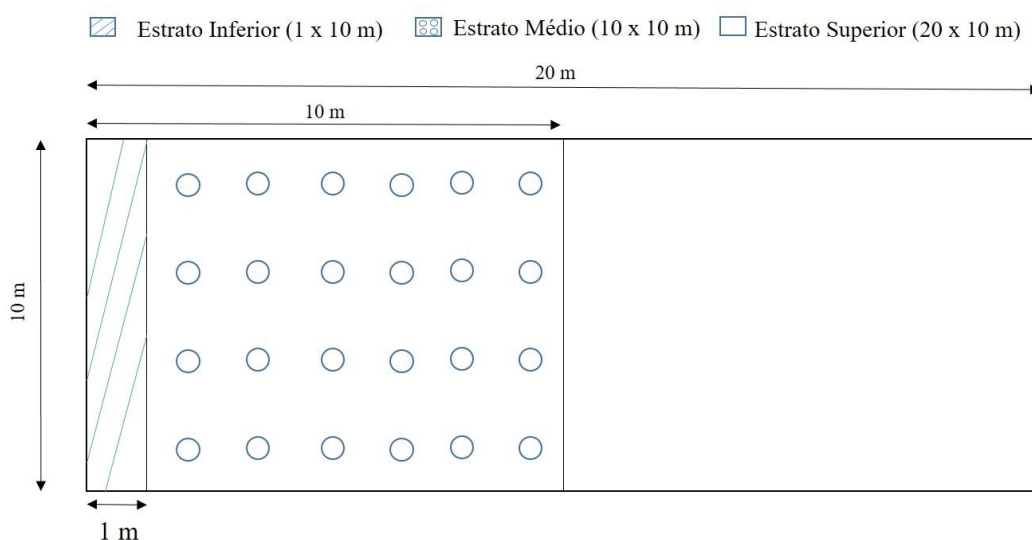
**Figura 4:** Sistemas sob Regeneração Natural com sete anos (RN7): espécies pioneiras regenerantes (I); perfil de solo reconstruído (II) e mortalidade de árvores pioneiras (III).



O solo de FLO é classificado como Latossolo Amarelo Distrófico, de textura muito argilosa (conteúdo de argila  $>700 \text{ g kg}^{-1}$ ) e relevo suave ondulado. As áreas de RN2 e RN7 apresentam um substrato de textura muito argilosa (conteúdo de argila  $>700 \text{ g kg}^{-1}$ ) e relevo suave ondulado e ondulado. A RN2 está adjacente a FLO, enquanto que RN7 é adjacente a um fragmento de floresta secundária de 50 anos e 100 m próxima de um fragmento florestal nativo (Figura 1).

### Delineamento para a amostragem da vegetação e solo

O processo de delineamento amostral seguiu um esquema de amostragem inteiramente ao acaso. Em cada área foram estabelecidas aleatoriamente 15 parcelas de 20 m x 10 m (Figura 5), nas quais foram realizados: a) inventário da vegetação arbórea; b) coleta de amostras de solo com estrutura deformada e indeformada e c) determinação em campo da infiltração de água no solo.



**Figura 5:** Parcela amostral e subparcelas utilizadas para amostragem da vegetação e solos nas áreas em estudo.

Para a amostragem da vegetação, em cada parcela amostral foram estabelecidas três sub parcelas para identificação dos indivíduos nos estratos inferior, médio e superior (Figura 5 e tabela 1).

**Tabela 1:** Critério para amostragem das espécies arbóreas nos diferentes estratos.

Estratos	Critério	Área da Parcela
Superior	$DAP \geq 5 \text{ cm}$	10 x 20 m (200 m <sup>2</sup> )
Médio	$DAP \geq 1 \text{ cm e } < 5 \text{ cm}$	10 x 10 m (100 m <sup>2</sup> )

Inferior  $\geq 30$  cm de altura e  $< 1$  cm de DAP 1 x 10 m (10 m<sup>2</sup>)

---

\* DAP: Diâmetro à altura do peito, a 1,3 m do solo.

As amostras de solos foram obtidas nas profundidades 0-10; 10-20 e 20-40 cm e coletadas aleatoriamente dentro das parcelas. As amostras deformadas foram coletas em três pontos por parcela e homogeneizadas, para gerar uma amostra composta por profundidade e por parcela para obter as variáveis: pH em H<sub>2</sub>O, pH em KC; acidez potencial; cálcio, magnésio e alumínio trocáveis, fósforo disponível, potássio e matéria orgânica. Para obter as amostras com estrutura indeformada, obteve-se um monólito de solo esculpido, com aproximadamente 10 x 10 x 10 cm (1000 cm<sup>3</sup>). Em seguida, o monólito foi impregnado com uma mistura de cola, água e álcool hidratado na proporção de 5:4:1, respectivamente. Com estas amostras foram obtidas as variáveis: densidade do solo e porosidade total, perfazendo 15 repetições por sistema e por profundidade. Adjacente ao local de coleta de amostras deformadas e indeformadas, foi determinada, por parcela, a infiltração de água no solo, perfazendo 15 repetições por sistema.

### **Variáveis analisadas**

Foram calculadas as seguintes variáveis nos três estratos amostrados: (1) Abundância de indivíduos e famílias; (2) índice de diversidade de Shannon e Winner (H'); Dominância; equabilidade, as quais foram calculadas com o auxílio do software PAST.

Foi determinado também o grupo ecológico de cada espécie, dividido em: a) pioneira, b) secundária inicial, c) secundária tardia e d) clímax. Para a análise das espécies bioindicadoras de cada área e estrato amostrados, utilizou-se o Valor Indicador Individual (IndVal), método desenvolvido por Dufrene e Legendre (1997). A análise do IndVal fornece um valor de 0 a 100% por meio da relação da abundância, indicando a especificidade e fidelidade da espécie ao seu grupo de ocorrência. Zero evidencia que a espécie não é um indicador para determinado ambiente e 100 indica que a espécie é característica do ambiente. A significância estatística (p) foi avaliada por meio do teste de Monte Carlo que, através de permutações, avalia a proporção com que o valor gerado entre os grupos é maior que o observado. Estes procedimentos estatísticos foram executados com o auxílio do software R.



Quanto às variáveis de solos, foram obtidos os atributos químicos: pH em H<sub>2</sub>O, pH em KCl 1M; acidez potencial (H+Al) (cmol<sub>c</sub> dm<sup>-3</sup>); cálcio, magnésio e alumínio trocáveis (cmol<sub>c</sub> dm<sup>-3</sup>), fósforo disponível (mg dm<sup>-3</sup>), potássio (cmol<sub>c</sub> dm<sup>-3</sup>) e matéria orgânica (g kg<sup>-1</sup>). Os métodos e procedimentos laboratoriais estão descritos em EMBRAPA (1997) e foram realizadas no Laboratório de Química do Solo da Universidade Federal Rural da Amazônia.

A análise da densidade do solo seguiu a metodologia do torrão parafinado, conforme citado por Viana (2008). A porosidade total (Pt) foi calculada pela equação  $Pt = (1 - Ds/Dp)$ , sendo Dp igual a 2,65 kg dm<sup>-3</sup>, média de solos minerais. A infiltração de água do solo foi determinada pelo método dos anéis concêntricos, composto por um anel metálico maior com 20 cm de diâmetro e 20 cm de altura e um anel menor com 10 cm de diâmetro e 10 cm de altura. Ambos os anéis eram cravados ao solo de maneira concêntrica. Com esses dados foi determinada a infiltração acumulada (IA), a qual corresponde à função entre a 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 Kostiakov (1932) (1):

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

Derivando-se a função da estimativa da infiltração pelo tempo, encontra-se o modelo potencial da velocidade de infiltração de água no solo (VI) (2):

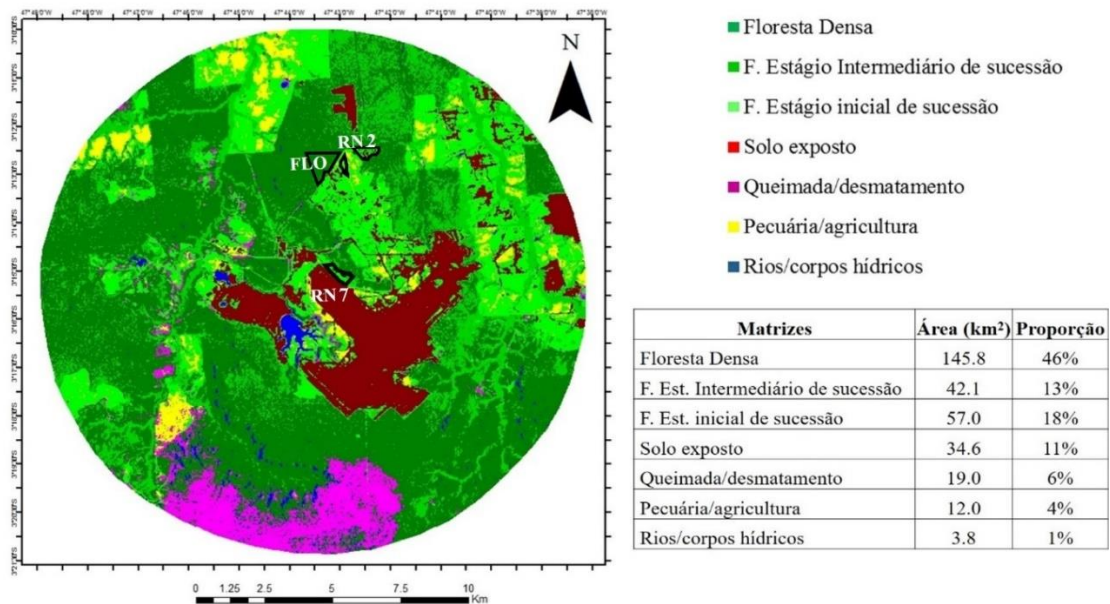
$$VI = \frac{dIA}{dT} = k a T^{a-1} \quad (2)$$

A avaliação dos atributos físicos e químicos do solo como variáveis explicativas das características da vegetação foi efetuada por meio da análise de redundância (RDA) (BRAAK e SMILAUER, 1998), Tal Análise utiliza os dados ambientais para ordenar as amostras da vegetação, por meio de um modelo linear. A análise foi realizada com o auxílio do software R.

## **RESULTADOS**

### **a) Matriz de dominância da vegetação**

O mapa com a matriz dominante na escala de paisagem (raio de 10 km do centro das áreas estudadas) e os valores referentes à quantificação destas matrizes são apresentados na Figura 6. A matriz dominante foi a vegetação densa, com 145,8 km<sup>2</sup> (46% da área avaliada), composta por fragmentos de floresta nativa com sinais de exploração madeireira. A classe referente a fragmentos florestais em estágio intermediário de sucessão, que consiste em florestas secundárias de aproximadamente 20 anos, ocupa uma área de 42,1 km<sup>2</sup> (13% da área avaliada). Estas duas matrizes juntas somam uma área de 187,9 km<sup>2</sup>, totalizando 59% da área avaliada, as quais são importantes fontes de propágulos para acelerar a regeneração natural das áreas em restauração (ALVES e METZGER, 2006).



**Figura 6:** Mapa temático das classes de uso do solo na escala de paisagem: floresta densa; floresta em estágio intermediário de sucessão; floresta em estágio inicial de sucessão, solo exposto, queimada/desmatamento; pecuária/agricultura e corpos hídricos; e os valores referentes à quantificação da área ocupada por estas matrizes, considerando uma área demarcada sob o raio de 10 km a partir do centro das áreas sob restauração ecológica.

As demais classes referentes à conversão do ecossistema florestal em outras manchas com sinais de degradação/alteração das dinâmicas naturais dos ecossistemas (florestas em estágio inicial de sucessão; solo exposto; desmatamento/queimadas e pecuária/agricultura) somam uma área de 124,4 km<sup>2</sup>, 39% da área avaliada.

## b) Vegetação

Na tabela 2 são apresentadas as variáveis de riqueza e diversidade da vegetação nos diferentes estratos das áreas estudadas. No estrato superior da RN2 foram amostradas três espécies pertencentes a três famílias, enquanto que na RN7 foram amostradas 10 espécies, pertencentes a nove famílias. Em FLO, foram amostradas 69 espécies de 38 famílias. RN2 teve um número de indivíduos por parcela e por hectare significativamente menor do que RN7 e FLO, os quais não diferiram entre si. Neste estrato, o sistema que apresentou o menor índice de diversidade de Shannon foi RN2, seguido de RN7 e FLO.

**Tabela 2:** Variáveis de diversidade nos estratos superior ( $DAP \geq 5$  cm), médio ( $DAP \geq 1$  cm e  $< 5$  cm) e inferior ( $\geq 30$  cm de Altura e  $< 1$  cm de DAP) em áreas sob condução da regeneração natural (RN2 e RN7) e da área de floresta nativa primária usada como controle (FLO) em Paragominas, Amazônia.

Parâmetros	Sistemas		
	RN2	RN7	FLO
<b>Estrato superior:</b>			
Riqueza de espécies	3	10	69
Número de Famílias	3	9	38
Abundância (ind ha <sup>-1</sup> )	90±187,2 b	1096±813,4 a	1346,6±157,2 a
Diversidade de Shannon ( <i>H'</i> )	0,03 c	0,67 b	2,43 a
Equabilidade:	0,04 c	0,56 b	0,91 b
Dominância	0,38 b	0,65 a	0,12 c
<b>Estrato médio:</b>			
Riqueza de espécies	12	14	66
Riqueza de Famílias	9	12	36
Abundância (ind ha <sup>-1</sup> )	1566,7±1487,8 b	1873,3±1401,1 b	3480±1376,7 a
Diversidade de Shannon ( <i>H'</i> )	0,75 b	1,05 b	2,27 a
Equabilidade:	0,51 b	0,76 ab	0,87 a
Dominância	0,62 a	0,44 a	0,15 b
<b>Estrato inferior:</b>			
Riqueza de espécies	11	5	23
Riqueza de Famílias	9	4	15
Abundância (ind ha <sup>-1</sup> )	2800,0±4564,9 b	1066,7±1387,1 b	5466,7±2569,1 a
Diversidade de Shannon ( <i>H'</i> )	0,52 b	0,12 c	0,96 a
Equabilidade	0,44 b	0,18 c	0,74 c
Dominância	0,50 ns	0,52 ns	0,48 ns

\*Médias seguidas de letras diferentes nas linhas indicam diferenças estatísticas pelo teste de Tukey (5% de significância).

No estrato médio, o número de indivíduos por parcela e por hectare não variou significativamente entre RN2 e RN7, sendo estes significativamente menores que FLO. Neste estrato, o sistema que apresentou o menor índice de diversidade de Shannon foi 0,51, observado em RN2, seguido de 1,05 em RN7 e 2,27 em FLO. No estrato inferior, a abundância por parcela e por hectare variou significativamente entre os três sistemas,

assim como o índice de diversidade de Shannon, sendo RN7 significativamente inferior a RN2 e estes inferiores a FLO.

As três áreas estudadas variaram entre si nos três estratos quanto à equabilidade. FLO apresentou a maior equabilidade, seguido de RN7 e RN2, com exceção do estrato inferior, no qual a equabilidade foi significativamente maior em RN2 quando comparado com RN7. O índice de dominância ecológica foi significativamente menor em FLO nos estratos médio e superior. No estrato superior, RN7 foi o sistema que apresentou a maior dominância. Já no estrato médio, RN2 apresentou a maior dominância entre as áreas.

Na tabela 3 são apresentados os valores de indicação (VI) das espécies (IndVal) no estrato superior. De 71 espécies analisadas, 21 foram selecionadas como indicadoras entre os diferentes sistemas. Na área RN7 três espécies foram selecionadas: *Cecropia* sp.; *Byrsonima crassifolia* e *Casearia javitensis*, sendo estas duas últimas espécies do grupo ecológico das secundárias iniciais. Na área RN2, apenas uma espécie foi selecionada: *Solanum* sp. O IndVal indicou que o *Croton matorensis* foi a espécie indicadora dos sistemas RN2 e RN7, sugerindo que esta espécie é a principal indicadora dos sistemas sob regeneração natural no estrato superior. Em FLO, 16 espécies foram selecionadas, as quais pertencem a diferentes grupos ecológicos.

**Tabela 3:** Relação das espécies, grupo a que foram indicadas pela IndVal e valores de indicação (VI) para o estrato superior (DAP  $\geq$  5 cm). Foram relacionadas somente as espécies que apresentaram valores significativos, segundo teste de “Monte Carlo” para  $\leq 0,05$ .

<b>Estrato Superior</b>				
Espécie	GE	Família	VI	Pvalue
<b>RN2</b>				
<i>Solanum</i> sp.	P	Solanaceae	0,577	0,02
<b>RN7</b>				
<i>Cecropia</i> sp.	P	Urticaceae	0,838	0,001
<i>Byrsonima crassifolia</i> (L.) Kunth	SI	Malpighiaceae	0,617	0,038
<i>Casearia javitensis</i> Kunth	SI	Salicaceae	0,577	0,028
<b>RN2 + RN7</b>				
<i>Croton matorensis</i> Aubl.	P	Euphorbiaceae	0,785	0,006
<b>FLO</b>				
<i>Apeiba albiflora</i> Ducke	SI	Malvaceae	0,894	0,001
<i>Talisia microphylla</i> Uittien.	P	Sapindaceae	0,894	0,001
<i>Chrysophyllum prieurii</i> A.DC.	ST	Sapotaceae	0,856	0,001
<i>Cordia goeldiana</i> Huber	ST	Boraginaceae	0,816	0,003
<i>Inga thibaudina</i> DC.	P	Mimosaceae	0,816	0,002
<i>Guatteria poeppigiana</i> Mart.	P	Annonaceae	0,789	0,007

<i>Eschweilera sp.</i>	ST	Lecythidaceae	0,73	0,015
<i>Machaerium amazonense</i> Hoehne	SI	Fabaceae	0,73	0,001
<i>Duguetia pycnastera</i> Sandwith	ST	Annonaceae	0,683	0,009
<i>Helicostylis turbinata</i>	SI	Monimiaceae	0,683	0,011
<i>Jacaranda copaia</i> (Aubl.) D.Don	P	Bignoniaceae	0,683	0,008
<i>Amphiodon effusus</i> Huber	SI	Fabaceae	0,632	0,007
<i>Ocotea opifera</i> Mart.	ST	Lauraceae	0,632	0,006
<i>Tetragastris altissima</i> (Aubl.) Swart.	ST	Burseraceae	0,577	0,04
<i>Parkia multijuga</i> Bentham.	ST	Mimosaceae	0,553	0,046
<i>Euxylophora paraensis</i> Huber	ST	Rutaceae	0,516	0,05

Sendo: GE – Grupo ecológico: (P) pioneiras, (SI) Secundárias iniciais e (ST) Secundária Tardia.

No estrato médio, os valores de IndVal são apresentados na Tabela 4. Do total de 78 espécies analisadas, 22 foram indicadoras entre as diferentes áreas. Na área RN7, três espécies foram selecionadas: *Vismia guianensis*; *Casearia javitensis* e *Byrsonima crassifolia*, sendo que estas duas últimas também foram indicadoras no estrato superior. Estas espécies fazem parte do grupo ecológico das secundárias iniciais. Na área RN2, duas espécies foram selecionadas: *Solanum sp.*, que também foi indicada no estrato superior neste sistema, e *Trema micrantha*. Assim como no estrato superior, o IndVal indicou a existência de um grupo formado pela RN2 e RN7, no qual a espécie *Croton matorensis* novamente foi selecionada, assim como no estrato superior. Em FLO, 17 espécies foram selecionadas, as quais pertencem a diferentes grupos ecológicos.

**Tabela 4:** Relação das espécies, grupo a que foram indicadas pelo IndVal e valores de indicação (VI) para o estrato médio (DAP  $\geq 1$  cm e  $< 5$  cm). Foram relacionadas somente as espécies que apresentaram valores significativos, segundo teste de “Monte Carlo” para  $p \leq 0,05$ .

