

INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS DA AMAZÔNIA
PROGRAMA DE PÓS GRADUAÇÃO EM CIÊNCIAS DE FLORESTAS TROPICAIS

**MUDANÇAS ESTRUTURAIS NA SUCESSÃO DE FLORESTAS SECUNDÁRIAS
FERTILIZADAS POR FÓSFORO E COM HISTÓRICO DE PASTAGEM NA
AMAZÔNIA CENTRAL**

MARCELLE SÃO PEDRO ABDIEL DE SOUZA

MANAUS, AMAZONAS

JUNHO, 2019

MARCELLE SÃO PEDRO ABDIEL DE SOUZA

**MUDANÇAS ESTRUTURAIS NA SUCESSÃO DE FLORESTAS SECUNDÁRIAS
FERTILIZADAS POR FÓSFORO E COM HISTÓRICO DE PASTAGEM NA
AMAZÔNIA CENTRAL**

Orientadora: Dra. Juliana Schietti de Almeida

Coorientadores: Drs. Ted Ronald Feldpausch e Carlos Alberto Nobre Quesada

Dissertação apresentada ao Instituto Nacional de Pesquisas da Amazônia como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Ciências de Florestas Tropicais.

MANAUS, AMAZONAS

JUNHO, 2019

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIAS DE FLORESTAS TROPICAIS

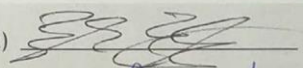
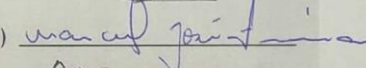
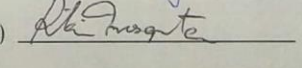
DEFESA PÚBLICA DISSERTAÇÃO / PPG-CFT - INPA


Ata da Defesa Pública da Dissertação de Mestrado de **MARCELLE SÃO PEDRO ABDIEL DE SOUZA** aluno (a) do Programa de Pós-Graduação *Stricto Sensu* em CIÊNCIAS DE FLORESTAS TROPICAIS, realizada no dia 19 de junho de 2019.

Aos dezenove dias do mês de junho de 2019, às 09h00, na Sala de Aula I do PPG-CFT, Campus III, INPA-V8, realizou-se a Defesa Pública da Dissertação de Mestrado intitulada: "MUDANÇAS ESTRUTURAIS NA SUCESSÃO DE FLORESTAS SECUNDÁRIAS FERTILIZADAS POR FÓSFORO E COM HISTÓRICO DE PASTAGEM NA AMAZÔNIA CENTRAL" em conformidade com o Artigo 68 do Regimento Interno do PPG-CFT e Artigo 52 do Regimento Geral da Pós-Graduação do Instituto Nacional de Pesquisas da Amazônia (MCTI-INPA) como parte final de seu trabalho para a obtenção do título de **MESTRE EM CIÊNCIAS DE FLORESTAS TROPICAIS**, área de concentração em *Manejo Florestal*. A Banca Examinadora foi constituída pelos seguintes professores doutores: **JOCHEN SCHONGART (INPA)**, **MARCIEL JOSÉ FERREIRA (UFAM)** e **RITA DE CÁSSIA GUIMARÃES MESQUISTA (INPA)**. O (a) Presidente da Banca Examinadora, Dr (a) **Juliana Schietti de Almeida (Orientadora / INPA)**, deu início à sessão convidando os senhores membros e o (a) Mestrando (a) a tomarem seus lugares e informou sobre os procedimentos a serem observados para o prosseguimento do exame. A palavra foi, então, facultada ao (à) Mestrando (a) que apresentou uma síntese do seu estudo e respondeu às perguntas formuladas pelos membros da Banca Examinadora. Depois da apresentação e arguição, a referida Banca Examinadora se reuniu e decidiu por

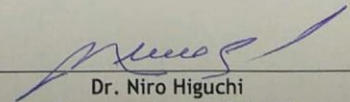
APROVAR POR UNANIMIDADE

A sessão foi encerrada às 10:50 e, para constar eu, Ana Serra Campos, Secretária do PPG-CFT lavrei a presente Ata, que depois de lida e aprovada foi assinada pelo Presidente e membros da Banca Examinadora. Banca Examinadora:

Dr (a) JOCHEN SCHONGART	<input checked="" type="checkbox"/> Aprovado (a)	<input type="checkbox"/> Reprovado (a)	
Dr (a) MARCIEL JOSÉ FERREIRA	<input checked="" type="checkbox"/> Aprovado (a)	<input type="checkbox"/> Reprovado (a)	
Dr (a) RITA DE CÁSSIA G. MESQUISTA	<input checked="" type="checkbox"/> Aprovado (a)	<input type="checkbox"/> Reprovado (a)	



Dra. Juliana Schietti de Almeida
Presidente da Banca / Orientadora



Dr. Niro Higuchi
Coordenador do PPG-CFT

FICHA CATALOGRÁFICA

SEDAB/INPA © 2019 - Ficha Catalográfica Automática gerada com dados fornecidos pelo(a) autor(a)
Bibliotecário responsável: Jorge Luiz Cativo Alauzo - CRB11/908

S729m Souza, Marcelle São Pedro Abdiel de
Mudanças estruturais na sucessão de florestas secundárias fertilizadas por fósforo e com histórico de pastagem na Amazônia central / Marcelle São Pedro Abdiel de Souza; orientadora Juliana Schietti; coorientador Ted Feldpausch. -- Manaus:[s.l], 2019. 57 f.

Dissertação (Mestrado - Programa de Pós Graduação em Ciências de Florestas Tropicais) -- Coordenação do Programa de Pós-Graduação, INPA, 2019.

1. Florestas secundárias. 2. Pastagens. 3. Biomassa acima do solo. 4. Limitação por fósforo. 5. Calagem. I. Schietti, Juliana, orient. II. Feldpausch, Ted, coorient. III. Título.

CDD: 333.75

SINOPSE

A fertilização por P e correção de acidez do solo em florestas secundárias com histórico de pastagem na Amazônica Central não afetou a densidade de caules, que diminui ao longo da trajetória sucessional, mas reduziu os estoques de biomassa acima do solo e a massa média dos indivíduos. Estes resultados podem sugerir uma possível realocação do crescimento abaixo do solo. Portanto, é necessário investigar as mudanças na biomassa abaixo do solo e nas propriedades químicas e físicas do solo nestas florestas para melhor compreensão de como florestas secundárias com histórico de pastagem respondem ao alívio da limitação nutricional do solo ao longo da trajetória sucessional.

Palavras-chave: florestas secundárias, pastagens, biomassa acima do solo, limitação por P

DEDICATÓRIA

Dedico ao nosso planeta, nossa casa. Que este trabalho possa contribuir na busca por um lar melhor de se viver, ainda que seja como uma gota d'água agrega à imensidão de um oceano.

*“Vamos precisar de todo mundo
Um mais um é sempre mais que dois
Pra melhor juntar as nossas forças
É só repartir melhor o pão
Recriar o paraíso agora
Para merecer quem vem depois”*

Beto Guedes

AGRADECIMENTOS

Agradeço à minha família maravilhosa, por me dar todo o apoio emocional e psicológico, todo o apoio financeiro nos momentos de aperto, todo o amor que nutre e que colore a vida. Obrigada papai Marcelino, mamãe Daisy e irmãos Matheus e Diego. Vocês me fazem sentir imensamente acolhida e amada.

Agradeço ao meu pai Oxalá e à toda espiritualidade amiga que me acompanha, me aconselha, me revigora. Gratidão à energia maravilhosa, forte e intensa da Floresta Amazônica.

Agradeço aos meus amigos. Aos que estão fisicamente longe, aos que estão perto, aos que ganhei ao longo desses 2 anos. Todos vocês são inexplicavelmente especiais para mim. A vida é muito mais saborosa com a amizade de cada um.

Agradeço ao carinho imenso da minha orientadora Juliana Schietti. Sem dúvidas, ser sua orientada foi um dos maiores presentes que ganhei nessa caminhada. Além de excelente profissional, sua humildade e sua energia serena nunca se passaram despercebidas por mim.