<b>Estrato Médio</b>				
Espécie	GE	Família	VI	pvalue
<b>RN2</b>				
<i>Solanum sp.</i>	P	Solanaceae	0,702	0,001
<i>Trema micrantha</i> (L.) Blume	P	Cannabaceae	0,683	0,001
<b>RN7</b>				
<i>Vismia guianensis</i> (Aubl.) Choisy	P	Clusiaceae	0,777	0,001
<i>Casearia javitensis</i> Kunth	SI	Salicaceae	0,674	0,002
<i>Byrsonima crassifolia</i> (L.) Kunth	SI	Malpighiaceae	0,516	0,034
<b>RN7 + RN2</b>				
<i>Croton matorensis</i> Aubl.	P	Euphorbiaceae	0,683	0,009
<i>Cecropia sp.</i>	P	Urticaceae	0,674	0,013
<b>FLO + RN7</b>				
<i>Guatteria poeppigiana</i> Mart.	P	Annonaceae	0,811	0,004
<b>FLO</b>				
<i>Eschweilera coriacea</i> (DC.) S.A.Mori	ST	Lecythidaceae	1	0,001
<i>Talisia microphylla</i> Uittien.	P	Sapindaceae	1	0,001

<i>Chrysophyllum prieurii</i> A.DC.	ST	Sapotaceae	0,931	0,001
<i>Rinorea flavescens</i> (Aubl.) Kuntze	SI	Violaceae	0,894	0,001
<i>Amphiodon effusus</i> Huber	SI	Fabaceae	0,775	0,001
<i>Apeiba albiflora</i> Ducke	SI	Malvaceae	0,73	0,001
<i>Duguetia pycnastera</i> Sandwith	ST	Annonaceae	0,683	0,001
<i>Talisia esculenta</i>	P	Sapindaceae	0,683	0,001
<i>Astronium lecointei</i> Ducke	ST	Anacardiaceae	0,632	0,002
<i>Siparuna guianensis</i>	SI	Monimiaceae	0,632	0,002
<i>Astrocaryum gynacanthum</i>	P	Arecaceae	0,577	0,006
<i>Dodecastigma integrifolium</i> (Lanj.) Lanj. & Sandwith.	P	Euphorbiaceae	0,577	0,009
<i>Garcinia acuminata</i> Ruiz et Pav.	ST	Clusiaceae	0,577	0,01
<i>Ocotea opifera</i> Mart.	ST	Lauraceae	0,577	0,01
<i>Duguetia flagellaris</i> Huber	ST	Annonaceae	0,516	0,034
<i>Inga thibaudina</i> DC.	P	Mimosaceae	0,516	0,036
<i>Rinorea falcata</i> (Marct. Ex Eichler) Kuntze	SI	Violaceae	0,516	0,019

No estrato inferior, do total de 50 espécies analisadas, 9 foram selecionadas como indicadoras entre os diferentes sistemas (Tabela 5). No sistema PL7, quatro espécies foram selecionadas como indicadoras, todas advindas da regeneração natural. No sistema RN2, três espécies foram selecionadas, todas advindas também da regeneração natural e pertencem à família Solanaceae. Na FLO, duas espécies foram selecionadas como indicadoras.

**Tabela 5:** Relação das espécies, grupo a que foram indicadas pelo IndVal e valores de indicação (VI) para o estrato inferior ( $DAP \geq 1$  cm e  $< 5$  cm). Foram relacionadas somente as espécies que apresentaram valores significativos, segundo teste de “Monte Carlo” para  $p \leq 0,05$ .

<b>Estrato Inferior</b>				
Espécie	GE	Família	VI	pvalue
<b>RN2</b>				
<i>Cecropia</i> sp.	P	Urticaceae	0,617	0,018
<i>Solanum</i> sp.	P	Solanaceae	0,577	0,016
<i>Solanum fulvidum</i> Bitter	P	Solanaceae	0,5	0,041
<b>RN7</b>				
<i>Guatteria poeppigiana</i> Mart.	P	Annonaceae	0,595	0,046
<b>RN2 + RN7</b>				
<i>Vismia guianensis</i> (Aubl.) Choisy	P	Clusiaceae	0,577	0,05
<b>FLO</b>				
<i>Rinorea flavescens</i> (Aubl.) Kuntze	SI	Violaceae	0,816	0,002
<i>Eschweilera coriacea</i> (DC.) S.A.Mori	ST	Lecythidaceae	0,577	0,024

### c) Atributos do solo

No que se refere aos atributos físicos e químicos do solo, na tabela 6 são apresentados os seus valores médios nas diferentes áreas e profundidades. Nas profundidades 0-10 e 10-20 cm, o pH do solo foi significativamente maior nas áreas RN2 e RN7, em comparação a FLO. Em virtude destes valores de pH, a concentração de Alumínio trocável em RN2 e RN7 foi significativamente menor que a floresta, numa proporção aproximada 1/4 na profundidade 0-10 cm.

Esta relação entre o aumento do pH e redução do teor de alumínio trocável, justifica a maior soma de bases que as áreas RN2 e RN7 apresentaram quando comparados a FLO. Com relação a soma de base, conteúdo de Cálcio, Magnésio e Potássio nos sistemas sob regeneração natural, os maiores valores encontrados em RN7 em comparação a RN2 têm relação direta com a mistura do substrato de diferentes profundidades e procedência na reconstrução do solo. Além disso, ocorre também relação com o conteúdo de matéria orgânica do solo, que em RN7 tem valores significativamente maiores que a área mais nova sob regeneração natural em todas as profundidades. Nas profundidades 10-20 e 20-40 cm, o conteúdo de matéria orgânica em RN7 foi semelhante estatisticamente a FLO. Vale ressaltar que o Cálcio e o Magnésio foram os que mais contribuíram para a soma de base e apresentaram um desvio padrão elevado nestes sistemas, evidenciando a alta heterogeneidade na constituição química do solo reconstruído.

Na profundidade 0-10 cm, não houve diferenças significativas no conteúdo de fósforo no solo entre os sistemas de regeneração natural e a floresta. Nas profundidades 10-20 e 20-40, a RN7 apresentou conteúdo de fósforo trocável significativamente maior que RN2.

Quanto à densidade do solo, os valores médios variaram de 1,01 a 1,35 kg dm<sup>-3</sup> nas diferentes áreas e profundidades. Os valores estão abaixo do limite crítico ao desenvolvimento da vegetação estabelecido por Reichert et al. (2003), isto é, 1,45 kg dm<sup>-3</sup> para solos com teor de argila superior a 550 g kg<sup>-1</sup>, como o do presente estudo. Não houve diferença significativa para a densidade do solo entre RN7 e FLO na profundidade 0-10 cm, sendo estes significativamente inferiores a RN2. Assim como a densidade do solo, a porosidade total não diferiu entre os sistemas RN7 e FLO, sendo estes significativamente maiores que RN2 para esta profundidade.

**Tabela 6:** Atributos químicos e físicos do solo nos sistemas sob regeneração natural implantados no ano de 2014 (RN2) e no ano de 2009 (RN7) e num fragmento de floresta nativa (FLO), usada como ecossistema de referência, nas profundidades 0-10; 10-20 e 20-40 cm, numa área de mineração de bauxita em Paragominas, Pará.

	PH		P	K	Ca	Mg	Al	SB	CTC	M.O	Ds	Pt
	H <sub>2</sub> O	KCl	(mg dm <sup>-3</sup> )	-----cmol dm <sup>-3</sup> -----						g kg <sup>-1</sup>	kg dm <sup>-3</sup>	m <sup>3</sup> m <sup>-3</sup>
----- 0-10 cm -----												
<b>RN2</b>	5.00±0.49a	4.55±0.46a	1.75±0.64ns	0.06±0.03b	0.64±0.30b	0.26±0.12b	0.43±0.41b	0.98±0.39b	6.77±1.25c	17.4±5.69c	1.19±0.11a	0.54±0.04b
<b>RN7</b>	5.08±0.49a*	4.57±0.42a	1.97±0.65ns	0.15±0.06a	1.09±0.22a	0.49±0.17a	0.34±0.23b	1.73±0.24a	9.58±2.23b	26.2±6.41b	1.06±0.11b	0.59±0.04a
<b>FLO</b>	4.39±0.24b	3.94±0.15b	2.00±0.53ns	0.09±0.02b	0.46±0.16b	0.13±0.06c	2.10±0.31a	0.70±0.21c	14.0±1.94a	32.8±3.89a	1.01±0.06b	0.61±0.02a
----- 10-20 cm -----												
<b>RN2</b>	4.56±0.25b	4.47±0.31a	0.82±0.40b	0.03±0.02b	0.27±0.13b	0.11±0.04b	0.80±0.30b	0.41±0.17b	5.03±1.49c	14.2±6.54b	1.35±0.15a	0.48±0.05b
<b>RN7</b>	4.92±0.35a	4.50±0.30a	1.20±0.37a	0.08±0.02a	0.74±0.26a	0.27±0.10 <sup>a</sup>	0.45±0.46c	1.11±0.35a	8.16±2.24b	21.6±4.80a	1.30±0.16a	0.50±0.0b
<b>FLO</b>	4.24±0.16c	4.01±0.08b	1.19±0.35a	0.08±0.04a	0.13±0.04b	0.07±0.03b	2.14±0.25a	0.29±0.06b	11.3±1.39a	26.0±3.70a	1.16±0.05b	0.56±0.02a
----- 20-40 cm -----												
<b>RN2</b>	4.52±0.18b	4.79±0.33a	0.55±0.20b	0.03±0.02b	0.20±0.10b	0.10±0.04b	0.13±0.11b	0.33±0.15b	3.03±0.74c	3.97±2.21b	1.35±0.16a	0.48±0.06b
<b>RN7</b>	5.03±0.38a	4.70±0.43b	1.02±0.54a	0.07±0.02a	0.51±0.24a	0.20±0.07 <sup>a</sup>	0.31±0.34b	0.79±0.30a	5.16±1.82b	13.0±3.74a	1.33±0.15a	0.49±0.05a
<b>FLO</b>	4.32±0.17b	4.07±0.09a	0.74±0.15b	0.07±0.03a	0.16±0.10b	0.05±0.02c	1.52±0.19a	0.29±0.09b	6.65±1.17a	14.37±3.75a	1.22±0.05b	0.53±0.01a

P - Fósforo; K - Potássio; Ca - Cálcio; Mg - Magnésio; Al - Alumínio; SB - Soma de bases; CTC – Capacidade de troca catiônica; Ds – Densidade do solo; Pt – Porosidade total \*Letras iguais nas colunas não deferem estatisticamente conforme o teste de Tukey a 5% de significância.



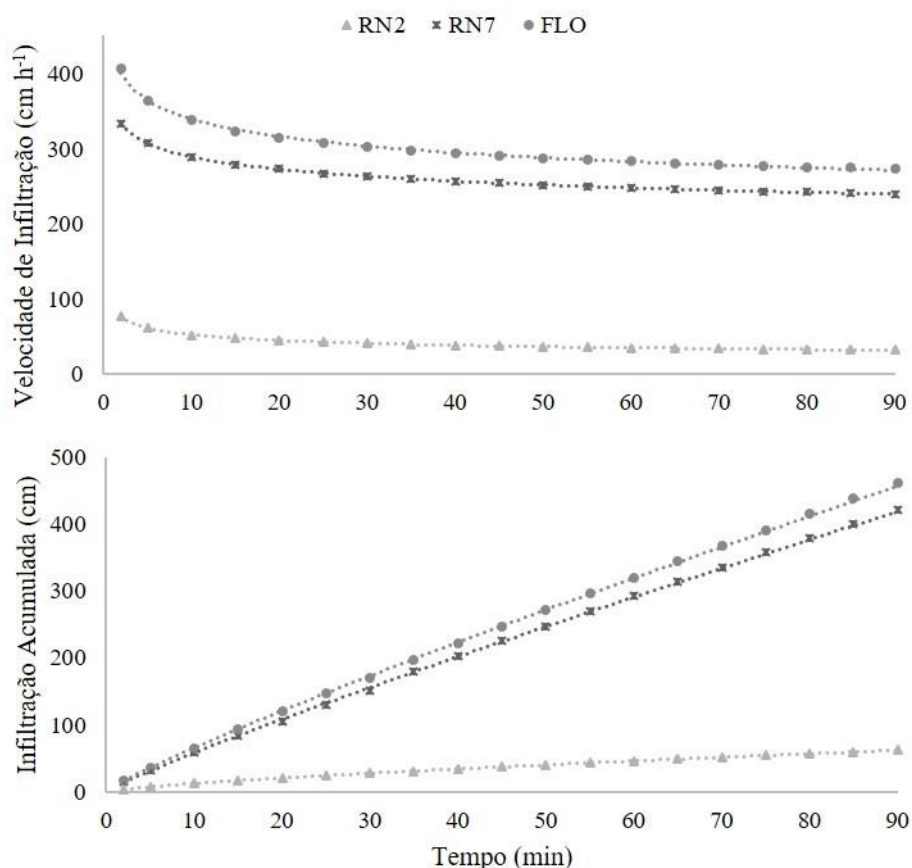
Nas demais profundidades (10-20 e 20-40 cm), a densidade do solo não diferiu entre os sistemas RN2 e RN7, sendo estes significativamente maiores que FLO nestas profundidades. Por sua vez, a porosidade total apresentou relação inversa: a maior porosidade total nestas profundidades foi constatada em FLO, quando comparada a RN2 e RN7.

Na Tabela 7 são apresentados os valores médios e Coeficiente de Variação (CV) de Velocidade de Infiltração Básica (VIB), seguidos de equações e coeficientes de ajuste da velocidade de infiltração. Na figura 7 são apresentadas as curvas de Velocidade de infiltração ( $\text{cm h}^{-1}$ ) e infiltração acumulada (cm) de água no solo nas diferentes áreas. Os valores de VIB foram classificados como muito alto ( $> 3 \text{ cm h}^{-1}$ ), conforme classificação proposta por Bernardo et al. (2006). Não houve diferença significativa de VIB entre RN7 e FLO, sendo estes significativamente maiores que RN2 para estas variáveis.

**Tabela 7:** Velocidade de Infiltração Básica – VIB ( $\text{cm h}^{-1}$ ), equação de ajuste da velocidade de infiltração e coeficiente de determinação.

Sistema	VIB ( $\text{cm h}^{-1}$ )	Equação de ajuste	R <sup>2</sup>
<b>RN2</b>	32,3±7,2b	VI=88.277 T <sup>-0.225</sup>	0.9992
<b>RN7</b>	239±79,6a*	VI=352.63 T <sup>-0.086</sup>	0.9999
<b>FLO</b>	273±90,3a	VI=429,52 T <sup>-0.102</sup>	0.9968

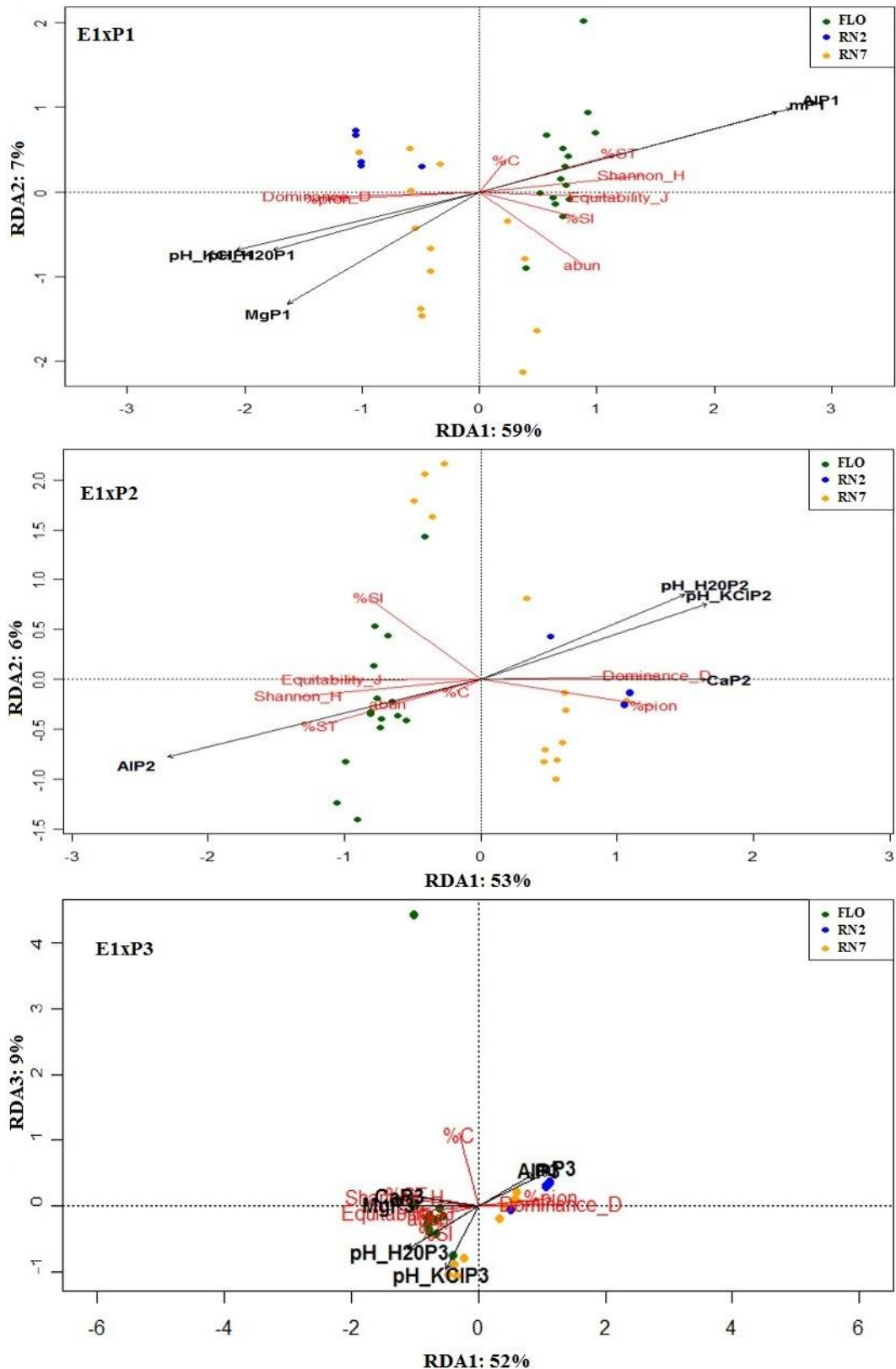
\*Médias e desvios padrão seguidos de mesma letra nas colunas não diferem estatisticamente conforme o teste de Tukey, a 5% de significância.



**Figura 7:** Velocidade de infiltração (cm h<sup>-1</sup>) e infiltração acumulada (cm) de água no solo nos sistemas sob regeneração natural implantados no ano de 2014 (RN2) e 2009 (RN7).

#### d) Relações entre vegetação e solo

A figura 8 contém as representações gráficas da Análise de Redundância Canônica (RDA) da relação entre as variáveis biológicas (riqueza e diversidade da vegetação – eixo Y) no estrato superior e ambiental (edáficas – eixo X) nas três profundidades estudadas. Na análise gráfica da RDA da vegetação no estrato superior, é possível notar uma grande heterogeneidade no padrão de distribuição das parcelas RN7, com algumas apresentando maior similaridade com FLO e outras com a RN2.