Agradeço ao apoio e atenção dos meus coorientadores Ted Feldpausch e Beto Quesada.

Agradeço ao companheirismo de todos da Família Vegetal. Eu não tenho palavras para expressar toda a gratidão que eu sinto por fazer parte dessa família. Obrigada por todos os momentos que vivemos juntos.

Agradeço aos momentos compartilhados com a minha turma de mestrado (PPG-CFT 2017).

Agradeço ao INPA pela oportunidade de me especializar, agradeço ao CNPq pela bolsa de estudo, à Universidade de Exeter pelo investimento financeiro, ao PDBFF, ao CENBAM e à Embrapa Amazônia Ocidental pelo apoio logístico.

Agradeço aos meus assistentes de campo Joãozinho, Nery, Rone e Osmar pelos ensinamentos e sorrisos trocados em campo.

RESUMO

Florestas secundárias com histórico de pastagem estão se regenerando em solos degradados pelo uso intensivo do fogo como técnica de manejo do pasto e pela compactação causada pelo pisoteio do gado. A limitação nutricional, principalmente por fósforo, relatada em grande parte dos solos da Bacia Amazônica, pode ser agravada por esse tipo de uso solo e, conseqüentemente, afetar a regeneração natural após o abandono da área. Portanto, o principal objetivo deste estudo foi analisar se a fertilização fosfatada e correção da acidez do solo afetam as características estruturais de florestas secundárias em uma cronosequência (diferentes idades iniciais) com histórico de pastagem na Amazônia central. Dez florestas secundárias foram fertilizadas em 2000, com quatro tratamentos cada: fósforo, fósforo + calagem, fósforo + calagem + gessagem e um controle não fertilizado. Foram realizados 5 censos entre 2001 e 2005, sendo o último em 2018, para cálculo de biomassa acima do solo, densidade de caules e massa média individual. O estoque de biomassa acima do solo e massa média individual das florestas mais velhas aumentaram ao longo da trajetória sucessional no tratamento controle, sem diferença significativa entre fertilização por P e controle. Nas florestas fertilizadas por P+Ca, o estoque de biomassa acima do solo diminuiu ao longo do tempo enquanto a massa média individual aumentou. Nas florestas fertilizadas por P+Ca+G, tanto o estoque de biomassa acima do solo quanto a massa média individual reduziram ao longo do tempo. A fertilização não afetou a densidade de caules, que diminuiu ao longo da trajetória sucessional. Estes resultados sugerem uma possível alocação do crescimento para a biomassa abaixo do solo e efeito da fertilização fosfatada e correção da acidez do solo na dinâmica e composição florística de florestas secundárias com histórico de pastagem.

Palavras-chave: florestas secundárias, pastagens, biomassa acima do solo, limitação por P, densidade de caules, calagem

ABSTRACT

Secondary forests with pasture history are regenerating in soils degraded by the intensive use of fire as a pasture management technique and by compaction caused by cattle trampling. The nutritional limitation, mainly for P, reported in great part of the soils of the Amazon Basin, can be aggravated by this type of soil use and, consequently, affect the natural regeneration after the abandonment of the area. Therefore, the main objective of this study was to analyze whether phosphate fertilization and soil acidity correction affect the structural characteristics of secondary forests in a chronosequence (different initial ages) with pasture history in central Amazonia. Ten secondary forests were fertilized in 2000, with four treatments each: phosphorus, phosphorus + liming, phosphorus + liming + gypsum and an unfertilized control. Five censuses were carried out between 2001 and 2005, the last one being in 2018, for calculation of aboveground biomass, stem density and individual mass average. Aboveground biomass stock and average individual mass of older forests increased during the successional trajectory in the control treatment, with no significant difference between P fertilization and control. In forests fertilized by P + Ca, the aboveground biomass stock decreased over time while the average individual mass increased. In forests fertilized by P + Ca + G, both aboveground biomass stock and average individual mass decreased over time. Fertilization did not affect stem density, which decreases during the successional trajectory. These results suggest a possible allocation of growth to belowground biomass and effect of phosphate fertilization and correction of soil acidity on the dynamics and floristic composition of secondary forests with pasture history.

Keywords: secondary forests, pasture, aboveground biomass, limitation by P, stems density, liming

SUMÁRIO

LISTA DE TABELAS	x
LISTA DE FIGURAS	xi
APRESENTAÇÃO.....	12
OBJETIVOS.....	14
CAPÍTULO 1	15
Resumo	17
Introdução	18
Material e Métodos	19
Resultados	24
Discussão	29
Conclusão.....	33
Implicações	34
Agradecimentos	34
Referências bibliográficas.....	34
CONCLUSÃO.....	57

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Constante alométrica (a), coeficiente angular (b), coeficiente de determinação (R^2) erro padrão residual (RES) e critério de informação de Akaike (AIC) de modelos alométricos Altura-Diâmetro (H-DAP) ajustados com medidas de 55 árvores da Fazenda Rodão	42
Tabela 2: Resultados do modelo log-log para altura (H) em função do diâmetro (DAP) e do tratamento (controle e fertilização).....	42
Tabela 3: Resultados dos modelos lineares mistos para estoque de biomassa acima do solo, densidade de caules e massa média individual	43
Tabela 4: Informações e valores das variáveis explicativas e respostas das 40 parcelas distribuídas nas 10 florestas secundárias com histórico de pastagens ao longo da BR-174, na Amazônia Central	45

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Parcial do modelo de estoque de biomassa acima do solo em função da interação entre tempo após fertilização e tratamento de fertilização (R^2 marginal = 75%).....	25
Figura 2: Parcial do modelo de estoque de biomassa acima do solo em função da idade inicial das florestas (R^2 marginal = 75%).....	26
Figura 3: Parcial do modelo de densidade de caules em função da interação entre tempo após fertilização e idade inicial das florestas (R^2 marginal = 56%).....	27
Figura 4: Parcial do modelo de massa média individual em função da interação entre tempo após fertilização e tratamento de fertilização (R^2 marginal = 57%).....	28
Figura 5: Parcial do modelo de massa média individual em função da idade inicial das florestas (R^2 marginal = 57%).....	29

APRESENTAÇÃO

Florestas secundárias representam aproximadamente 30% da área total das florestas tropicais e são importantes sumidouros de carbono (C) devido ao rápido acúmulo de biomassa ao longo da trajetória sucessional (Pan et al., 2011). No entanto, a maioria das pesquisas sobre o papel das florestas tropicais no ciclo global de C se concentrou em florestas maduras (Brienen et al., 2015; Fearnside, 1996; Girardin et al., 2010; Phillips et al., 2016; Tan et al., 2010) e perdas por desmatamento (Baccini et al., 2012; Harris et al., 2012; Houghton et al., 2000; Malhi & Grace, 2000), com ênfase muito limitada na degradação e no crescimento das florestas secundárias (Brown, Schroeder, & Birdsey, 1997; Poorter et al., 2016; Saatchi, Houghton, Dos Santos Alvalá, Soares, & Yu, 2007; Zarin, Ducey, Tucker, & Salas, 2001).

Os solos da bacia Amazônica são diversos, variando em propriedades químicas e físicas ao longo de um gradiente de desenvolvimento pedogênico (Quesada et al., 2011, 2010). Com o desenvolvimento do solo ao longo do tempo, a importância do material parental como fonte de nutrientes diminui consideravelmente (Walker & Syers, 1976). Como a disponibilização de fósforo (P) no solo acontece quase que exclusivamente através do material de origem, sem nenhuma deposição posterior, a concentração total de P no solo diminui ao longo do tempo devido ao intemperismo e lixiviação (Walker & Syers, 1976). Assim, os estoques de P remanescentes tornam-se gradualmente mais recalcitrantes, adsorvidos ou oclusos em matrizes minerais e matéria orgânica (Quesada et al., 2010; Walker & Syers, 1976). Nas plantas, o fósforo é crucial no metabolismo do carbono, desempenhando papel importante na transferência de energia na célula, na respiração e na fotossíntese (Vance, Uhde-Stone, & Allan, 2003). É componente estrutural dos ácidos nucleicos de genes e cromossomos, assim como de muitas coenzimas, fosfoproteínas e fosfolipídios, sendo absorvido pelas plantas na forma de ânions (H_2PO_4^- ou HPO_4^{2-}) (Lepsch, 2011). Considerando as funções do P nas plantas, a sua disponibilidade no solo é importante para controlar as taxas de crescimento das florestas (Quesada et al., 2010, 2012). Portanto, em florestas amazônicas de terra-firme (não alagáveis sazonalmente), o P é considerado limitante para o acúmulo de biomassa acima do solo (Laurance et al., 1999; Quesada et al., 2010, 2012).