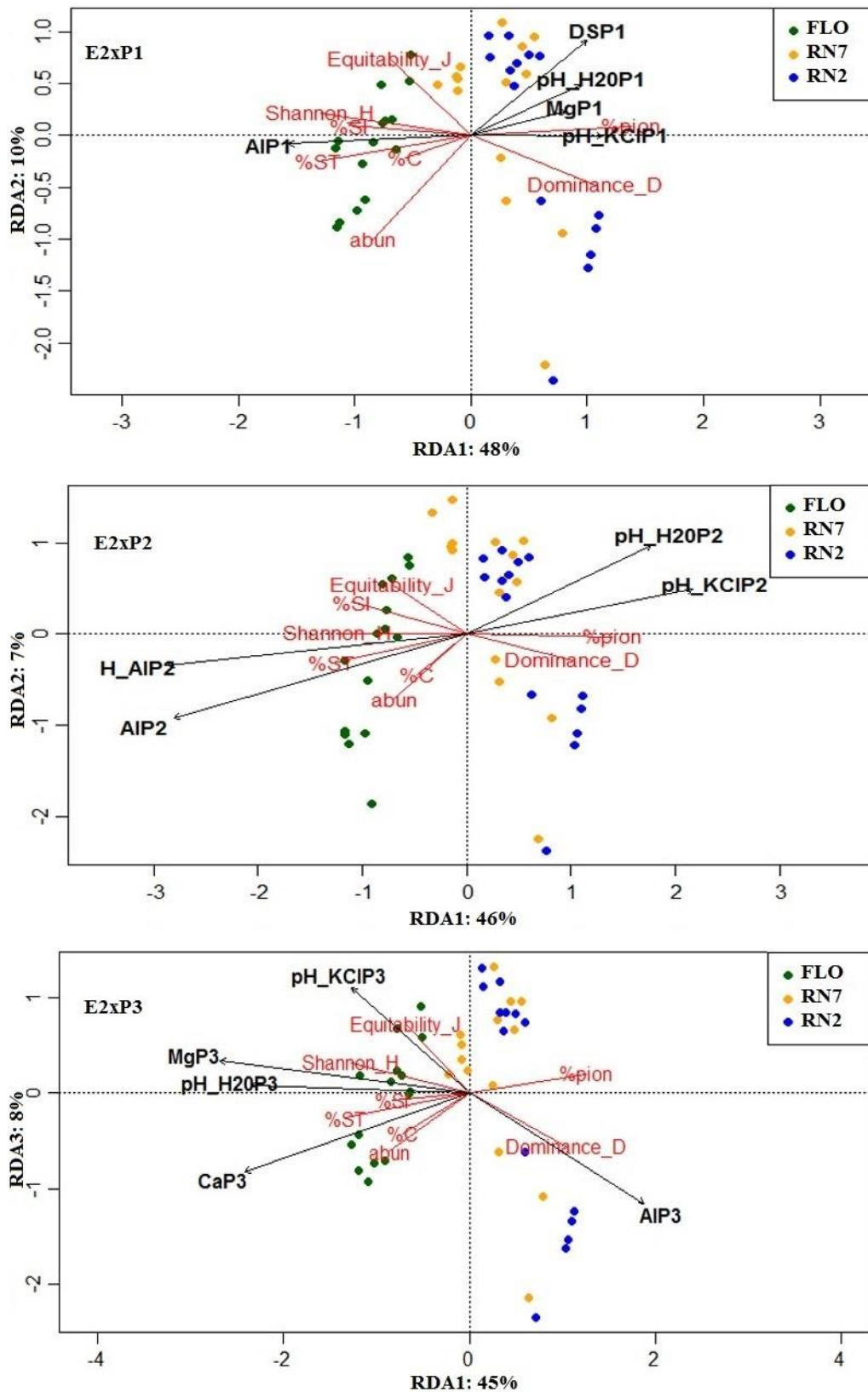
**Figura 8:** Análise de Redundância Canônica (RDA) da relação entre a vegetação no estrato superior (E1 – eixo y) e de propriedades edáficas nas profundidades P1, P2 e P3 (0-10; 10-20 e 20-40 cm) (eixo X) nos sistemas: Floresta nativa (FLO); Regeneração natural de dois anos (RN2) e sete anos (RN7) em Paragominas, Pará. J: equabilidade; D: Dominância;

Dominância; H: índice de Shannon; %P, %SI, %ST e %C: proporção de pioneiras, secundárias iniciais, secundárias tardias e clímax.

RN2 apresentou poucas parcelas com indivíduos no estrato superior. No que se refere aos índices de riqueza e diversidade neste estrato, a maioria das parcelas das áreas RN2 e RN7 estão diretamente associadas com as proporções de pioneiras e o índice de dominância, enquanto que a proporção de secundárias iniciais, secundárias tardias, clímax, índices de equabilidade e diversidade de Shannon apresentam maior associação com a FLO.

Quanto à relação entre o comportamento da vegetação no estrato superior e os atributos do solo nas diferentes profundidades, observa-se que somente o pH em água e KCl e os teores de Mg estiveram significativamente associados ao desenvolvimento da vegetação nas áreas RN2 e RN7, na profundidade 0-10 cm. Foram inversamente correlacionados com os teores de Al e a saturação por Alumínio (m), os quais tiveram associação direta com FLO. Na profundidade 2 (10-20 cm), além do pH em água e KCl, estiveram significativamente correlacionados com o comportamento da vegetação em RN2 e RN7, os teores de cálcio trocável. Na profundidade 3 (20-40 cm), nota-se também uma heterogeneidade na distribuição das parcelas de RN7, sendo que a parte das parcelas estão sendo mais influenciadas pelo aumento do pH. As demais parcelas de RN7 e todas as parcelas de RN2 têm maior associação com o aumento do teor de Alumínio na profundidade 0-10 cm.

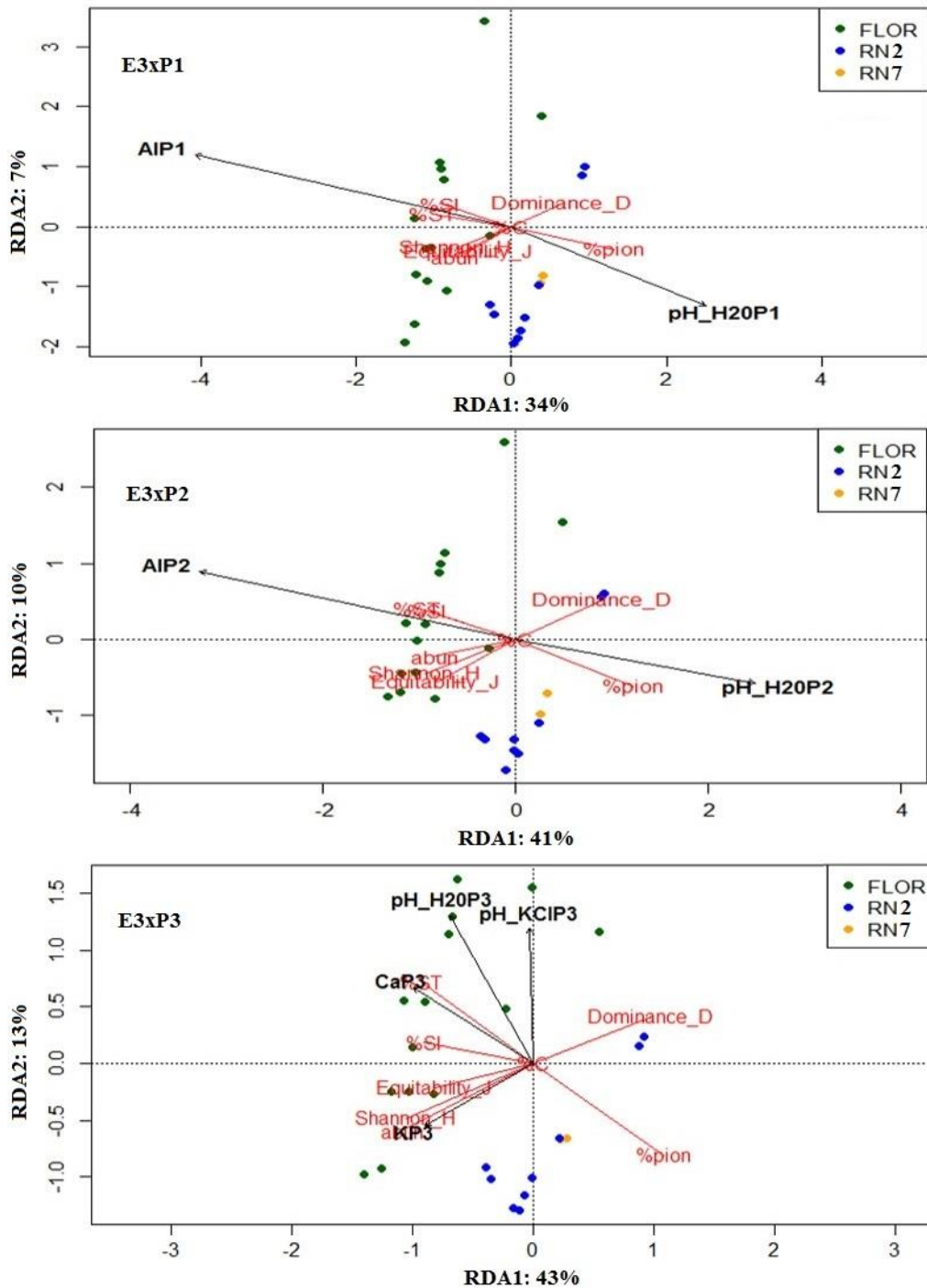
As representações gráficas da Análise de Redundância Canônica (RDA) da relação às variáveis riqueza e diversidade da vegetação no estrato médio (eixo Y) e edáficas (eixo X), nas três profundidades estudadas estão na figura 9. Na análise da RDA da vegetação no estrato médio, observa-se um padrão semelhante de distribuição entre as parcelas de vegetação em RN2 e RN7. Estão a estes sistemas associados também a proporção de pioneiras e o índice de dominância e menor relação com espécies secundárias iniciais, secundárias tardias, clímax, abundância índice de diversidade de Shannon, os quais tiveram maior associação com a FLO.



**Figura 9:** Análise de Redundância Canônica (RDA) da relação entre a vegetação no estrato médio (E2 – eixo y) e de propriedades edáficas nas profundidades P1, P2 e P3 (0-10; 10-20 e 20-40 cm) (eixo X) nos sistemas: Floresta nativa (FLO); Regeneração natural de dois anos (RN2) e sete anos (RN7) em Paragominas, Pará. J: equabilidade; D: Dominância; H: índice de Shannon; %P, %SI, %ST e %C: proporção de pioneiras, secundárias iniciais, secundárias tardias e clímax.

Quanto à relação entre o comportamento da vegetação no estrato médio e os atributos do solo nas diferentes profundidades, observa-se que somente o pH em água e KCl e os teores de Mg e a densidade do solo estiveram significativamente associados ao desenvolvimento da vegetação nas áreas RN2 e RN7 na profundidade 0-10 cm. Estavam inversamente correlacionados com os teores de Al, os quais tiveram associação direta com FLO. Na profundidade 2 (10-20 cm), somente o pH em água e KCl foram significativamente correlacionados com a vegetação dos sistemas sob regeneração natural. Na profundidade 3 (20-40 cm) houve uma variação na tendência observada nos estratos superiores: algumas poucas parcelas de RN7 tiveram maior associação com o aumento do pH em KCl, enquanto que a maioria esteve associada a FLO. Conseqüentemente, houve aumento da associação com os macronutrientes cálcio e magnésio. Em contrapartida, o aumento no teor de Al teve maior associação com algumas parcelas de RN2 e RN7.

A figura 10 contém as representações gráficas da Análise de Redundância Canônica (RDA) da relação entre as variáveis riqueza e diversidade da vegetação no estrato inferior (eixo Y) e edáficas (eixo X), nas três profundidades estudadas. Na análise RDA da vegetação no estrato inferior, observa-se poucas parcelas de RN7, devido a muitas parcelas não apresentarem indivíduos neste estrato. Observa-se também que nas parcelas das áreas RN2 e RN7 há maior associação com a proporção de pioneiras e o índice de dominância e menor relação com espécies secundárias iniciais, secundárias tardias, clímax, abundância índice de diversidade de Shannon, os quais tiveram maior associação com FLO.



**Figura 10:** Análise de Redundância Canônica (RDA) da relação entre a vegetação no estrato inferior (E3 – eixo y) e de propriedades edáficas nas profundidades P1, P2 e P3 (0-10; 10-20 e 20-40 cm) (eixo X) nos sistemas: Floresta nativa (FLO); Regeneração natural de dois anos (RN2) e sete anos (RN7) em Paragominas, Pará. J: equitabilidade; D: Dominância; H: índice de Shannon; %P, %SI, %ST e %C: proporção de pioneiras, secundárias iniciais, secundárias tardias e clímax.

A análise da relação entre os atributos do solo e da vegetação mostra pouca associação a variáveis do solo na profundidade 3 (20-40 cm) e o estrato mais inferior da

floresta nas áreas RN2 e RN7. O aumento do pH e o aumento do conteúdo de cálcio e potássio desta profundidade tiveram maior associação com a FLO neste estrato.

## **DISCUSSÃO**

### **a) Matriz de dominância da vegetação**

No contexto de paisagem, a porcentagem ocupada pela matriz florestal como possível fonte de propágulos totalizou 59%. Isto é o suficiente para favorecer a restauração em escala de paisagem, de acordo com Crouzeilles e Curran (2016). As manchas que representam sinais de degradação/alteração das dinâmicas naturais dos ecossistemas somam 39%. Desta forma, as áreas circundantes dos sistemas em estudo são predominantemente florestais, o que pode aumentar as possibilidades de êxito com aproveitamento inicial da regeneração natural para restauração das áreas mineradas.

### **b) Vegetação**

No que se refere a abundância de indivíduos, a semelhança entre as áreas RN7 e FLO, indica que houve eficiência no preenchimento inicial da área minerada pela vegetação. No estrato médio, a semelhança na abundância de indivíduos, tanto por parcela quanto por hectare, entre as áreas RN2 e RN7, indicam que aos dois anos já é possível observar uma formação florestal advinda da resiliência do ecossistema ou da contribuição do solo superficial (top soil). No estrato inferior, a menor abundância de indivíduos foi constatada na RN7, o que pode ser atribuído à ocupação do dossel por espécies regenerantes e a redução na incidência de luz no sub-bosque. Tal situação limita o crescimento das pioneiras nos estágios iniciais da fase de estruturação, necessitando da colonização de espécies mais tolerantes a sombra para ocupar os estratos mais inferiores e substituir os indivíduos regenerantes no processo de sucessão florestal.

Os baixos valores de índice de diversidade de Shannon, baixa equabilidade e alta dominância observados nas áreas sob regeneração natural de dois e sete anos indicam que estes locais são predominantemente ocupados por muitos indivíduos de poucas espécies. No âmbito da restauração, esta baixa diversidade e alta dominância podem representar um risco para a trajetória do ecossistema, caso não haja regeneração de espécies com diferentes hábitos ecológicos, haja vista que o grande número de espécies de mesmo



hábito torna o sistema mais susceptível a distúrbios (PICKETT et al., 2009; BRANCALION et al., 2015). Além disso, no encerramento do ciclo de vida destas espécies pode haver uma morte sincrônica dos indivíduos, ocasionando a regressão da sucessão para estágios iniciais (WALCKER e MORAL, 2008). Este processo vem sendo observado em muitas parcelas deste estudo (vide Figura 3, imagem III), sendo que estas áreas estão sendo novamente ocupadas por espécies pioneiras e gramíneas.

Em relação às espécies indicadas pelo IndVal, *Cecropia sp.* se destaca para o estrato superior da RN7. Esta espécie é dominante nas parcelas onde houve uma mortalidade sincrônica dos indivíduos, principalmente de muiravuvuia (*Croton matourensis*). Esta foi a espécie dominante nas áreas sob regeneração natural e a principal responsável pela formação de dossel e fisionomia florestal nos primeiros anos da restauração. Por sua vez, as espécies secundárias iniciais selecionadas como indicadoras dos estratos superior e médio são resultantes da substituição de espécies pioneiras. Nos estratos inferiores de RN2 e RN7 não foi constatada nenhuma espécie indicadora de grupos ecológicos secundária inicial e secundária tardia, sendo todos os indivíduos indicados pertencentes ao grupo ecológico das pioneiras.

As espécies listadas como indicadoras das áreas RN2 e RN7 podem ser consideradas estratégicas para colonizar áreas muito degradadas, como no caso de áreas mineradas. Elas têm grande capacidade de formação de fisionomia florestal nos primeiros anos da restauração ecológica, além de outros importantes benefícios relacionados à recuperação da resiliência local. *Croton matourensis* foi a espécie que melhor caracterizou as áreas RN2 e RN no estrato superior (Valor de indicação de 78%), sendo também uma das mais indicadas para o estrato médio. Esta espécie tem como característica rápido crescimento e ocupação do dossel, rápida reprodução com produção de flores e frutos na maior parte do ano (LIMA e PIRANI, 2008) e a grande produção de biomassa (LOPEZ et al., 2002), dando importante contribuição para recobrir o solo e estimular a atividade da fauna edáfica. Estas características são fundamentais para a recuperação de importantes propriedades e processos ecológicos, fazendo com que a espécie seja tida como estratégica para restauração de áreas degradadas nos primeiros anos da restauração.

### **c) Atributos do solo**

A análise dos resultados de fertilidade do solo indica que os sistemas RN2 e RN7 apresentam atributos químicos próximos e, em alguns casos, melhores que o observado no ecossistema de referência FLO quanto à fertilidade do solo. Para analisar estes resultados vale destacar inicialmente dois importantes aspectos: o pH do solo e o conteúdo de matéria orgânica nos sistemas estudados. Os resultados mostram maiores valores para o pH nos sistemas conduzidos sob a regeneração natural nas profundidades 0-10 e 10-20 cm, o que pode ser atribuído à mistura de substrato com material oriundo de camadas superficiais e superficiais de diferentes níveis de acidez no processo de decapeamento e reconstrução do solo, haja vista o alto desvio padrão associados a estas áreas ou ao uso do solo antes da mineração, o qual era ocupado por pastagens e culturas agrícolas.

Os valores de pH indicam que esta variável teve influência direta na redução da disponibilidade de alumínio trocável e é consequência do aumento da disponibilidade de importantes nutrientes para o solo. Os teores de cálcio e magnésio e consequentemente a soma de bases foram significativamente maiores nas áreas sob regeneração natural em comparação com a floresta controle. Os resultados de matéria orgânica mostram que aos sete anos ocorre um acúmulo de matéria orgânica no solo em RN7, principalmente da deposição de serapilheira das espécies arbóreas. Além do pH, o conteúdo de matéria orgânica pode também ter colaborado para que o sistema RN7 apresentasse o maior conteúdo de cálcio, magnésio, potássio e soma de bases, quando comparado a RN2 e FLO. Isto se deve a importantes contribuições da matéria orgânica para o aumento da capacidade de troca catiônica e consequentemente da fertilidade do solo (BAYER e MIELNICZIK, 2008).

A densidade do solo e porosidade total, importantes variáveis para avaliar a qualidade física do solo com efeitos da compactação (REYNOLDS et al., 2002), mostram que RN7, sete anos após uma completa reconstrução do solo evoluiu de tal maneira a se assemelhar com a floresta de referência na profundidade 0-10 cm. Nas camadas subsuperficiais (10-20 e 20-40 cm), a maior densidade do solo em RN2 e RN7 se deve à presença da camada estéril do solo reconstruído, que normalmente apresenta aumento de cascalho e concreção e uma camada mais adensada, que pode estar influenciando diretamente na mortalidade das espécies pioneiras nos primeiros anos da restauração.

A melhoria na qualidade física do solo nas camadas superficiais em RN7 pode ser confirmada com o comportamento da infiltração de água, que apresentou velocidade de infiltração básica semelhante à constatada na floresta. Este resultado para a RN7 é mais que quatro vezes maior do que o observado em sistemas com plantio de eucalipto e pastagem abandonada em Latossolo muito argiloso na mesma região do presente estudo (CASTRO et al., 2016). A infiltração de água no solo é influenciada principalmente pela composição estrutural do solo, em especial pela presença de macroporos (REICHERT et al., 2003; BRADY e WEIL, 2013). Eles são formados pelo aumento da agregação do solo e atividade biológica (Figura 2-V), indicando haver uma melhoria na qualidade estrutural do solo sete anos após sua reconstrução em RN7 na profundidade 0-10 cm. Os resultados de infiltração de água no solo nos sistemas estudados também demonstram que o solo reconstruído apresenta alta drenagem, o que é fundamental para reduzir o escoamento superficial e a ocorrência de processos erosivos (REICHERT et al., 2003; REICHERT et al., 2007).