Em florestas secundárias com histórico de pastagens na Amazônia Central, a queimadas sucessivas para renovação do pasto e a compactação do solo pelo pisoteio do gado podem intensificar a limitação nutricional natural dos solos (Ted R. Feldpausch et al., 2004). Diferentemente das florestas tropicais maduras, ricas em N no solo (Hedin, Vitousek, &

Matson, 2003; P M Vitousek & Sanford, 1986; Peter M Vitousek, 1984), florestas secundárias com histórico de pastagens tendem a ser limitadas por N devido aos processos de volatilização pelo fogo (Peter M. Vitousek, Porder, Houlton, & Chadwick, 2010). Em experimento de fertilização monitorado por 2 anos numa floresta secundária com histórico de pastagem e com 6 anos de sucessão na Amazônia Oriental, Davidson et al. (2004) reportaram um aumento de 2.8 Mg/ha/ano no estoque de biomassa arbórea no tratamento controle, enquanto as taxas de acúmulo de biomassa de árvores quase dobraram com a fertilização por N e N+P. Já a fertilização P causou um pequeno aumento não significativo no crescimento das árvores em comparação ao tratamento controle (Davidson et al., 2004). Estes resultados reforçam a ideia de limitação por N em florestas secundárias onde o fogo foi agente de perturbação.

Entretanto, em um estudo de cronosequência em florestas secundárias com histórico da pastagem na Amazônia central, que representam a área do presente estudo, os estoques de N no solo aumentaram 117.8 kg/ha/ano com a idade das florestas, provavelmente devido à fixação de N, deposição atmosférica e/ou mineralização no subsolo (T. R. Feldpausch, Rodon, Fernandes, Riha, & Wandelli, 2004), o que indica não haver limitação por N nestas florestas. Os estoques totais de nutrientes acima e abaixo do solo aumentaram à medida que as florestas amadureciam, com exceção dos estoques de P disponível no solo, que declinou a uma taxa de 0.66 kg/ha/ano. Mesmo o estoque de P disponível no solo (8.3 +/- 1.5 kg/ha) tendo sido baixo nos primeiros 45 cm de profundidade, foi rapidamente translocado do solo para a vegetação. Além disso, houve redução nas concentrações foliares de P com o aumento da idade das florestas (entre 0 a 14 anos). Estes resultados, portanto, indicam limitação por P nestas florestas (Ted R. Feldpausch et al., 2004) e ressaltam a importância de se entender a limitação nutricional por P em florestas secundárias tropicais com estudos de fertilização que incluam maior tempo de monitoramento.

O crescimento de florestas secundárias tropicais após a remoção completa ou quase completa da vegetação acumula ativamente o C na biomassa acima do solo, contrabalanceando parcialmente as emissões de carbono do desmatamento, degradação florestal, queima de combustíveis fósseis e outras fontes antropogênicas (Robin L. Chazdon et al., 2016). Com base em estudo de modelagem, ao longo de 40 anos, florestas neotropicais secundárias de terra-firme podem potencialmente acumular um estoque total de 8.48 Pg de C na biomassa acima do solo via regeneração natural de baixo custo ou regeneração assistida, correspondendo a um sequestro total de 31.09 Pg de CO₂. O Brasil lidera entre os dez países que respondem por 95% desse potencial de armazenamento de C. Além disso, permitir em 40% a regeneração natural das

pastagens em áreas de terra-firme aumenta esse potencial de armazenamento em 2.0 Pg C ao longo de 40 anos (Robin L. Chazdon et al., 2016).