#### **d) Relações entre vegetação e solo**

Quanto ao comportamento da vegetação na RDA, a heterogeneidade no padrão de distribuição das parcelas de vegetação no estrato superior da área RN7 se deve ao processo de senescência natural e mortalidade sincrônica na maioria das parcelas. Observa-se também um predomínio de espécies pioneiras, gerando baixa diversidade e alta dominância nas áreas RN2 RN7 nos três estratos estudados.

Tendo em vista a transição sucessional, que normalmente ocorre a partir de cinco anos para as etapas iniciais de sucessão (SALOMÃO et al., 2012), as espécies do grupo ecológico das secundárias iniciais são as únicas capazes de crescer rapidamente em um sub-bosque sombreado durante uma rápida fase de maturação (BRANCALION et al., 2015). Dessa forma, a mortalidade sincrônica das espécies pioneiras inicialmente estabelecidas está favorecendo a reabertura da área para novas espécies colonizadoras, o que pode estar afetando os objetivos da restauração.

Estes resultados indicam que são necessárias ações de manejo adaptativo nos primeiros anos da restauração sob regeneração natural com a introdução de espécies arbóreas, em especial do grupo ecológico das secundárias iniciais. Aos dois anos se

observa um ingresso e domínio de espécies arbóreas no estrato médio e a presença de alguns indivíduos no estrato superior. Dessa forma, recomenda-se que o plantio com espécies nativas seja feito no terceiro ano com espécies tolerantes a sombra. A mortalidade e a grande heterogeneidade de parcelas em RN7 indicam a existência de um retrocesso na trajetória do ecossistema, evidenciando que as espécies secundárias iniciais não estão sendo suficientes para garantir a trajetória sucessional da restauração.

No que se refere à relação entre a vegetação e atributos do solo, o pH foi o atributo do solo que esteve significativamente associado ao comportamento da vegetação das áreas sob regeneração natural nos estratos superior e médio. Este aumento do pH se deve ao aumento dos macronutrientes cálcio e magnésio, fundamentais para fertilidade do solo e para o bom desenvolvimento da vegetação, pois a redução da acidez tem efeito com a redução dos teores de alumínio trocável e o aumento da disponibilidade de nutrientes (NOVAES et al., 2007). Já no ecossistema florestal, a significância do alumínio nos estratos superior e médio se deve a acidez, que é natural nos solos sob floresta na região (ARAUJO et al., 2011).

No estrato médio e na profundidade de 0-10 cm, somente a densidade do solo esteve entre os atributos físicos significativamente relacionados ao comportamento da vegetação. As parcelas relacionadas com um aumento da densidade foram as que tiveram muitos indivíduos arbóreos mortos por senescência, ocasionando a exposição do solo. Isto pode ter favorecido adensamento nas camadas mais superficiais pelo empacotamento das partículas do solo, que normalmente ocorre pelo efeito da água da chuva (PANINI et al., 1997; CARVALHO, 1999).

## **CONCLUSÕES**

1 – Mesmo com a inserção numa paisagem predominantemente florestal, a comunidade arbórea que inicialmente colonizou os sistemas sob regeneração natural constituiu-se apenas de um agrupamento transitório de poucas espécies nativas com grandes chances de desaparecer de maneira sincrônica nos primeiros anos da restauração.

2 – A baixa diversidade de espécies arbóreas nos diferentes estratos das áreas sob regeneração natural e a baixa regeneração de indivíduos com diferentes hábitos ecológicos dificultam a trajetória do ecossistema após a morte de indivíduos de espécies

pioneiras, ocasionando a exposição do solo à colonização por espécies pioneiras de baixa diversidade ou herbáceas, como gramíneas exóticas.

3 – O tratamento de restauração por regeneração natural aos sete anos foi eficiente na recuperação de importantes atributos relacionados à qualidade do solo em superfície, como a matéria orgânica, disponibilidade de nutrientes, densidade e infiltração de água no solo.

4 – São necessárias intervenções adaptativas no terceiro ano para corrigir a trajetória do ecossistema, principalmente com a introdução de espécies secundárias iniciais para garantir o sucesso da restauração durante a fase de transição da sucessão ecológica.

## REFERÊNCIAS

BARROS, D. A.; PEREIRA, J. A. A.; FERREIRA, M. M.; SILVA, B. M.; FERREIRA FILHO, D.; NASCIMENTO, G. O. Soil physical properties of high mountain fields under bauxite mining. **Ciência agrotecnologia**, Lavras, v. 37, n. 5, p. 419-426, 2013.

BASTOS, T. X.; PACHÊCO, N. A.; FIGUEIREDO, R. O.; DA SILVA, G. F. G. **Características Agroclimáticas do Município de Paragominas**. Belém: Embrapa Amazônia Oriental (Documentos, 228), 21 p., 2005.

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.

BIZUTI, D. T. G.; TANIWAKI, R. H.; SILVA, R. J.; DA COSTA, C. O. R.; RONCON, T. J. VIANI, R.A.G.; P. H. S. BRANCALION. Influência da composição de espécies florestais no microclima de sub-bosque de plantios jovens de restauração. **Scientia Forestalis**, volume 44, n. 112, 2016.

BRANCALION, P. H.; GANDOLFI, S.; RODRIGUES, R. R. **Restauração Florestal**. São Paulo: Oficina de textos, 2015.

CADENASSO, M. L.; PICKETT, S. T. A.; WEATHERS, K. C.; JONES, C. G. A framework for a theory of ecological boundaries. **BioScience**. 53:750–758, 2003.

CARVALHO, M.C.S. **Práticas de recuperação de uma pastagem degradada e seus impactos em atributos físicos, químicos e microbiológicos do solo**. 1999. 103 f. Tese (Doutorado em Agronomia) – Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Universidade de São Paulo, Piracicaba, São Paulo, 1999.

CROUZEILLES, R.; CURRAN, M. Wich landscape size best predicts the influence of forest cover on restoration success? A global meta-analysis on the scale of effect. **Jornal of applied ecology**, 2016, 53, 440-448.

CÉSAR, R. G.; HOLL, K. D.; GIRÃO, V. J.; MELLO, F. N.A.; VIDAL, E.; ALVES, M. C.; BRANCALION, P. H.S. Evaluating climber cutting as a strategy to restore degraded tropical forests. **Biological conservation** 201, 309-313, 2016.

CHAZDON, R. L.; GUARIGUATA, M. R. Natural regeneration as a tool for large-scale forest restoration in the tropics: prospects and challenges. **Biotrópica** 48(6): 716-730, 2016.

DUFRENE, M.; LEGENDRE, P. Species assemblages and indicator species: the need for flexible asymmetrical approach. **Ecological Monographs**, v. 67, n. 3, p. 345-366, 1997.

EARTH EXPLORER. Imagem LandSat-8. Disponível em: <http://earthexplorer.usgs.gov/>. Acesso em: 04/04/2017.

ENGEL, V. L.; PARROTA, J. A. Na evaluating of direct seeding for reforestation of degraded lands in central São Paulo state, Brazil. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, V. 152, n. 1-3, p. 169-191, 2001.

EMBRAPA. 1997. **Manual de Métodos de Análise de Solo**. 2 ed., Rio de Janeiro: EMBRAPA-CNPq, 1997.

HOLL, K. D. Factors Limiting Tropical Rain Forest Regeneration in Abandoned Pasture: Seed Rain, Seed Germination, Microclimate, and Soil. **BIOTROPICA** 31(2): 229-242. 1999.

HÜTTL, R. F.; WEBER, E. Forest ecosystem development in post-mining landscapes: a case study of the Lusatian lignite district. **Naturwissenschaften**, 88:322–329, 2001.

LATAWIEC, A. E.; CROUZELLES, R.; BRANCALION, P. H. S.; RODRIGUES, R. R.; SANSEVERO, J. B.; DOS SANTOS, J. S.; MILLS, M.; NAVE, A. G. STRASSBURG, B. B. Natural regeneration and biodiversity: a global meta-analysis and implications for spatial planning. **Biotrópica** 48(6): 844-855, 2016.

LOPEZ, C. V. da C.; BRIENZA JUNIOR, S.; LEÃO, N. V. M.; FERREIRA, A. R.; ROSA, E. P. de A.; SANTOS, I. A. dos. **Fenologia de espécies da floresta secundária potencialmente acumuladoras de fósforo**. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE SISTEMAS AGROFLORESTAIS, 4., 2002, Ilhéus. Anais. Ilhéus: CEPLAC-CEPEC, 2002.

LIMA, L. R.; PIRANI, J. R. Revisão taxonômica de *Croton* sect. *Lamprocroton* (Müll. Arg.) Pax (Euphorbiaceae s.s.). **Biota Neotropica**, v.8, n.2, p.177-231, 2008.

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.

PANINI, T.; TORRI, D.; PELLEGRINI, S.; PAGLIAI M.; SANCHIS, M.P. Salvador. A theoretical approach to soil porosity and sealing development using simulated rainstorms. **Catena** 31, 1997, 199-218.

PARROTTA, J. A.; KNOWLES, O. H.; WUNDERLE JR. J. M. Development of floristic diversity in 10-year-old restoration forests on a bauxite mined site in Amazonia. **Forestry Ecology and Management** 99 p.21–42, 1997.

PICKETT, S.T.A.; CADENASSO, M.L.; BARTHA, S. Implications from the Buell-Small Succession Study for vegetation restoration. **Applied Vegetation Science** 4: 41-52, 2001.

PICKETT, S.T.A.; CADENASSO, M.L.; MEINERS, S. J. Ever since Clements: from succession to vegetation dynamics and understanding to intervention. **Applied Vegetation Science** 12: 9–21, 2008.

PULSFORD, S. A.; LINDERNMAYER, D. B.; DRISCOLL, D. A. A succession of theories: purging redundancy from disturbance theory. **BioScience** 751. Vol. 53 No. 8, 2003.

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.

REICHERT, J. M.; SUZUKI, L. E. A. S.; REINERT, D. J. Compactação do solo em sistemas agropecuários e florestais: identificação, efeitos, limites críticos mitigação. In: Tópicos em Ciência do Solo. **Sociedade Brasileira de Ciência do Solo**, 2007. p.49-134.

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.

ROCHA, J. E. C.; BRASIL NETO, A. B.; NORONHA, N. C.; GAMA, M. A. P.; CARVALHO, E. J. M. SILVA, A. R.; DOS SANTOS, C. R. C. Organic matter and physical-hydric quality of an Oxisol under eucalypt planting and abandoned pasture. **CERNE**, v. 22 n. 4. p. 381-388, 2016.

RODRIGUES, R. R.; LIMA, R. A. F.; GANDOLFI, S.; NAVE, A. G. On the restoration of high diversity forests: 30 years of experience in the Brazilian Atlantic Forest. **Biological Conservation** 142 1242–1251, 2009.

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

SALOMÃO, R. P. VIEIRA, I. C. G.; BRIENZA JÚNIOR, S.; AMARAL, D. D.; SANTANA, A. C. Sistema Capoeira Classe: uma proposta de sistema de classificação de estágios sucessionais de florestas secundárias para o estado do Pará. Bol. Mus. Para. **Emílio Goeldi. Cienc. Nat.**, Belém, v. 7, n. 3, p. 297-317, 2012.

SALOMÃO, R. P. **Restauração Florestal de Precisão: dinâmica e espécies estruturantes. Evolução de áreas restauradas em uma Unidade de conservação na Amazônia** – Porto Trombetas, PA. Novas edições acadêmicas, 2015.

SEPOF. **Estatística Municipal.** 2014. Available at: <http://fapespa2.pa.gov.br/pdf/estatisticaMunicipal/pdf/Paragominas.pdf> . Acesso em: 10 março 2014.

VIANA, J. H. M. **Determinação da densidade de solos e de horizontes cascalhentos.** Sete Lagoas: Embrapa Milho e Sorgo (Comunicado Técnico, 154), 2008.

WALKER, L. R.; R. DEL MORAL. **Transition Dynamics in Succession: Implications for Rates, Trajectories and Restoration.** In *New Models for Ecosystem Dynamics and Restoration*, edited K. Suding e R. J. Hobbs, 33– 49, 2008.

WALKER, J.; REDDELL, P. **Retrogressive succession and restoration in old landscapes.** In: Walker, L.R., Walker, J. & Hobbs, R.J. (eds.) *Linking restoration and ecological succession.* pp. 69–89. Springer, New York, NY, USA, 2007.



## **Plantio de mudas e procedimentos operacionais para restauração de áreas mineradas após a lavra de bauxita: um estudo de caso em Paragominas, Amazônia**

### **RESUMO**

O presente trabalho teve como objetivo investigar a restauração florestal em função do plantio de mudas e procedimentos operacionais de em sistemas com dois e sete anos após a construção do solo em decorrência da mineração de bauxita, por meio de atributos da vegetação estabelecida e do solo construído. O estudo foi realizado em uma área de atividade mineraria pertencente a Mineração Paragominas S.A., localizada no município de Paragominas, Sudeste do Estado do Pará. Avaliou-se: (I) a abundância de espécies, famílias, dominância, diversidade de Shannon e a distribuição das espécies arbóreas nos diferentes grupos ecológicos e grupos funcionais em três estratos: inferior, médio e superior; (II) as espécies indicadoras de cada sistema por meio do valor de espécies indicadoras (IndVal); e (III) os atributos do solo: pH em H<sub>2</sub>O e KCl, fósforo; potássio; cálcio; magnésio; alumínio; soma de bases; capacidade de troca catiônica; densidade do solo; porosidade total e infiltração de água no solo. No estrato superior, o plantio de mudas com sete anos foi eficiente na formação de uma comunidade florestal próxima a uma floresta de referência no que se refere a diversidade e equabilidade. Porém a falta de um critério na distribuição das mudas em campo e a operação de capina para controle de indivíduos regenerantes nos cinco primeiros anos afetou não somente a formação de uma fisionomia florestal, como também permitiu a ocorrência de grandes áreas com solo exposto, resultando em substrato com sérias limitações físicas e estruturais no sistema de plantio com sete anos.

**Palavras-chaves:** Sucessão ecológica; mineração de bauxita; Restauração florestal; grupos ecológicos e funcionais de plantio; Atributos físicos e químicos do solo.

### **INTRODUÇÃO**

A mineração constitui uma atividade essencial para o desenvolvimento e o progresso da sociedade. No entanto, os danos ambientais gerados pela atividade são tão grandes que, muitas das vezes, é necessária uma completa reconstrução dos ecossistemas que foram alterados (HÜTTL E WEBER, 2001; SALOMÃO et al., 2016). Isto se deve à redução na capacidade de resiliência e auto sustentação dos ecossistemas nas áreas impactadas, necessitando da intervenção humana para retomar os processos naturais e equilíbrio dos ecossistemas (MARTINS et al., 2015).

Uma alternativa para acelerar a restauração de áreas degradadas é o reflorestamento com espécies nativas, de tal modo a facilitar a criação de um ambiente favorável para desencadear a colonização da flora e da fauna (BRANCALION et al., 2015). Para tanto,

é feita a construção e o preparo do solo, por meio de escarificação e é realizado o plantio de mudas de diversas espécies nativas, além de diversas práticas de condução e manutenção das áreas sob restauração. Com estes procedimentos, almeja-se a formação de uma floresta com uma boa estruturação inicial e uma composição florística com as principais famílias botânicas existentes no ecossistema de referência, de tal modo que o sistema em reconstrução consiga prosseguir uma trajetória de auto sustentação (SALOMÃO, 2015).

Diversas estratégias têm sido propostas e testadas para aumentar a eficiência dos plantios em áreas degradadas, a exemplo do modelo de restauração ecológica baseada na utilização de dois grupos funcionais de plantio: (1) grupo de recobrimento, caracterizado por algumas poucas espécies selecionadas para a função do recobrimento inicial da área, e (2) grupo de diversidade, caracterizado por muitas espécies que não são necessariamente boas sombreadoras, mas exercem funções fundamentais para garantir a continuidade da restauração (NAVE, 2005; RODRIGUES et al., 2009; RODRIGUES et al., 2011; NBL, 2013). De acordo com Brancalion et al. (2016), a utilização de proporções equilibradas destes grupos é fundamental para aumentar a eficiência do plantio e estimular o processo de sucessão secundária.

No entanto, o plantio e desenvolvimento da restauração em áreas de reflorestamento somente se consolidará com o crescimento dos indivíduos plantados até a fase adulta, seguido do florescimento, frutificação e dispersão das suas sementes, de modo que seus descendentes possam se estabelecer, desencadeando dinâmicas naturais de sucessão ecológica (PICKETT et al., 2009). Brancalion et al. (2015) advertem que, se os processos ecológicos responsáveis pela sustentação e perpetuação florestal não forem estabelecidos de maneira adequada, seja por erros na escolha do método ou na implantação e condução da restauração, toda comunidade florestal plantada poderá entrar em declínio ao longo do tempo, afetando a trajetória da restauração e fazendo com que parte ou todo o projeto de restauração seja perdido.

Dessa forma, necessita-se que a comunidade vegetal plantada possua alta diversidade e que suas espécies possuam diferentes exigências ecológicas (PICKETT et al., 2009), haja vista que distúrbios naturais favoreçam o processo de substituição de espécies com trajetória sucessional em direção a floresta desejada (BRANCALION, 2015). Logo, é fundamental que os indivíduos plantados sejam corretamente selecionados

e distribuídos, visando reduzir a mortalidade inicial e que rapidamente seja formada uma fisionomia florestal para cobrir o solo e estimular dinâmicas naturais (NAVE, 2005; NBL, 2013).

Neste contexto, constata-se que, além da prática de reflorestamento os procedimentos operacionais relacionados ao solo são determinantes na restauração. No caso da mineração de superfície, o solo é completamente removido e posteriormente, reconstruído, fazendo com que seus atributos físicos, químicos e biológico sejam complemente alterados. Dessa forma, um aspecto chave na restauração ecológica de áreas mineradas é a recuperação dos atributos do solo, em especial seus atributos físicos e estruturais (LUNARDI NETO et al., 2008; BARROS et al., 2011) e a disponibilidade de nutrientes para o desenvolvimento da vegetação (JÓZEFOWSKA et al., 2017).

No entanto, a carência de informações e a necessidade de aprimoramento e revisão de metodologias de restauração de acordo com as peculiaridades de cada região, reforçam a importância da avaliação constante de tais procedimentos, para que os mesmos possam ser melhorados ou até mesmo descartados para futuros plantios. Isto proporciona a condução da restauração de maneira precisa e reduz a possibilidade de tempo e recursos serem perdidos (WALKER E DEL MORAL, 2008).

As primeiras experiências com o plantio adensado de mudas nativas para restauração de áreas mineradas pela lavra de bauxita no sudeste do estado do Pará teve início no ano de 2009 e, desde então, vem sendo usado nos projetos de restauração da empresa Mineração Paragominas S.A. Este trabalho busca responder as seguintes questões: a) O plantio de mudas nativas e os procedimentos operacionais adotados são suficientes para garantir a sustentabilidade dos ecossistemas reconstruídos? b) O método e os procedimentos adotados são suficientes para garantir um substrato de qualidade, com base em atributos físicos e químicos do solo?