Espera-se que a taxa de crescimento de florestas secundárias jovens aumente com a elevação dos níveis atmosféricos de CO₂ (DeLucia E et al., 1999). Entretanto, as limitações nutricionais, existentes em muitos solos da bacia Amazônica (Quesada et al., 2010), podem restringir a produtividade primária sob o enriquecimento de CO₂ (Oren et al., 2001). Portanto, compreender a regeneração natural das florestas tropicais secundárias com histórico de pastagens, bem como as mudanças que podem ocorrer ao longo da regeneração quando as limitações nutricionais do solo são aliviadas por meio da fertilização, pode contribuir nas tomadas de decisões e políticas públicas sobre sequestro de C atmosférico e mitigação de mudanças climáticas.

OBJETIVOS

O principal objetivo deste estudo foi testar se a fertilização por P, correção de acidez do solo e idade da floresta no momento da fertilização (idade inicial) influenciaram as mudanças na estrutura das florestas ao longo da sucessão secundária.

1. Estimar como o estoque de biomassa acima do solo em florestas secundárias de diferentes idades iniciais muda ao longo de 17 anos após a fertilização por P e correção da acidez do solo.
2. Determinar como a densidade de caules em florestas secundárias de diferentes idades iniciais muda ao longo de 17 anos após a fertilização por P e correção da acidez do solo.
3. Determinar como a massa média individual de árvores em florestas secundárias de diferentes idades iniciais muda ao longo de 17 anos após a fertilização por P e correção da acidez do solo.

CAPÍTULO 1

São Pedro, M.; Feldpausch, T. R.; Quesada, C. A.; Schiatti J. Mudanças estruturais na sucessão de florestas secundárias fertilizadas por fósforo e com histórico de pastagem na Amazônia central. Manuscrito em preparação para *Acta Amazonica*.

Mudanças estruturais na sucessão de florestas secundárias fertilizadas por fósforo e com histórico de pastagem na Amazônia central

Marcelle SÃO PEDRO^{1*}, Ted FELPAUSCH², Carlos Alberto QUESADA³ e Juliana SCHIETTI³

¹Programa de Pós-graduação em Ciências de Florestas Tropicais, Instituto Nacional de Pesquisas da Amazônia (PPG-CFT/INPA), Manaus, Brasil

²Universidade de Exeter, Exeter, Inglaterra

³Instituto Nacional de Pesquisas da Amazônia (INPA), Manaus, Brasil

*Autora correspondente: marcellespedro.as@gmail.com

Resumo

Florestas secundárias com histórico de pastagem estão se regenerando em solos degradados pelo uso intensivo do fogo como técnica de manejo do pasto e pela compactação causada pelo pisoteio do gado. A limitação nutricional, principalmente por fósforo, relatada em grande parte dos solos da Bacia Amazônica, pode ser agravada por esse tipo de uso solo e, conseqüentemente, afetar a regeneração natural após o abandono da área. Portanto, o principal objetivo deste estudo foi analisar se a fertilização fosfatada e correção da acidez do solo afetam as características estruturais de florestas secundárias em uma cronosequência (diferentes idades iniciais) com histórico de pastagem na Amazônia central. Dez florestas secundárias foram fertilizadas em 2000, com quatro tratamentos cada: fósforo, fósforo + calagem, fósforo + calagem + gessagem e um controle não fertilizado. Foram realizados 5 censos entre 2001 e 2005, sendo o último em 2018, para cálculo de biomassa acima do solo, densidade de caules e massa média individual. O estoque de biomassa acima do solo e massa média individual das florestas mais velhas aumentaram ao longo da trajetória sucessional no tratamento controle, sem diferença significativa entre fertilização por P e controle. Nas florestas fertilizadas por P+Ca, o estoque de biomassa acima do solo diminuiu ao longo do tempo enquanto a massa média individual aumentou. Nas florestas fertilizadas por P+Ca+G, tanto o estoque de biomassa acima do solo quanto a massa média individual reduziram ao longo do tempo. A fertilização não afetou a densidade de caules, que diminuiu ao longo da trajetória sucessional. Estes resultados sugerem uma possível alocação do crescimento para a biomassa abaixo do solo e efeito da fertilização fosfatada e correção da acidez do solo na dinâmica e composição florística de florestas secundárias com histórico de pastagem.