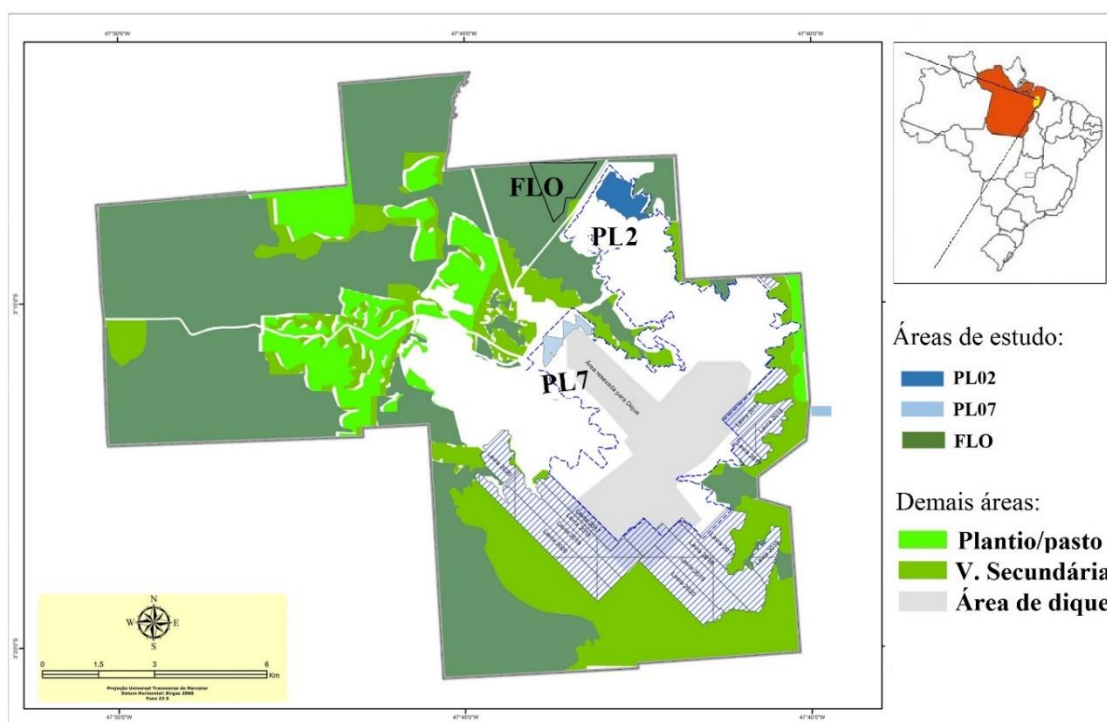
As hipóteses testadas foram: a) as espécies plantadas sobreviventes possuem alta diversidade e equabilidade (b) a disposição das mudas no plantio e práticas de capina afetará a formação de uma fisionomia florestal e (c) a ocorrência de áreas com solo exposto resultará em substrato com sérias limitações físicas e estruturais. Dessa forma, o presente trabalho teve como objetivo investigar a restauração florestal em função do plantio de mudas e de procedimentos operacionais aplicados em áreas com dois e sete

anos após a reconstrução do solo em decorrência da mineração de bauxita, por meio de atributos da vegetação estabelecida e do solo construído.

## MATERIAIS E MÉTODOS

### Localização da área de estudo

O estudo foi realizado em uma área de mineração de bauxita pertencente à Mineração Paragominas S.A., empresa do grupo Hydro, denominada Platô Miltônia 3, no município de Paragominas, PA. A área é parte da Microrregião de Paragominas e Mesorregião Sudeste do Estado do Pará (Figura 1). Na área de estudo o clima é do tipo Aw, segundo a classificação de Köppen, com período de estiagem entre os meses de junho a dezembro (BASTOS et al., 2005), temperatura média anual de 25°C, regime pluviométrico entre 2.250 e 2.500 mm e umidade relativa do ar média de 85% (SEPOF, 2014).



**Figura 1:** Localização das áreas com os diferentes sistemas de restauração estudados.

O processo de mineração de bauxita envolve as seguintes etapas: (1) a supressão vegetal, (2) decapeamento, (3) perfuração, (4) desmonte, (5) escavação, (6) carregamento, (7) transporte e (8) restauração florestal das áreas degradadas, conforme a Figura 2. No

ano de 2009, a área total que foi restaurada com o método de plantio foi de 71,44 ha e 21,04 ha com o método da indução da Regeneração natural (total de 92,48 ha). Já no ano de 2014, a área restaurada com o plantio foi de 240,36 ha, 44,78 ha foram através da metodologia de nucleação e 238,6 ha com o método da indução da regeneração natural (total de 521,98 ha).



**Figura 2.** Processo de mineração de bauxita e restauração de áreas degradadas. Fonte: Martins, 2016.

### Áreas de estudo

O estudo foi desenvolvido em duas áreas com plantio de mudas: uma de dois anos, implantada em março e abril de 2014 (**PL2**) e outra de sete anos, implantada em maio de 2009 (**PL7**) (Figuras 2, 3 e 4). Os procedimentos operacionais realizados nos plantios estão descritos na tabela 1. Para avaliar a eficiência da restauração, foi usado como ecossistema de referência um fragmento de floresta nativa alterada (**FLO**) – Floresta Ombrófila densa, com registro de exploração madeireira convencional realizada no ano de 2003.



**Figura 3:** Áreas sob plantio de mudas com dois anos (**PL2**): área de plantio com agrupamento de espécies de diversidade (I); torção adensada de substrato (II) e copa das árvores de espécies de recobrimento (III).



**Figura 4:** Áreas sob plantio de mudas com sete anos (PL7): área de plantio com agrupamento de espécies plantadas de diversidade (I); perfil adensado de solo (II) e fisionomia florestal em local com agrupamento de espécies plantadas de recobrimento (III).

**Tabela 1:** Procedimentos operacionais efetuados nas áreas de plantio implantados no ano de 2014 (PL2) e 2009 (PL7).

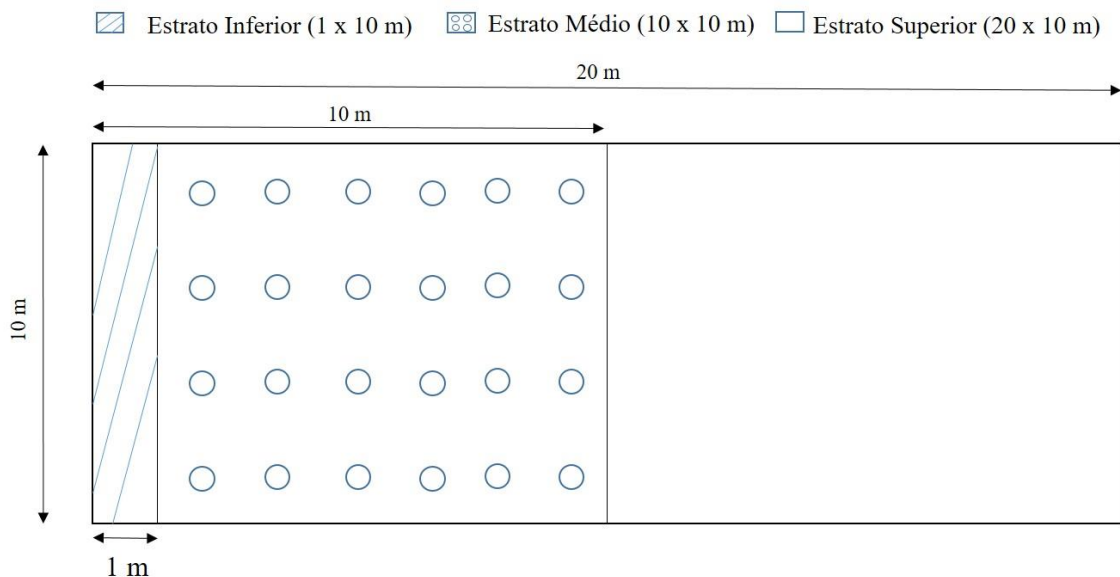
Atividade padrão da empresa	Características
<b>1) Reconstrução do substrato:</b>	
Espalhamento do estéril	Material depositado em faixas na área minerada
Cobrimento do estéril com top soil	Profundidade variando de 10 a 20 cm
<b>2) Preparo do substrato:</b>	
Subsolagem	Foi efetuada na linha do plantio, numa profundidade de 60 cm.
Adubação simultânea com a subsolagem	Aplicação de Fosfato natural reativo (33% P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> total, 10% Solúvel de ácido Cítrico)
Aplicação de Calcário (Calagem)	300 kg ha <sup>-1</sup>
Abertura de covas	Realizada manualmente com o uso de escavadeira manual, enxadas ou enxadões. As covas possuem dimensões: 30 x 30 x 30 cm.
Adubação nas covas	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
<b>3) Plantio:</b>	
Densidade do plantio	Espaçamento 3 x 3 m (1.111 indivíduos ha <sup>-1</sup> )
Número de espécies	Plantio com sete anos: aproximadamente 140 espécies; Plantio com dois anos: 112 espécies
Tipo de mudas	Saco plástico
Forma de plantio	Manual
Disposição das mudas	Aleatória
Período de plantio	Mai e Junho (PL7) e janeiro a junho (PL2)
Replantio	Identificação e substituição das plantas mortas nos primeiros meses após o plantio.
Controle de Formigas	Dosagem de isca granulada: 10 g m <sup>2</sup>
<b>4) Pós plantio:</b>	
Adubação de cobertura	NPK (06:30:06): 200g planta <sup>-1</sup>
Controle da matocompetição, controlando também	Realizada até o quinto ano no PL7 por meio de capina e aplicação de herbicida.



O solo de FLO é classificado como Latossolo Amarelo Distrófico, de textura muito argilosa (conteúdo de argila  $>700 \text{ g kg}^{-1}$ ) e relevo suave ondulado. PL2 e PL7 apresentam um substrato reconstruído de textura muito argilosa (conteúdo de argila  $>700 \text{ g kg}^{-1}$ ) e relevo suave ondulado. A área PL2 está adjacente ao remanescente florestal nativo estudado (FLO) e a área PL7 está adjacente a um Fragmento de floresta secundária (50 anos) e a 200 m de um remanescente florestal nativo.

### Delineamento amostral do solo e da vegetação

O delineamento amostral seguiu um esquema de amostragem inteiramente ao acaso. Em cada sistema, numa área total de aproximadamente de oito hectares, foram estabelecidas aleatoriamente 15 parcelas de 20 m x 10 m (Figura 5), nas quais foram realizados: inventário da vegetação arbórea; coleta de amostras de solo com estrutura deformada e indeformada e a determinação em campo da infiltração de água no solo.



**Figura 5:** Parcela amostral e subparcelas utilizadas para amostragem da vegetação e solos nas áreas em estudo.

Para amostragem da vegetação, em cada parcela, foram estabelecidas três sub parcelas (Figura 4), correspondendo a três estratos da vegetação, para identificação de todos os indivíduos equivalentes a cada estrato, sejam plantados ou regenerantes, conforme apresentado na Tabela 2.

**Tabela 2:** Critérios para identificação das espécies arbóreas nos diferentes estratos e dimensões das parcelas.

Estratos	Critério	Área da Parcela
Superior	DAP $\geq$ 5 cm	10 x 20 m (200 m <sup>2</sup> )
Médio	DAP $\geq$ 1 cm e $<$ 5 cm	10 x 10 m (100 m <sup>2</sup> )
Inferior	$\geq$ 30 cm de Altura e $<$ 1 cm de DAP	1 x 10 m (10 m <sup>2</sup> )

As amostras de solos foram obtidas nas profundidades 0-10; 10-20 e 20-40 cm e foram coletadas aleatoriamente dentro das parcelas. As amostras indeformadas foram coletas em três pontos e homogeneizadas, para gerar uma amostra composta por profundidade e obter as variáveis: pH em H<sub>2</sub>O, pH em KC; acidez potencial; cálcio, magnésio e alumínio trocáveis, fósforo disponível, potássio e matéria orgânica. Para obter as amostras com estrutura indeformada, obteve-se um monólito de solo esculpido, com aproximadamente 10 x 10 x 10 cm de volume e, em seguida, foi impregnado com uma mistura de cola, água e álcool hidratado em numa proporção de 5:4:1 respectivamente. Com estas amostras foram obtidas as variáveis: densidade do solo e porosidade total, perfazendo 15 repetições por sistema e por profundidade. Próximo ao local de coleta de amostras deformadas e indeformadas, foi determinada, por parcela, a infiltração de água no solo, perfazendo 15 repetições por sistema.

### Variáveis analisadas

Foram calculadas as seguintes medidas ecológicas nos três estratos amostrados: (1) Abundância de indivíduos por espécie e famílias; (2) Índice de diversidade de Shannon e Winer (H'), (3) Dominância e (4) Equabilidade, as quais foram calculadas com o auxílio do software PAST.



A observação das espécies dentro dos grupos de recobrimento e diversidade foi realizada por meio de avaliação das áreas recém-restauradas (com um e dois anos) e confirmadas em plantios de quatro a sete anos. Foram observados o porte e o desenvolvimento da copa, visando sombreamento e cobertura do solo. Com isso foram identificadas as espécies mais sombreadoras, as quais foram classificadas como espécies de recobrimento, independentemente do grupo ecológico, conforme Brancalion et al. (2015). As demais espécies plantadas que não foram boas sombreadoras foram classificadas como de biodiversidade. A lista completa das espécies e seus grupos funcionais encontram-se no Apêndice 1.

Quanto as variáveis de solos, foram obtidos os atributos químicos: pH em H<sub>2</sub>O, pH em KCl 1M; acidez potencial (H+Al) (cmol<sub>c</sub> dm<sup>-3</sup>); cálcio, magnésio e alumínio trocáveis (cmol<sub>c</sub> dm<sup>-3</sup>), fósforo disponível (mg dm<sup>-3</sup>), potássio (cmol<sub>c</sub> dm<sup>-3</sup>) e matéria orgânica (g kg<sup>-1</sup>). Os métodos e procedimentos laboratoriais estão descritos em EMBRAPA (1997) e foram realizadas no laboratório de química do solo da Universidade Federal Rural da Amazônia.

A análise da densidade do solo seguiu a metodologia do torrão, conforme Viana (2008). A porosidade total (Pt) foi calculada pela equação  $Pt = (1 - Ds/Dp)$ , sendo Dp igual a 2,65 kg dm<sup>-3</sup>, média de solos minerais. A infiltração de água do solo foi determinada pelo método dos anéis concêntricos, usando-se um anel metálico maior, com 20 cm de diâmetro e 20 cm de altura e um anel menor, com 10 cm de diâmetro e 10 cm de altura. Ambos os anéis foram cravados ao solo de maneira concêntrica. Com esses dados foi determinada a infiltração acumulada (IA), a qual corresponde à função entre a 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 Kostiakov (1932) (1):

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

Derivando-se a função da estimativa da infiltração pelo tempo, encontra-se o modelo potencial da velocidade de infiltração de água no solo (VI) (2):

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

A avaliação dos atributos físicos e químicos do solo como variáveis explicativas das características da vegetação foi efetuada por meio da análise de redundância (RDA) (BRAAK e SMILAUER, 1998), Tal Análise utiliza os dados ambientais para ordenar as amostras da vegetação, por meio de um modelo linear. A análise foi realizada com o auxílio do software R.

## RESULTADOS

Na Tabela 3 são apresentadas as variáveis de riqueza e diversidade da vegetação nas diferentes áreas e estratos da vegetação. No estrato superior as áreas PL2 e PL7 apresentaram 18 e 49 espécies sobreviventes do plantio e 6 e 5 espécies regenerantes, respectivamente. A abundância de indivíduos por parcela em PL7 se deve predominantemente aos indivíduos arbóreos plantados, ao contrário de PL2, no qual há um equilíbrio entre espécies plantadas e regenerantes. Não houve diferenças significativas quanto ao índice de diversidade de Shannon, equabilidade e dominância entre PL7 e FLO neste estrato.

**Tabela 3:** Variáveis de diversidade nos estratos superior (DAP  $\geq$  5 cm), médio (DAP  $\geq$  1 cm e  $<$  5 cm) e inferior ( $\geq$  30 cm de Altura e  $<$  1 cm de DAP) e nas áreas sob plantio de mudas implantados no ano de 2014 (PL2) e 2009 (PL7) e no fragmento de floresta nativa (FLO) em Paragominas, Amazônia.

Parâmetros	Sistemas		
	PL2	PL7	FLO
<b>Estrato superior:</b>			
Riqueza de espécies plantadas	18	49	-
Riqueza de espécies regenerantes	6	5	69
Riqueza total de famílias	14	23	38
Abundância Ind.plan. (ind parcela <sup>-1</sup> )	4,6 $\pm$ 3,0	8,3 $\pm$ 3,2	-
Abundância Ind.regen. (ind parcela <sup>-1</sup> )	5,0 $\pm$ 2,9b	1,7 $\pm$ 0,95c	26,9 $\pm$ 4,7a
Diversidade de Shannon ( <i>H'</i> )	1.2 b	1.95 a	2.43 a
Equabilidade:	0.92 ns	0.98 ns	0.91 ns
Dominância	0.37 a	0.16 b	0.12 b
<b>Estrato médio:</b>			
Riqueza de espécies plantadas	23	12	-
Riqueza de espécies regenerantes	10	12	66
Riqueza total de famílias	20	15	36
Abundância Ind.plan. (ind parcela <sup>-1</sup> )	4,5 $\pm$ 2,13	2,1 $\pm$ 1,3	-
Abundância Ind.regen. (ind parcela <sup>-1</sup> )	4,1 $\pm$ 3,1b	4,9 $\pm$ 7,1b	34,8 $\pm$ 14,0a
Diversidade de Shannon ( <i>H'</i> )	1.51 b	0.84 c	2.27 a

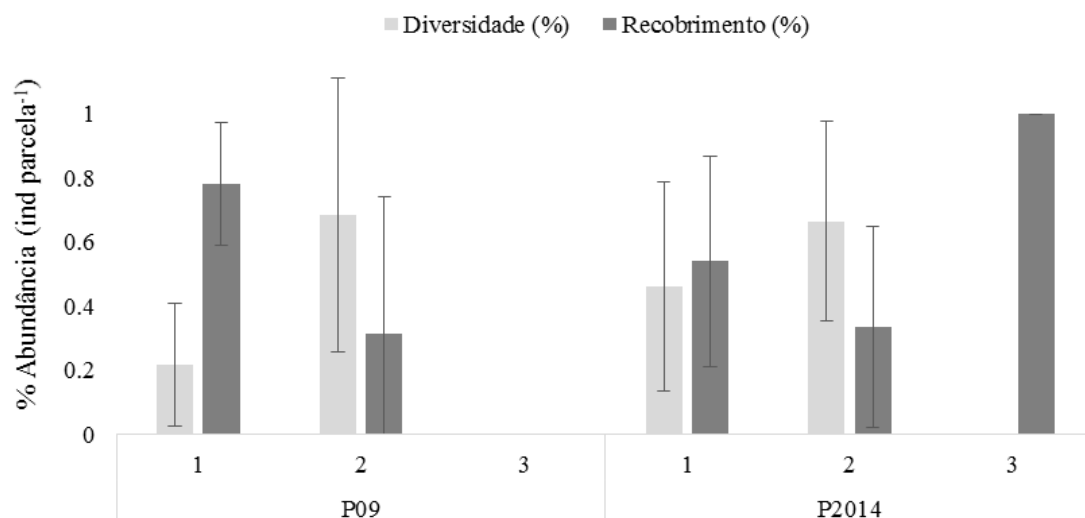
Equabilidade:	0.94 ns	0.91 ns	0.87 ns
Dominância	0.25 b	0.54 a	0.15 c
<b>Estrato inferior:</b>			
Riqueza de espécies plantadas	2	0	-
Riqueza de espécies regenerantes	8	17	23
Riqueza total de famílias	7	11	15
Abundância Ind.plan. (ind parcela <sup>-1</sup> )	1	0	-
Abundância Ind.regen. (ind parcela <sup>-1</sup> )	3,5±2,5b	5,7±2,4a	5,5±4,6a
Diversidade de Shannon ( <i>H'</i> )	0.41 ns	0.80 ns	0.96 ns
Equabilidade:	0.77 b	0.75 b	0.93 a
Dominância	0.69 ns	0.39 ns	0.48 ns

\*Médias seguidas de letras iguais nas linhas não diferem estatisticamente segundo o teste de Tukey (5% de significância).

Quanto ao estrato médio, a riqueza de espécies plantadas de PL2 é quase o dobro de PL7. Em relação à riqueza de indivíduos regenerantes, há um equilíbrio entre as áreas plantadas. A abundância de indivíduos regenerantes é o dobro da abundância indivíduos plantados em PL7. Por sua vez, PL7 apresentou o menor índice de diversidade de Shannon e a maior dominância em relação a PL2 e FLO, ao contrário do observado no estrato superior.

No estrato inferior, a riqueza de espécies se deve exclusivamente à regeneração natural, sendo que a riqueza de espécies regenerantes em PL7 é mais que o dobro da observada em PL2. Não houve diferenças significativas entre os sistemas sob plantio e a floresta no que se refere aos índices de diversidade de Shannon e dominância.

Na Figura 5 são apresentadas as proporções dos indivíduos arbóreos plantados em grupos de diversidade e recobrimento. Observa-se que, no estrato superior, cerca de 80% dos indivíduos são espécies de recobrimento em PL7, já no estrato médio nota-se uma tendência inversa: cerca de 70% dos indivíduos pertencem ao grupo de diversidade. No sistema PL2 nota-se uma proporção média muito aproximada entre os grupos de recobrimento e diversidade no estrato superior, enquanto que no estrato médio, mais de 70% dos indivíduos pertencem ao grupo de diversidade. Por sua vez, um indivíduo plantado foi amostrado no estrato inferior, sendo pertencente ao grupo de recobrimento.



**Figura 5:** Proporção de espécies de diversidade e recobrimento nas áreas de restauração sob plantio de mudas efetuado no ano de 2014 (PL2) e 2009 (PL7), nos diferentes estratos: (1) superior; (2) médio e (3) inferior em área de restauração em Paragominas, PA, Brasil.

Na tabela 4 são apresentados os valores de indicação das espécies (IndVal) no estrato superior. Do total de 147 espécies analisadas, 30 foram selecionadas como indicadoras entre os diferentes sistemas. No sistema PL7, cinco espécies foram selecionadas, as quais apresentam as seguintes características: (1) todas são originadas do plantio; (2) todas pertencem ao grupo funcional de recobrimento e (3) as espécies pertencem a diferentes grupos ecológicos: pioneiras, secundárias iniciais e secundárias tardias. No sistema PL2, três espécies foram classificadas como indicadoras, duas oriundas da regeneração natural e uma do plantio, todas pioneiras e espécies de diversidade. A espécie *Anadenanthera peregrina* foi classificada como indicadora em comum nas áreas PL2 e PL7 neste estrato. Na FLO, 21 espécies foram selecionadas, as quais pertencem a diferentes grupos ecológicos.

**Tabela 4:** Relação das espécies, grupo a que foram indicadas pela IndVal e valores de indicação (VI) para o estrato superior (DAP  $\geq$  5 cm). Foram relacionadas somente as espécies que apresentaram valores significativos, segundo teste de “Monte Carlo” para  $p \leq 0,05$ .

Estrato superior							
Espécie	GE	GF	P/R	Família	VI	P	
<b>PL7</b>							
<i>Caesalpinia ferrea</i> Mart. ex Tul.	SI	R	P	Fabaceae	0.68	0.002	
<i>Astronium lecointei</i> Ducke	ST	R	P	Anacardiaceae	0.60	0.006	
<i>Inga fagifolia</i> (L.) Willd. ex Benth.	P	R	P	Fabaceae	0.60	0.009	

<i>Byrsonima crassifolia</i> (L.) Kunth	SI	R	P	Malpighiaceae	0.58	0.009
<i>Bauhinia rufa</i> (Bong.) Steud.	P	R	P	Fabaceae	0.52	0.023
<b>PL2</b>						
<i>Solanum</i> sp.	P	D	RN	Solanaceae	0.84	0.001
<i>Schizolobium parahyba</i> var. <i>amazonicum</i> (Huber x Ducke) Barneby	P	D	P	Caesalpiniaceae	0.73	0.001
<i>Trema micrantha</i> (L.) Blume	P	D	RN	Ulmaceae	0.52	0.026
<b>PL7 + PL2</b>						
<i>Anadenanthera peregrina</i> (Benth.) Spig	SI	R	P	Fabaceae	0.63	0.007
<b>FLO</b>						
<i>Apeiba albiflora</i> Ducke	SI	-	-	Malvaceae	0.89	0.001
<i>Chrysophyllum prieurii</i> A.DC.	ST	-	-	Sapotaceae	0.86	0.001
<i>Guatteria poeppigiana</i> Mart.	P	-	-	Annonaceae	0.86	0.001
<i>Talisia microphylla</i> Uittien.	P	-	-	Sapindaceae	0.85	0.001
<i>Inga thibaudina</i> DC.	P	-	-	Mimosaceae	0.82	0.001
<i>Eschweilera coriacea</i> (DC.) S.A.Mori	ST	-	-	Lecythidaceae	0.73	0.001
<i>Machaerium amazonense</i> Hoehne	SI	-	-	Fabaceae	0.73	0.002
<i>Duguetia pycnastera</i> Sandwith	ST	-	-	Annonaceae	0.68	0.002
<i>Helicostylis turbinata</i>	SI	-	-	Monimiaceae	0.68	0.002
<i>Jacaranda copaia</i> (Aubl.) D.Don	P	-	-	Bignoniaceae	0.68	0.001
<i>Cordia goeldiana</i> Huber	ST	-	-	Boraginaceae	0.65	0.026
<i>Amphiodon effusus</i> Huber	SI	-	-	Fabaceae	0.63	0.005
<i>Ocotea opifera</i> Mart.	ST	-	-	Lauraceae	0.63	0.005
<i>Parkia multijuga</i> Benth.	ST	-	-	Mimosaceae	0.58	0.009
<i>Tetragastris altissima</i> (Aubl.) Swart.	ST	-	-	Burseraceae	0.58	0.009
<i>Euxylophora paraensis</i> Huber	ST	-	-	Rutaceae	0.52	0.029
<i>Laetia procera</i> (Poepp.) Eichler	SI	-	-	Flacourtiaceae	0.52	0.018
<i>Protium tenuifolium</i> (Engl.) Engl.	ST	-	-	Burseraceae	0.52	0.036
<i>Sterculia striata</i> St.Hil. & Naud.	SI	-	-	Sterculiaceae	0.52	0.021
<i>Tapirira guianensis</i> Aubl.	P	-	-	Anacardiaceae	0.52	0.028
<i>Zanthoxylum pentandrum</i> (Aubl.) R.A.Howard	P	-	-	Rutaceae	0.52	0.029

Sendo: GE: grupo ecológico (P: pioneira; SI: secundária inicial; ST: secundária tardia); GF: Grupo funcional (R: recobrimento; D: diversidade); P/R: Plantio (P) ou regeneração (RN); VI: Valor de indicação.

No estrato médio, do total de 123 espécies analisadas, 25 foram selecionadas como indicadoras entre os diferentes sistemas (Tabela 5). No sistema PL7, apenas a espécie *Byrsonima crassifolia* foi selecionada, a qual foi oriunda do plantio. No sistema PL2, cinco espécies foram selecionadas, as quais possuem as seguintes características: (1) três espécies são oriundas da regeneração natural e duas do plantio de mudas; (2) três espécies são pioneiras e pertencem ao grupo funcional de recobrimento. A espécie *Vismia*

*guianensis* foi selecionada como indicadora em ambas as áreas PL2 e PL7, a qual foi oriunda da regeneração natural e é classificada como espécie de recobrimento. Na FLO, 18 espécies foram selecionadas, as quais pertencem a diferentes grupos ecológicos.

**Tabela 5:** Relação das espécies, grupo a que foram indicadas pela IndVal e valores de indicação (VI) para o estrato médio (DAP  $\geq$  1 cm e  $<$  5 cm). Foram relacionadas somente as espécies que apresentaram valores significativos, segundo teste de “Monte Carlo” para  $p \leq 0,05$ .

Estrato médio							
Espécie	GE	GF	P/R	Família	VI	P	
<b>PL7</b>							
<i>Byrsonima crassifolia</i> (L.) Kunth	SI	R	P	Malpighiaceae	0.61	0.001	
<b>PL2</b>							
<i>Solanum</i> sp.	P	D	RN	Solanaceae	0.71	0.001	
<i>Swietenia macrophylla</i> L.	ST	D	P	Meliaceae	0.60	0.002	
<i>Clitoria arborea</i> Benth.	P	R	P	Fabaceae	0.52	0.031	
<i>Croton matorensis</i> Aubl.	P	R	RN	Euphorbiaceae	0.52	0.031	
<i>Solanum paniculatum</i> L.	P	R	RN	Solanaceae	0.52	0.022	
<b>PL7 + PL2</b>							
<i>Vismia guianensis</i> (Aubl.) Choisy	P	R	RN	Clusiaceae	0.73	0.009	
<b>FLO</b>							
<i>Eschweilera coriacea</i> (DC.) S.A.Mori	ST	-	-	Lecythidaceae	1.0	0.001	
<i>Talisia microphylla</i> Uittien.	P	-	-	Sapindaceae	0.98	0.001	
<i>Chrysophyllum prieurii</i> A.DC.	ST	-	-	Sapotaceae	0.93	0.001	
<i>Rinorea flavescens</i> (Aubl.) Kuntze	SI	-	-	Violaceae	0.89	0.001	
<i>Guatteria poeppigiana</i> Mart.	P	-	-	Annonaceae	0.81	0.001	
<i>Amphiodon effusus</i> Huber	SI	-	-	Fabaceae	0.78	0.001	
<i>Apeiba albiflora</i> Ducke	SI	-	-	Malvaceae	0.73	0.001	
<i>Duguetia pycnastera</i> Sandwith	ST	-	-	Annonaceae	0.68	0.002	
<i>Talisia esculenta</i>	P	-	-	Sapindaceae	0.68	0.001	
<i>Astronium lecointei</i> Ducke	ST	-	-	Anacardiaceae	0.63	0.003	
<i>Siparuna guianensis</i>	SI	-	-	Monimiaceae	0.63	0.003	
<i>Astrocaryum gynacanthum</i>	P	-	-	Arecaceae	0.58	0.008	
<i>Dodecastigma integrifolium</i> (Lanj.) Lanj. & Sandwith.	P	-	-	Euphorbiaceae	0.58	0.014	
<i>Guarea carinata</i> Ducke	ST	-	-	Meliaceae	0.58	0.008	
<i>Ocotea opifera</i> Mart.	ST	-	-	Lauraceae	0.58	0.009	
<i>Duguetia flagellaris</i> Huber	ST	-	-	Annonaceae	0.52	0.028	
<i>Inga thibaudina</i> DC.	P	-	-	Mimosaceae	0.52	0.029	
<i>Rinorea falcata</i> (Marct. Ex Eichler) Kutze	SI	-	-	Violaceae	0.52	0.037	

Sendo: GE: grupo ecológico (P: pioneira; SI: secundária inicial; ST: secundária tardia); GF: Grupo funcional (R: recobrimento; D: diversidade); P/R: Plantio (P) ou regeneração (RN); VI: Valor de indicação.

No estrato inferior, do total de 50 espécies analisadas, 9 foram selecionadas como indicadoras entre os diferentes sistemas (Tabela 6). No sistema PL7, quatro espécies foram selecionadas como indicadoras, todas advindas da regeneração natural. No sistema RN2, três espécies foram selecionadas, todas advindas também da regeneração natural e pertencem à família Solanaceae. Na FLO, duas espécies foram selecionadas como indicadoras.

**Tabela 6:** Relação das espécies, grupo a que foram indicadas pela IndVal e valores de indicação (VI) para o estrato inferior ( $\geq 30$  cm de Altura e  $< 1$  cm de DAP). Foram relacionadas somente as espécies que apresentaram valores significativos, segundo teste de “Monte Carlo” para  $p \leq 0,05$ .

<b>Estrato inferior</b>						
<b>Espécie</b>	<b>GE</b>	<b>GF</b>	<b>P/R</b>	<b>Família</b>	<b>VI</b>	<b>P</b>
<b>PL7</b>						
<i>Vismia guianensis</i> (Aubl.) Choisy	P	R	RN	Clusiaceae	0.89	0.001
<i>Guatteria poeppigiana</i> Mart.	P	D	RN	Annonaceae	0.72	0.001
<i>Byrsonima crassifolia</i> (L.) Kunth	SI	R	RN	Malpighiaceae	0.62	0.001
<i>Bauhinia</i> sp.	P	R	RN	Fabaceae	0.56	0.006
<b>PL2</b>						
<i>Solanum</i> sp.	P	D	RN	Solanaceae	0.71	0.001
<i>Solanum paniculatum</i> L.	P	R	RN	Solanaceae	0.69	0.002
<i>Solanum fulvidum</i> Bitter	P	D	RN	Solanaceae	0.63	0.004
<b>FLO</b>						
<i>Rinorea flavescens</i> (Aubl.) Kuntze	SI	-	-	Violaceae	0.82	0.001
<i>Eschweilera coriacea</i> (DC.) S.A.Mori	ST	-	-	Lecythidaceae	0.58	0.007

Sendo: GE: grupo ecológico (P: pioneira; SI: secundária inicial; ST: secundária tardia); GF: Grupo funcional (R: recobrimento; D: diversidade); P/R: Plantio (P) ou regeneração (RN); VI: Valor de indicação.

Na Tabela 7 são apresentados os valores médios dos atributos químicos e físicos do solo nos diferentes sistemas e profundidades. Em todas as profundidades estudadas, o pH em H<sub>2</sub>O foi significativamente maior nos sistemas PL7 e PL2, quando comparados a FLO. Estes resultados justificam o menor teor de alumínio nos sistemas sob plantio, cerca de cinco vezes menor que o observado na floresta de referência. Na profundidade 0-10 cm, os teores de cálcio e magnésio foram significativamente maiores nas áreas PL2 e PL7, quando comparados a FLO.

Os resultados de pH e Al nas áreas PL2 e PL7 também podem ser relacionados ao maior conteúdo de importantes nutrientes para a fertilidade do solo, como o cálcio e magnésio, condicionando a maior soma de bases observadas nos sistemas sob plantio, os quais foram significativamente maiores que a floresta, nas profundidades 0-10 e 10-20 cm.

Nas profundidades 0-10 e 20-40 cm, não houve diferenças significativas no conteúdo de fósforo no solo entre os sistemas estudados. Na profundidade 10-20, as áreas PL7 e FLO não diferenciaram significativamente, sendo estes superiores a PL2.

No que se refere à capacidade de troca catiônica do solo, os maiores valores foram constatados em FLO em todas as profundidades estudadas e pode ter relação direta com o conteúdo de matéria orgânica do solo que também foi maior no sistema sob floresta em todas as profundidades. Por sua vez, o teor de matéria orgânica não diferiu significativamente entre PL2 e PL7 nas profundidades 0-10 e 20-40



**Tabela 7:** Atributos químicos e físicos do solo nos sistemas sob regeneração natural implantados no ano de 2014 (PL2) e 2009 (PL7) e num fragmento de floresta nativa (FLO), usada como ecossistema de referência, nas profundidades 0-10; 10-20 e 20-40 cm, numa área de mineração de bauxita em Paragominas, Pará.

	PH		P	Ca	Mg	Al	K	SB	CTC	M.O	Ds	Pt
	H <sub>2</sub> O	KCl	(mg dm <sup>-3</sup> )	-----cmol dm <sup>-3</sup> -----							g kg <sup>-1</sup>	kg dm <sup>-3</sup>
	----- 0-10 cm -----											
<b>PL2</b>	5.08 a	4.69 a	1.52 ns	0.77 a	0.34 a	0.23 b	0.07 ns	1.20 a	6.50 b	15.5 b	1.21 b	0.54 b
<b>PL7</b>	4.92 a	4.26 b	1.97 ns	0.62 ab	0.32 a	0.4 b	0.09 ns	1.04 a	7.55 b	19.1 b	1.37 a	0.48 c
<b>FLO</b>	4.39 b	3.94 c	2.0 ns	0.46 b	0.13 b	2.1 a	0.09 ns	0.70 b	14.1 a	32.8 a	1.01 c	0.61 a
	----- 10-20 cm -----											
<b>PL2</b>	4.79 a	4.77 a	0.53 b	0.39 a	0.18 a	0.23 c	0.04 b	0.62 a	5.54 b	8.64 c	1.39 a	0.47 b
<b>PL7</b>	4.61 a	4.25 b	1.07 a	0.31 a	0.12 ab	0.66 b	0.04 b	0.48 ab	6.5 b	14.9 b	1.36 a	0.48 b
<b>FLO</b>	4.24 b	4.01 b	1.19 a	0.13 b	0.07 b	2.14 a	0.08 a	0.29 b	11.3 a	26 a	1.16 b	0.56 a
	----- 20-40 cm -----											
<b>PL2</b>	4.74 a	4.89 a	0.56 ns	0.12 b	0.047 b	0.08 b	0.04 b	0.22 b	2.83 b	3.91 b	1.47 a	0.44 b
<b>PL7</b>	4.75 a	4.46 b	0.79 ns	0.19 a	0.097 a	0.23 b	0.03 b	0.32 a	3.59 b	6.62 b	1.43 a	0.45 b
<b>FLO</b>	4.32 b	4.07 c	0.74 ns	0.16 ab	0.055 b	1.52 b	0.07 a	0.29 ab	6.65 a	14.3 a	1.22 b	0.53 a

\*Médias seguidas por letras iguais nas colunas não diferem estatisticamente pelo teste de Tukey a (5% de significância).

Em relação à densidade do solo, os valores médios variaram de 1,01 a 1,47 kg dm<sup>-3</sup>, ultrapassando o limite crítico ao desenvolvimento da vegetação estabelecido por Reichert et al. (2003), isto é, 1,45 kg dm<sup>-3</sup> para solos com teor de argila superior a 550 g kg<sup>-1</sup>. Na profundidade 0-10 cm, todos os sistemas variaram entre si quanto a esta variável, sendo que o maior valor foi constatado em PL7, seguido de PL2 e FLO. Assim como a densidade do solo, a porosidade total diferiu entre os três sistemas, sendo que o menor valor foi observado em PL7, seguido de PL2 e FLO.

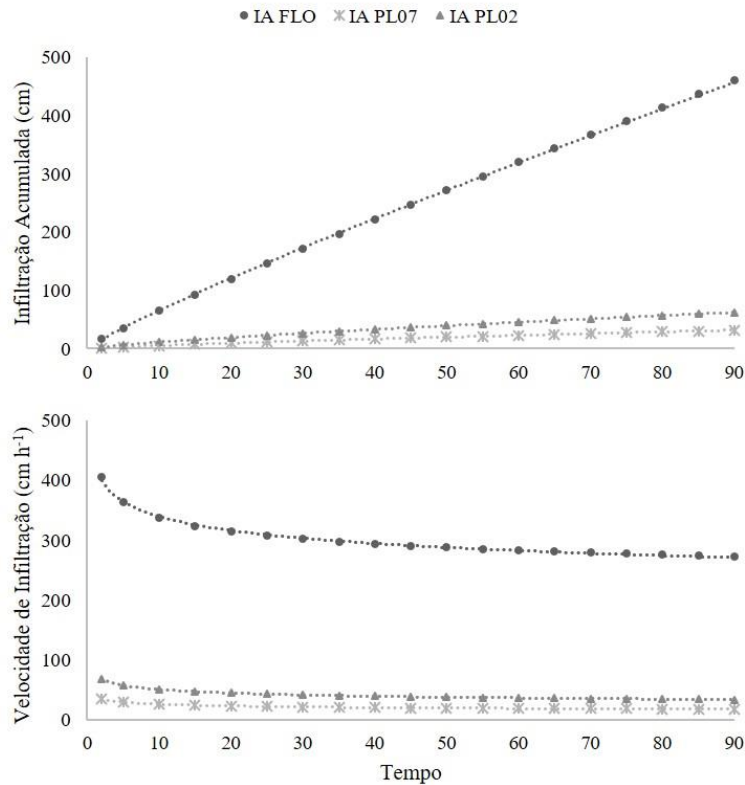
Nas profundidades 10-20 e 20-40 cm, as áreas sob plantio não diferenciaram entre si e apresentaram valores de densidade próximos ao limite considerado crítico, significativamente maiores que FLO. Por sua vez, a porosidade total apresentou relação inversa: a menor porosidade total foi observada nos sistemas PL2 e PL7.