Palavras-chave: florestas secundárias, pastagens, biomassa acima do solo, limitação por P, densidade de caules, calagem

Introdução

Na Bacia Amazônica, florestas foram comumente convertidas em pastagens para criação de gado, com manutenção do pasto baseada em queimadas anuais ou ocasionais para renovação de gramíneas, detenção do recrutamento de espécies lenhosas e retardo da regeneração sucessional. A intensidade desse manejo pode esgotar os poucos nutrientes presentes no solo, levando ao abandono das áreas (Ted R. Feldpausch, Rondon, Fernandes, Riha, & Wandelli, 2004; R. D. C. G. Mesquita, Massoca, Jakovac, Bentos, & Williamson, 2015). As pastagens abandonadas formam locais quase monogênicos de *Vismia*, que pode se manter dominante por pelo menos 25 anos de sucessão (Longworth et al., 2014; R. D. C. G. Mesquita et al., 2015; Norden, Mesquita, Bentos, Chazdon, & Williamson, 2011), com pouca representação de espécies da floresta madura no sub-bosque (R. C. G. Mesquita, Ickes, Ganade, & Williamson, 2001) e lento acúmulo de biomassa (Steininger, 2000). No entanto, pouco é conhecido sobre como limitações nutricionais, agravadas pela acidez dos solos tropicais, afetam as florestas secundárias com histórico de uso do solo fortemente degradante como as pastagens.

O acúmulo de biomassa acima do solo em florestas secundárias tende a ser mais afetado pelas taxas de crescimento em diâmetro e altura de árvores em pé do que por mudanças líquidas na densidade de indivíduos devido ao recrutamento e mortalidade (R. L. Chazdon et al., 2007). Este padrão foi observado por Feldpausch, Fernandes e Riha (2005) em florestas secundárias com histórico de pastagens na Amazônia central ao longo de 4 anos de sucessão, em que a biomassa deixou de se concentrar em indivíduos com 1 a 5 cm de diâmetro e passou a ter maior concentração em indivíduos com 10 a 15 cm de diâmetro, além das árvores terem contribuído com mais de 94% da biomassa total acima do solo nas florestas com mais de 4 anos de abandono. Ao contrário da biomassa acima do solo, a densidade de caules não parece seguir um padrão previsível com a idade das florestas secundárias, podendo atingir um pico em uma faixa etária intermediária devido ao autodesbaste por mortalidade denso-dependente (R. L. Chazdon et al., 2007). Considerando que o acúmulo de biomassa acima do solo em florestas secundárias é fortemente afetado pela duração e intensidade do histórico de uso da terra (Christoph Gehring, Denich, & Vlek, 2005; R. D. C. G. Mesquita et al., 2015; Steininger, 2000; Uhl, Buschbacher, & Serrao, 1988; Williamson, Bentos, Longworth, & Mesquita, 2012) pela frequência de incêndio (Zarin et al., 2005) e pela fertilidade do solo (Moran et al., 2000), estes efeitos sobre a biomassa devem atuar através da densidade dos caules e/ou da massa média dos indivíduos e, o balanço desses dois componentes, define a maior parte da variação na biomassa destas florestas (Schietti et al., 2016).