Na Tabela 8 são apresentados os valores médios e coeficientes de variação de Velocidade de Infiltração Básica (VIB), seguidos de equações e coeficientes de ajuste da velocidade de infiltração. Na Figura 6 são apresentadas as curvas de velocidade de infiltração (cm h<sup>-1</sup>) e infiltração acumulada (cm) de água no solo nos diferentes sistemas. Os valores de VIB foram classificados como muito altos (VIB > 3 cm h<sup>-1</sup>), conforme a classificação proposta por Bernardo et al. (2006). A VIB diferenciou significativamente entre todos os sistemas: O menor valor de VIB foi constatado em PL7, o qual foi significativamente inferior a PL2 e FLO.

**Tabela 8:** Velocidade de Infiltração Básica (cm h<sup>-1</sup>), equação de ajuste da Velocidade de Infiltração e coeficiente de determinação.

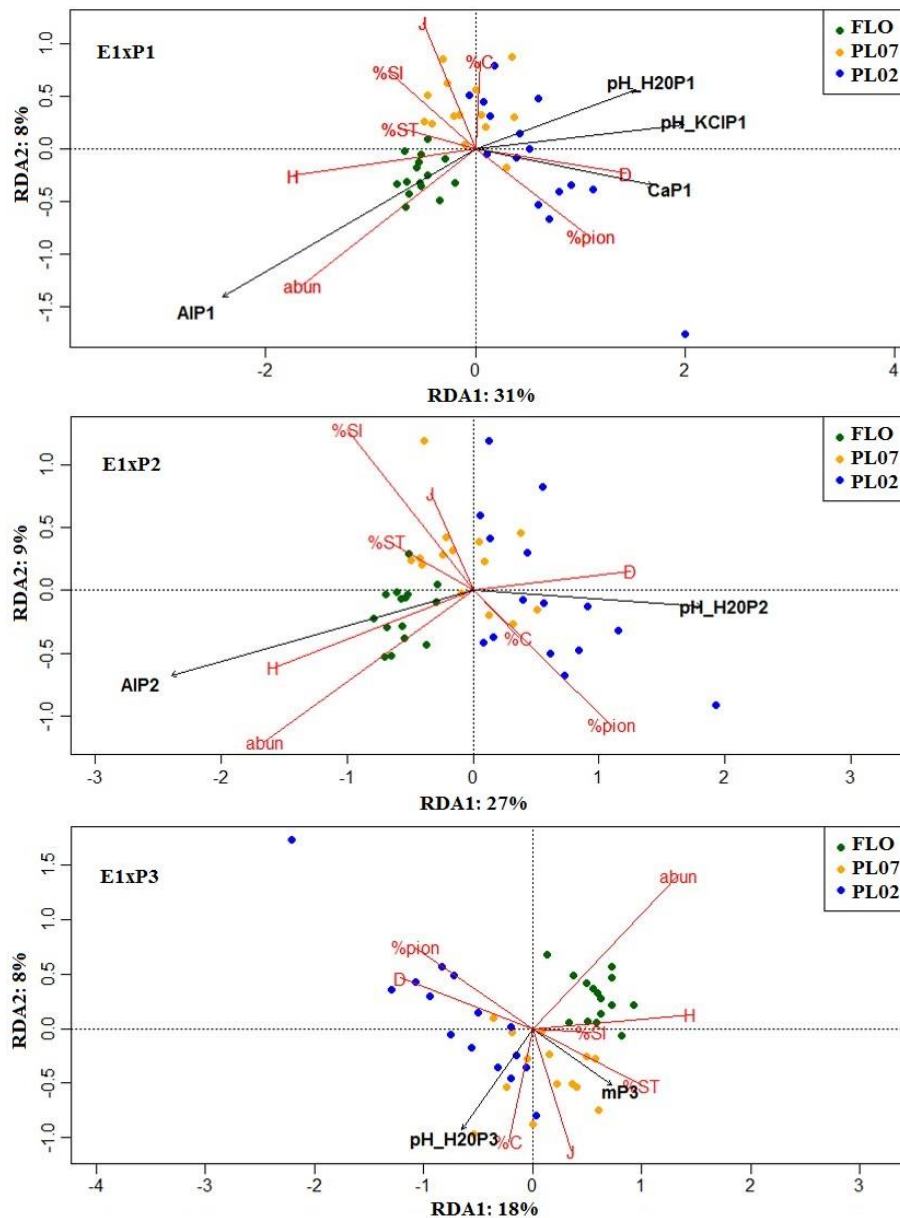
	VIB (cm h <sup>-1</sup> )	Equação de ajuste	R <sup>2</sup>
<b>PL2</b>	33,9±11,6 B	VI=77.324 T <sup>-0.184</sup>	0.9999
<b>PL7</b>	17,7±8,7 C	VI=39.201 T <sup>-0.178</sup>	0.9998
<b>FLO</b>	273±90,3 A	VI=429,52 T <sup>-0.102</sup>	0.9968

\*Médias e desvios padrão seguidos de mesma letra nas colunas não diferem estatisticamente conforme o teste de Tukey, a 5% de significância.



**Figura 6:** Velocidade de infiltração ( $\text{cm h}^{-1}$ ) e infiltração acumulada (cm) de água no solo nas áreas sob plantio de mudas de espécies nativas implantados no ano de 2014 (PL2) e 2009 (PL7).

Na Análise de Redundância Canônica (RDA) referente à relação entre as variáveis biológicas (Riqueza e diversidade da vegetação – eixo Y), no estrato superior, e ambientais (edáficas – eixo X), nas três profundidades estudadas (Figura 7), é possível notar que as variáveis ecológicas: equabilidade, percentual de espécies secundárias iniciais, secundárias tardias, clímax, bem como o índice de diversidade de Shannon possuem maior associação com parcelas da área PL7, enquanto que as variáveis dominância e percentual de espécies pioneiras e a dominância ecológica tem maior associação com boa parte das parcelas de PL2. Nota-se também que a maioria das parcelas de PL7 possui grande associação com parcelas de FLO, diferentemente do observado em PL2.

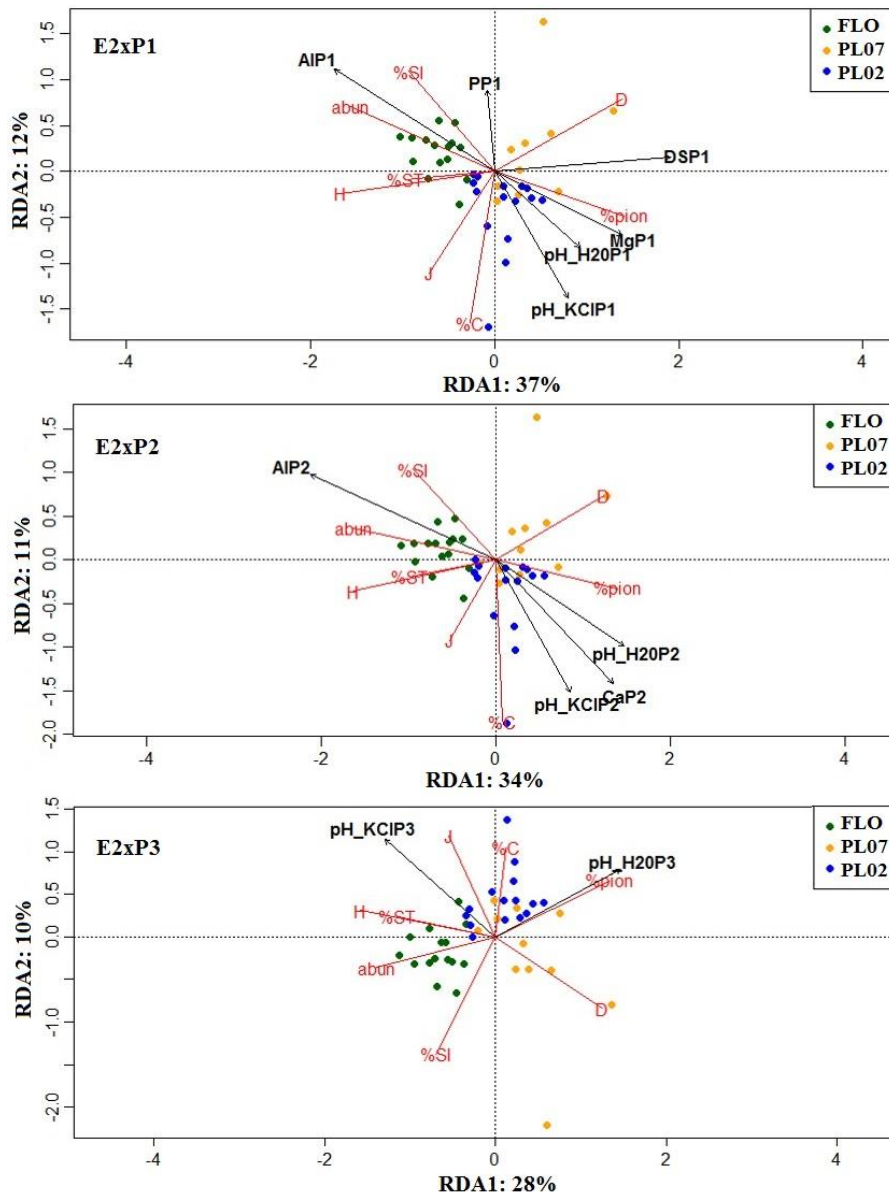


**Figura 7:** Análise de Redundância Canônica (RDA) da relação entre as variáveis vegetação e solos no estrato superior (E1) nos sistemas: Floresta nativa (FLO); plantio de mudas de dois (PL2) e sete anos (PL7) em Paragominas, Pará. J: equabilidade; D: Dominância; H: índice de Shannon; %P, %SI, %ST e %C: proporção de pioneiras, secundárias iniciais, secundárias tardias e clímax; P1, P2 e P3: profundidades P1 (0-10 cm), P2 (10-20 cm) e P3 (20-40 cm).

No que se refere às variáveis de solo na profundidade 1 (0-10 cm), observa-se que os valores de pH, seja em H<sub>2</sub>O e KCl, tiveram maior associação com a maioria das parcelas de PL2, enquanto que o teor de Alumínio trocável esteve predominantemente associado com as parcelas de FLO. Já nas profundidades 10-20 e 20-40 cm, apenas o pH em água foi significativamente associado às parcelas de PL2 e algumas parcelas de PL7.

Por sua vez, em FLO, o conteúdo de alumínio na profundidade 10-20 cm e a saturação por alumínio estiveram significativamente associados aos solos sob floresta nativa.

As representações gráficas da Análise de Redundância Canônica (RDA) da relação entre as variáveis biológicas (Riqueza e diversidade da vegetação – eixo Y), no estrato médio, e ambientais (edáficas – eixo X), nas três profundidades estudadas, estão apresentadas na Figura 8. Na análise da vegetação, é possível notar que as parcelas da área PL7, neste estrato, já não possuem mais uma grande associação com FLO, como foi observado no estrato superior. Por sua vez, algumas parcelas de PL2 já começam a ter grande associação no que se refere à abundância de indivíduos em relação a FLO.



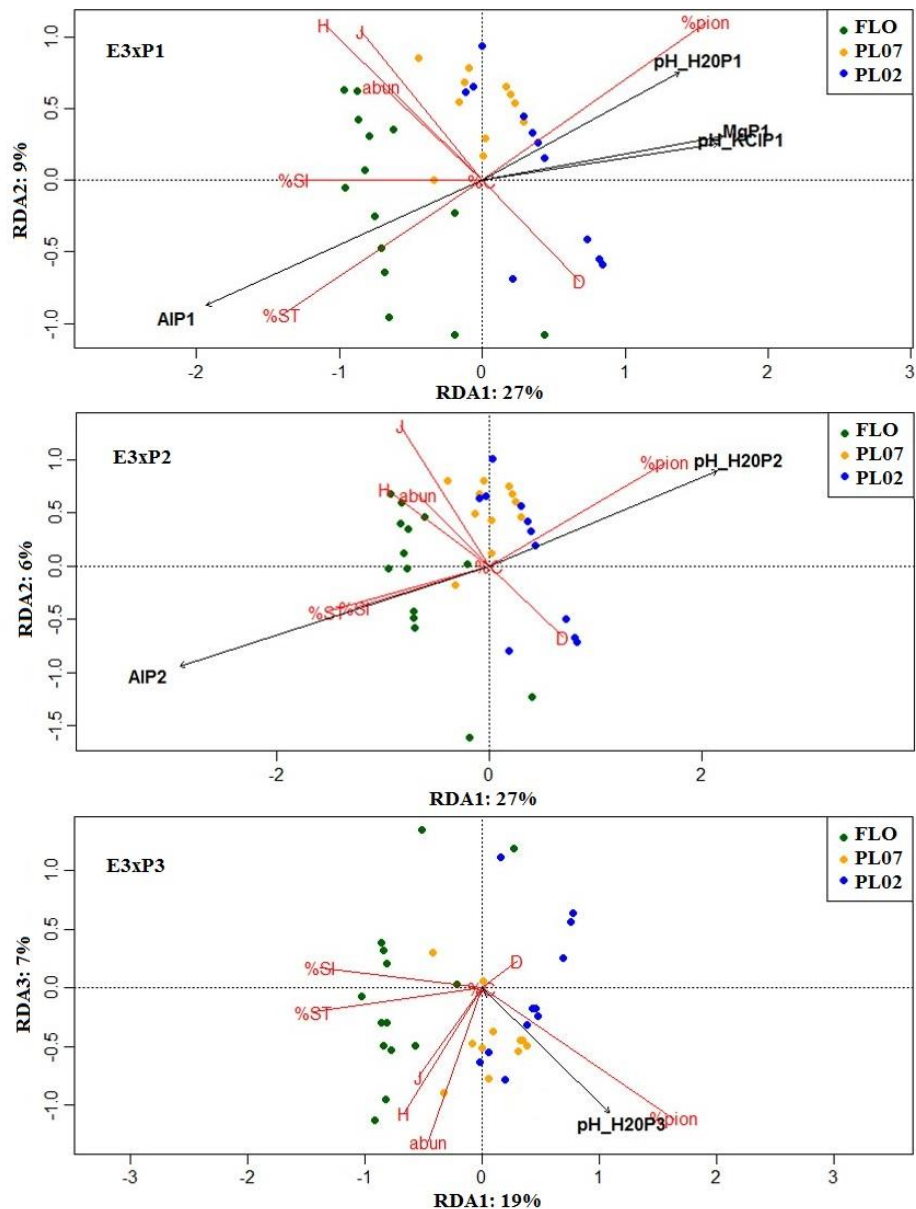
**Figura 8:** Análise de Redundância Canônica (RDA) da relação entre as variáveis vegetação e solos no estrato médio (E2) nos sistemas: Floresta nativa (FLO); plantio de

mudas de dois (PL2) e sete anos (PL7) em Paragominas, Pará. J: equabilidade; D: Dominância; H: índice de Shannon; %P, %SI, %ST e %C: proporção de pioneiras, secundárias iniciais, secundárias tardias e clímax; P1, P2 e P3: profundidades P1 (0-10 cm), P2 (10-20 cm) e P3 (20-40 cm).

Neste estrato, no qual as áreas sob plantio apresentam grande influência da regeneração natural, o percentual de secundária inicial e a abundância tiveram maior associação com parcelas de FLO, enquanto que o percentual de espécies secundárias tardias, porcentagem de clímax, índice de Shannon e equabilidade ecológica tiveram maior associação com algumas parcelas de PL2 e nenhuma associação com PL7. Por sua vez, o percentual de espécies pioneiras e a dominância ecológica tiveram maior associação com as parcelas de PL7 e a maioria das parcelas de PL2.

Quanto à relação entre a vegetação, no estrato médio, e os atributos do solo nas diferentes profundidades, observa-se que o aumento da densidade do solo na profundidade 0-10 cm influenciou significativamente o comportamento da vegetação na maioria das parcelas dos sistemas PL7 e PL2, assim como o aumento do pH em H<sub>2</sub>O e KCl e o conteúdo de potássio no solo. O aumento do conteúdo de Alumínio no solo e o conteúdo de fósforo estiveram significativamente associados a FLO nesta profundidade. Nas profundidades 10-20 e 20-40 cm, o pH em água em KCl permaneceram associados ao desenvolvimento da vegetação nos sistemas sob plantio.

A Figura 9 contém as representações gráficas da Análise de Redundância Canônica (RDA) da relação entre as variáveis Riqueza e diversidade da vegetação, no estrato inferior, e edáficas, nas três profundidades estudadas, sendo também expressa a explicação de cada eixo em porcentagem. Na análise gráfica da RDA, é possível observar que as parcelas de vegetação dos sistemas sob plantio apresentam diferentes associações com as variáveis ecológicas de riqueza e diversidade: uma parte das parcelas, em especial PL7, apresentam maior similaridade com as parcelas de FLO e possuem maior associação com aumento do índice de diversidade de Shannon, equabilidade, abundância, enquanto que as demais parcelas, que são a maioria, apresentam maior associação com o percentual de espécies pioneiras regenerantes.



**Figura 9:** Análise de Redundância Canônica (RDA) da relação entre as variáveis vegetação e solos no estrato inferior (E3) nos sistemas: Floresta nativa (FLO); plantio de mudas de dois (PL2) e sete anos (PL7) em Paragominas, Pará. J: equabilidade; D: Dominância; H: índice de Shannon; %P, %SI, %ST e %C: proporção de pioneiras, secundárias iniciais, secundárias tardias e clímax; P1, P2 e P3: profundidades P1 (0-10 cm), P2 (10-20 cm) e P3 (20-40 cm).

Quanto à relação entre o comportamento da vegetação no estrato inferior e os atributos do solo nas diferentes profundidades, observa-se que o pH em água esteve significativamente associado ao desenvolvimento da vegetação nas áreas PL2 e PL7 e em todas as profundidades estudadas. Na profundidade 0-10 cm, além do pH em água, foi significativo o pH em KCl e o conteúdo de magnésio no solo, os quais estão diretamente associados aos sistemas sob plantio. Já nas profundidades 0-10 e 10-20 cm, o teor de

alumínio trocável esteve significativamente associado ao comportamento da vegetação em FLO.

## **DISCUSSÃO**

No estrato superior, a maior riqueza de espécies e a maior abundância de indivíduos plantados observados na área PL7, em relação aos regenerantes, deve-se principalmente à prática de capina e controle da matocompetição realizada semestralmente nos cinco primeiros anos após o plantio. Por outro lado, a menor quantidade de espécies e de indivíduos em PL2 se deve ao pouco tempo de estabelecimento do plantio (2 anos), na qual a maioria dos indivíduos ainda não alcançou o estrato superior.

No que se refere ao índice de diversidade de Shannon, equabilidade e dominância no estrato superior, a semelhança observada entre PL7 e FLO se deve principalmente ao plantio de muitas espécies diferentes com alta diversidade efetuado em PL7. Isto indica que o plantio foi eficiente na formação de um componente florestal com diversidade que se aproxime do ecossistema de referência neste estrato. Essas espécies florestais são fundamentais para o avanço da trajetória do ecossistema. Isto porque se estas não tivessem sido plantadas, muito provavelmente não fariam parte da comunidade florestal nos primeiros anos da restauração.

Já no estrato médio, a abundância total de indivíduos nas parcelas de PL7 se deve principalmente a espécies regenerantes, ao contrário de PL2, no qual está inserida a maioria das espécies plantadas e também regenerantes. A igualdade no número de espécies plantadas e regenerantes e a maior abundância de indivíduos regenerantes em comparação aos plantados em PL7 ressaltam a importância da regeneração natural para a composição florística da floresta sob restauração. A maior participação de indivíduos regenerantes, que geralmente são de poucas espécies pioneiras nos primeiros anos da sucessão florestal (SALOMÃO, 2012), contribuiu para que este sistema apresentasse o menor índice de diversidade de Shannon e a maior equabilidade neste estrato.

No estrato inferior, foi constatada maior abundância de indivíduos regenerantes em PL7, quando comparado a PL2. Esta regeneração foi observada principalmente nas áreas sob influência de copa das espécies de recobrimento na área PL7. Tal resultado pode ser atribuído ao microclima gerado pelo sombreamento da área, seja pela copa das árvores como pela deposição de serapilheira, que geralmente atuam na redução da temperatura



do solo (BIZUTI et al., 2016), na conservação da umidade e de propriedades edáficas (FROUZ et al., 2013; BARROS e al., 2013), favorecendo a germinação e estabelecimento de plântulas regenerantes (WALKER e REDDELL, 2007; CROUZEILLES e CURRAN, 2016).

Considerando que em PL2 a abundância de indivíduos plantados e regenerantes por parcela são próximas, ao analisar a abundância de indivíduos regenerantes em PL7 e considerando que somente nos dois últimos anos a regeneração natural de indivíduos arbóreos pôde ser expressada devido operações de capina, constata-se: se não houvesse sido feito controle de espécies arbóreas regenerantes, provavelmente haveria uma abundância muito maior de espécies no sistema PL7. Dessa forma, ressalta-se a importância do aprimoramento e revisão constantes das práticas operacionais utilizadas na condução da restauração (LERF e TNC, 2012).

Ao analisar a distribuição das espécies plantadas sobreviventes em grupos de diversidade e recobrimento em PL7, nota-se que a maioria das espécies que alcançaram o estrato superior pertence ao grupo funcional de recobrimento, enquanto que as espécies de diversidade predominantemente ocupam o estrato médio sete anos após o plantio. Vale ressaltar que as espécies dos grupos de diversidade e recobrimento pertencem aos diferentes grupos ecológicos: pioneiras, secundárias e clímax e não necessariamente a um único grupo ecológico (RODRIGUES et al., 2011; BRANCALION et al., 2015).

Tendo em vista que espécies de recobrimento possuem características como bom sombreamento e desenvolvimento inicial para formação de uma rápida fisionomia florestal (RODRIGUES et al., 2009; NBL, 2013) e que a diversidade de espécies é fundamental para sustentabilidade da restauração (PICKETT et al., 2009), estes resultados indicam que esta classificação pode ser eficiente para utilização em novos plantios, através da alternância destes grupos nas linhas de plantio. Isto porque, aos sete anos, nota-se que as espécies de recobrimento estão, de fato, predominando no estrato superior, enquanto que espécies de diversidade predominam nos estratos mais inferiores.

Em PL2, o plantio de grande número de espécies que não se enquadram no grupo de recobrimento, a exemplo do *Schizolobium parahyba*, e a irregularidade na distribuição das mudas no plantio estão influenciando para que o predomínio de espécies de

recobrimento seja menor no estrato superior, nos dois primeiros anos da restauração. No estrato médio, já há um predomínio de espécies de diversidade, como é esperado.

Na análise dos resultados de química do solo nas áreas PL2 e PL7, os maiores valores de pH em água observados nos sistemas sob plantio se devem principalmente à prática de calagem efetuada para correção da acidez do solo. Estes resultados indicam que o pH teve influência direta no baixo conteúdo de Alumínio Trocável nestes sistemas e conseqüentemente no aumento da disponibilidade de nutrientes, como o teor de Cálcio e Magnésio e conseqüentemente a soma de bases.

Em relação ao conteúdo de matéria orgânica no solo, a oxidação da matéria orgânica com a retirada do solo para lavra do minério, bem como fatores como: falhas no plantio, mortalidade e controle de espécies regenerantes podem ter favorecido os baixos valores observados nas áreas PL2 e PL7 em comparação a FLO em todas as profundidades estudadas. Este teor de matéria orgânica também pode ter contribuído para a maior Capacidade de Troca de Cátions (CTC), observada em todas as profundidades do sistema sob floresta, tendo em vista que o conteúdo de matéria orgânica é uma das principais responsáveis pelo aumento da CTC em solos tropicais (BAYER e MIELNICZUK, 2008; NOVAIS et al., 2011).

Em relação a densidade e porosidade total do solo, os resultados indicam o efeito da compactação/adensamento em todas as profundidades do solo em PL7, em especial nas camadas mais subsuperficiais. Estes resultados se devem a grande exposição do solo nas falhas do plantio, na qual o impacto da gota da chuva normalmente favorece a individualização de partículas do solo e o entupimento de poros, reduzindo a porosidade total, formando selamentos em superfície e camadas adensadas em subsuperfície. Em períodos de estiagem isto se agrava, formando crostas que limitam fortemente o desenvolvimento da vegetação (BRADY e WEIL, 2013), e os processos erosivos e conseqüentemente a trajetória do ecossistema. Este processo também está ocorrendo nas áreas de PL2, com a exposição do solo em pontos em que não há vegetação.

A limitação nas propriedades físicas e estruturais do solo nos sistemas sob plantio podem ser confirmadas com a grande discrepância na velocidade de infiltração básica e nas curvas de velocidade de infiltração e infiltração acumulada entre estes sistemas e FLO, a qual chega a ser 8 e 16 vezes menor em PL2 e PL7, respectivamente. Estes

resultados reforçam a importância de adotar novas estratégias para aumentar o recobrimento do solo no menor intervalo de tempo possível.

Quanto à relação entre a vegetação e os atributos químicos e físicos do solo analisada por meio da RDA, a associação da maioria das parcelas de PL7 com FLO e com as variáveis ecológicas: percentual de espécies secundárias iniciais, tardias, equabilidade e diversidade de Shannon se deve à presença exclusiva das espécies plantadas sobreviventes neste estrato. Estes resultados demonstram: mesmo com a ocorrência de falhas na implantação e execução, o plantio de mudas de alta diversidade é fundamental para manter uma floresta biodiversa nos primeiros anos de restauração, fatores estes fundamentais para manter a sustentabilidade da floresta sob restauração (PICKETT et al., 2009; BRANCALION et al., 2015).

No estrato médio, a área PL2 é a que apresenta maior heterogeneidade no padrão de distribuição das parcelas, sendo que uma parte possui maior associação com FLO e outra parte com PL7. Isto se deve a um equilíbrio na abundância de espécies plantadas e regenerantes. No estrato inferior, a similaridade de algumas parcelas de PL7 com a floresta, estando associado ao aumento do índice de diversidade de Shannon, equabilidade e abundância, se deve as condições de sombreamento e cobertura do solo feitas por espécies plantadas de recobrimento, bem como à regeneração oriunda de propágulos originados de indivíduos arbóreos plantados.

Em relação aos atributos físicos do solo, apenas a densidade do solo na profundidade 0-10 cm esteve associada ao comportamento da vegetação no estrato médio nos sistemas sob plantio, apesar da tendência de compactação e adensamento do solo ter sido observada em todas as profundidades estudadas. Os resultados da vegetação e do solo nos sistemas de plantio de dois e sete anos reforçam a importância da busca de alternativas para reduzir as falhas do plantio.

A análise da proporção das espécies plantadas estabelecidas em grupos funcionais de diversidade e recobrimento demonstram que tal modelo pode ser altamente eficiente para ser adotado em futuros plantios ou plantios de enriquecimento, visando produzir de maneira rápida e eficiente uma fisionomia florestal, se dispostos no campo em um arranjo espacial favorável e com uma abundância adequada (BRANCALION et al., 2015). Recomenda-se estudos experimentais que testem a eficácia do modelo de plantio em

grupos de recobrimento e diversidade como alternativa para aumentar a eficiência de novos plantios.

## CONCLUSÃO

1 - No estrato superior, o plantio de mudas com sete anos foi eficiente na formação de uma comunidade florestal próxima a uma floresta de referência no que se refere a diversidade e equabilidade.

2 - A falta de um critério na distribuição das mudas em campo e a operação de capina para controle de indivíduos regenerantes nos cinco primeiros anos afetou não somente a formação de uma fisionomia florestal, como também permitiu a ocorrência de grandes áreas com solo exposto, resultando em substrato com sérias limitações físicas e estruturais no sistema de plantio com sete anos, sendo necessária a revisão dos procedimentos adotados para garantir ecossistemas sustentáveis.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

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

BRANCALION, P. H.; GANDOLFI, S.; RODRIGUES, R. R. **Restauração Florestal**. São Paulo: Oficina de textos, 2015.

BARROS, D. A.; PEREIRA, J. A. A.; FERREIRA, M. M.; SILVA, B. M.; FERREIRA FILHO, D.; NASCIMENTO, G. O. Soil physical properties of high mountain fields under bauxite mining. **Ciência agrotecnologia**, Lavras, v. 37, n. 5, p. 419-426, 2013.

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.

BIZUTI, D. T. G.; TANIWAKI, R. H.; SILVA, R. J.; DA COSTA, C. O. R.; RONCON, T. J. VIANI, R.A.G.; P. H. S. BRANCALION. Influência da composição de espécies florestais no microclima de sub-bosque de plantios jovens de restauração. **Scientia Forestalis**, volume 44, n. 112, 2016.

CROUZEILLES, R.; CURRAN, M. Wich landscape size best predicts the influence of forest cover on restoration success? A global meta-analysis on the scale of effect. **Jornal of applied ecology**, 2016, 53, 440-448.

HÜTTL, R.F. WEBER, E. Forest ecosystem development in post-mining landscapes: a case study of the Lusatian lignite district. **Naturwissenschaften**, 88 (2001), pp. 322–329

LERF e TNC. **Manual de restauração florestal: um instrumento de apoio a adequação ambiental de propriedades rurais do Pará**. The Nature Conservancy, Belém, Pará, 2012. 128p.

NAVE, A. G. **Banco de sementes autóctone e alóctone, resgate de plantas e plantio de vegetação nativa na Fazenda Intermontes, município de Ribeirão Grande, SP**. Tese (Doutorado), Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz. Universidade de São Paulo. Piracicaba, 218p. 2005.

NBL – Engenharia Ambiental Ltda e The Nature Conservancy (TNC). **Manual de restauração florestal: Um Instrumento de Apoio à Adequação Ambiental de Propriedades Rurais do Pará**. The Nature Conservancy, Belém, PA, 2013. 128 p.

PICKETT, S.T.A.; CADENASSO, M.L.; MEINERS, S. J. Ever since Clements: from succession to vegetation dynamics and understanding to intervention. **Applied Vegetation Science** 12: 9–21, 2008.

RODRIGUES, R.R., LIMA, R.A.F., GANDOLFI, S., NAVE, A.G. On the restoration of high diversity forests: 30 years of experiences in the Brazilian Atlantic Forest. **Biol. Conserv.** 142, 1242–1251, 2009.

SALOMÃO, R. P. VIEIRA, I. C. G.; BRIENZA JÚNIOR, S.; AMARAL, D. D.; SANTANA, A. C. Sistema Capoeira Classe: uma proposta de sistema de classificação de estágios sucessionais de florestas secundárias para o estado do Pará. **Bol. Mus. Para. Emílio Goeldi. Cienc. Nat.**, Belém, v. 7, n. 3, p. 297-317, 2012.

SALOMÃO, R. P. **Restauração Florestal de Precisão: dinâmica e espécies estruturantes. Evolução de áreas restauradas em uma Unidade de conservação na Amazônia – Porto Trombetas, PA**. Novas edições acadêmicas, 2015.

VIANA, J. H. M. **Determinação da densidade de solos e de horizontes cascalhentos**. Sete Lagoas: Embrapa Milho e Sorgo (Comunicado Técnico, 154), 2008.

WALKER, L. R.; R. DEL MORAL. **Transition Dynamics in Succession: Implications for Rates, Trajectories and Restoration**. In *New Models for Ecosystem Dynamics and Restoration*, edited K. Suding e R. J. Hobbs, 33– 49, 2008.

WALKER, J.; REDDELL, P. **Retrogressive succession and restoration in old landscapes**. In: Walker, L.R., Walker, J. & Hobbs, R.J. (eds.) *Linking restoration and ecological succession*. pp. 69–89. Springer, New York, NY, USA, 2007.

MARTINS, S. V. **Restauração Ecológica de ecossistemas degradados**. 2. Ed. – Viçosa, MG: ed. UFV, 2015.

## CONCLUSÕES GERAIS

1 – Mesmo com a inserção numa paisagem predominantemente florestal, a comunidade arbórea que inicialmente colonizou os sistemas sob regeneração natural constituiu-se apenas de um agrupamento transitório de poucas espécies nativas com grandes chances de desaparecer rápida e abruptamente nos primeiros anos da restauração.

2 – A alta dominância e a baixa diversidade de espécies arbóreas nos diferentes estratos das áreas sob regeneração natural e a baixa regeneração de indivíduos com diferentes hábitos ecológicos dificultam a trajetória do ecossistema após a morte de indivíduos de espécies pioneiras, ocasionando a exposição do solo à colonização por espécies pioneiras de baixa diversidade ou herbáceas, como gramíneas exóticas

3 – O tratamento de restauração por regeneração natural aos sete anos foi altamente eficiente na recuperação de importantes atributos relacionados à qualidade do solo em superfície, como a matéria orgânica, disponibilidade de nutrientes, densidade e infiltração de água no solo.

4 – São necessárias intervenções adaptativas no terceiro ano para corrigir a trajetória do ecossistema, principalmente com a introdução de espécies secundárias iniciais para garantir o sucesso da restauração durante a fase de transição da sucessão ecológica.

5 - No estrato superior, o plantio de mudas com sete anos foi eficiente na formação de uma comunidade florestal próxima a uma floresta de referência no que se refere a diversidade e equabilidade.

6 - A falta de um critério na distribuição das mudas em campo e a operação de capina para controle de indivíduos regenerantes nos cinco primeiros anos afetou não somente a formação de uma fisionomia florestal, como também permitiu a ocorrência de grandes áreas com solo exposto, resultando em substrato com sérias limitações físicas e estruturais no sistema de plantio com sete anos, sendo necessária a revisão dos procedimentos adotados para garantir ecossistemas sustentáveis.

## APÊNDICE 1

Lista de espécies em grupos funcionais de recobrimento e diversidade

<b>Espécie</b>	<b>Família</b>	<b>GE</b>	<b>GF</b>
<i>Acacia polyphylla</i> DC.	Fabaceae	SI	R
<i>Acacia tenuifolia</i> (L.) Willd.	Fabaceae	P	R
<i>Acacia tenuifolia</i> (L.) Willd.	Fabaceae	SI	R
<i>Adenanthera pavonina</i> L.	Fabaceae	SI	R
<i>Anadenanthera peregrina</i> (Benth.) Speg	Fabaceae	SI	R
<i>Aspidosperma araracanga</i> . Marc.-Ferr.	Apocynaceae	ST	D
<i>Aspidosperma araracanga</i> . Marc.-Ferr.	Apocynaceae	ST	R
<i>Aspidosperma centrale</i> Markgraf	Apocynaceae	ST	D
<i>Astronium graveolens</i> Jacq.	Anacardiaceae	ST	R
<i>Astronium lecointei</i> Ducke	Anacardiaceae	ST	R
<i>Bauhinia rufa</i> (Bong.) Steud.	Fabaceae	P	R
<i>Bauhinia</i> sp.	Fabaceae	P	R
<i>Byrsonima crassifolia</i> (L.) Kunth	Malpighiaceae	SI	R
<i>Byrsonima</i> sp.	Malpighiaceae	SI	R
<i>Caesalpinia ferrea</i> Mart. ex Tul.	Fabaceae	SI	R
<i>Calliandra</i> sp.	Fabaceae	P	D
<i>Cedrela odorata</i> L.	Meliaceae	C	R
<i>Ceiba pentandra</i>	Bombacaceae	ST	R
<i>Cenostigma tocantinum</i> Ducke	Fabaceae	P	D
<i>Cenostigma tocantinum</i> Ducke	Fabaceae	P	R
<i>Clitoria arborea</i> Benth.	Fabaceae	P	R
<i>Coccoloba</i> sp.	Polygalaceae	P	D
<i>Cordia goeldiana</i> Huber	Boraginaceae	ST	D
<i>Cordia goeldiana</i> Huber	Boraginaceae	ST	R
<i>Duguetia flagellaris</i> Huber	Annonaceae	ST	D
<i>Erythrina fusca</i> Loureiro.	Fabaceae	P	D
<i>Ficus</i> sp.	Moraceae	P	D
<i>Ficus</i> sp.	Moraceae	P	R
<i>Genipa americana</i> L.	Rubiaceae	P	D
<i>Guatteria</i> sp.	Annonaceae	SI	D
<i>Guazuma</i> sp.	Malvaceae	ST	R
<i>Handroanthus ochraceus</i> (Cham.) Mattos	Bignoniaceae	ST	D
<i>Handroanthus</i> sp.	Bignoniaceae	ST	D
<i>Homalium guianense</i> Warb.	Salicaceae	P	R
<i>Hymenaea courbaril</i> L.	Caesalpinaceae	C	D
<i>Hymenaea oblongifolia</i>	Caesalpinaceae	ST	D

<i>Inga alba</i> (Sw.) Willd.	Mimosaceae	P	R
<i>Inga cayennensis</i> Sagot ex Benth.	Mimosaceae	SI	R
<i>Inga edulis</i> Mart.	Mimosaceae	P	D
<i>Inga edulis</i> Mart.	Mimosaceae	P	R
<i>Inga fagifolia</i> (L.) Willd. ex Benth.	Mimosaceae	P	R
<i>Inga ingoides</i> (Rich.) Willd.	Mimosaceae	P	D
<i>Inga</i> sp.	Mimosaceae	P	D
<i>Inga</i> sp.	Sapindaceae	P	R
<i>Laetia procera</i> (Poepp.) Eichler	Flacourtiaceae	SI	R
<i>Lecythis pisonis</i> Cambess.	Lecythidaceae	ST	R
<i>Lophantera lactescens</i>	Malpighiaceae	ST	D
<i>Luehea speciosa</i> Willd	Theaceae	SI	R
<i>Ochroma pyramidale</i> (Cav. Ex Lam.)	Malvaceae	P	R
<i>Pachira aquatica</i> Aubl.	Bombacaceae	SI	D
<i>Parkia pendula</i>	Mimosaceae	ST	R
<i>Parkia</i> sp.	Mimosaceae	ST	D
<i>Parkia ulei</i> (Harms) Kuhlm	Mimosaceae	ST	R
<i>Paullinia cupana</i> Kunth	Sapindaceae	ST	D
<i>Protium heptaphyllum</i> (Aubl.) Marchand	Anacardiaceae	ST	R
<i>Protium</i> sp.	Anacardiaceae	ST	R
<i>Pterocarpus amazonicus</i> Huber	Fabaceae	ST	R
<i>Pterocarpus rohrii</i>	Fabaceae	ST	R
<i>Sapindus saponaria</i> L.	Sapindaceae	P	D
<i>Schizolobium parahyba</i> var. <i>amazonicum</i> (Huber x Ducke) Barneby	Caesalpinaceae	P	D
<i>Senegalia loretensis</i> (J.F. Macbr.) Seigler & Ebinger	Senegalia	P	R
<i>Senegalia polyphylla</i> (DC.) Britton & Rose	Senegalia	P	R
<i>Solanum paniculatum</i> L.	Solanaceae	P	D
<i>Solanum</i> sp.	Solanaceae	P	D
<i>Sterculia apetala</i> var. <i>elata</i> (Ducke) E.L. Taylor ex Brako & Zarucchi	Malvaceae	ST	D
<i>Swietenia macrophylla</i> L.	Meliaceae	ST	D
<i>Tabebuia</i> sp.	Bignoniaceae	ST	D
<i>Talisia microphylla</i> Uittien.	Sapindaceae	P	R
<i>Tamarindus indica</i>	Fabaceae	SI	R
<i>Vismia guianensis</i> (Aubl.) Choisy	Clusiaceae	P	R
<i>Zeyheria tuberculosa</i>	Bignoniaceae	P	D
<i>Zeyheria tuberculosa</i>	Bignoniaceae	P	R