Cerca de 60% da bacia Amazônica, como na Amazônia central, apresenta solos muito antigos com altos níveis de desenvolvimento pedogenéticos, ácidos e com baixas concentrações de nutrientes, principalmente fósforo (P) (Quesada et al., 2011, 2010). Portanto, a fertilização fosfatada aumenta o P disponível, sua concentração na planta, as taxas de fotossíntese e, conseqüentemente, a produção de biomassa (Burman, Garg, & Kathju, 2009; Garg, Burman, & Kathju, 2004; Schachtman et al., 1998; Suriyagoda, Ryan, Renton, & Lambers, 2014). Entretanto, em solos ácidos, como na Amazônia, o alumínio (Al) é altamente solúvel sendo considerado tóxico, formando complexos com fosfato e acentuando a limitação de P (Sanchez, 1976). O alumínio (Al) em concentrações tóxicas limita o crescimento e desenvolvimento das plantas porque afeta o sistema radicular e conseqüentemente a absorção de água e nutrientes, como o P. A adição de calcário ao solo, ou calagem, é uma técnica que corrige a acidez do solo, promovendo o aumento da disponibilidade de P e aumentando a concentração de Ca^{2+} e Mg^{2+} , a capacidade de troca de cátions (CTC) efetiva e reduzindo a lixiviação de bases. A calagem, no entanto, não leva esses benefícios às camadas mais profundas do solo, pois atua nas camadas superficiais onde o calcário foi incorporado. Uma alternativa para a correção da acidez em profundidade é a aplicação de gesso agrícola, o qual fornece Ca^{2+} e SO_4^{2-} ao solo e promove a lixiviação do Ca^{2+} no perfil. Tais benefícios favorecem o aprofundamento das raízes e permite o uso mais eficiente da água e nutrientes do solo (Novais et al., 2007), o que pode afetar positivamente a produtividade da floresta e levar a um maior acúmulo de biomassa.

Para compreender a lacuna sobre limitação nutricional por P em florestas secundárias tropicais, investigamos o efeito da fertilização por fósforo e da correção da acidez do solo ao longo de 17 anos nas mudanças estruturais de florestas secundárias em uma cronossequência (diferentes idades iniciais) com histórico de pastagem na Amazônia central. Esperamos um aumento no estoque de biomassa acima do solo ao longo do tempo com ganhos maiores onde, além da fertilização por P, a acidez do solo tenha sido corrigida a nível de profundidade, em resposta ao aumento da massa média dos indivíduos em função da redução da densidade de caules por mortalidade denso-dependente.

Material e Métodos

Área de estudo

O estudo foi realizado em 10 florestas secundárias de Terra-Firme, localizadas em três áreas de pastagens abandonadas com histórico de fogo a cerca de 26 km ao norte da cidade de

Manaus, no estado do Amazonas, na Bacia Amazônica Central do Brasil (2°34'S, 60°02'W e 2°20'S, 60°04'W) (Ted R. Feldpausch, da Conceicao Prates-Clark, Fernandes, & Riha, 2007).

O terreno é ondulado com elevação de 50-150 m acima do nível do mar. O solo dos platôs onde as pastagens foram abandonadas é classificado como Latossolo Amarelo com aproximadamente 80-85% de argila. Os solos são profundos, argilosos, têm baixa capacidade de troca catiônica, são fortemente agregados, bem drenados e relativamente inférteis (Van Wambeke, 1992). Antes da implantação do experimento de fertilização, as florestas mais velhas deste estudo apresentaram um acúmulo lento de fósforo no solo em relação a outros nutrientes, não excedendo 15 kg/ha nas florestas mais velhas (12 a 14 anos), o que indica possível limitação por P ao longo da trajetória sucessional (Ted R. Feldpausch et al., 2004).

A vegetação é classificada como floresta de terra firme sempre verde com dossel fechado (Veloso et al., 1991). Características estruturais das florestas secundárias da área de estudo foram reportadas por (Ted R. Feldpausch et al., 2004; 2005). O estoque de biomassa total acima do solo aumentou com a idade das florestas e houve uma prevalência de 58% de indivíduos arbóreos na classe de 1-5 cm de DAP para todas as florestas. Os gêneros não-arbóreos dominaram as áreas recentemente abandonadas, e os arbustos só contribuíram significativamente com biomassa nas florestas de 2 a 4 anos (74% do total). Nas florestas mais maduras (> 4 anos), as árvores contribuíram com mais de 94% da biomassa total.

O clima regional é tropical monsoon (*Am*), segundo a classificação de Köppen (1948), com uma temperatura média de 26.5°C (Antonio, 2017; Peel, Finlayson, & McMahon, 2007). A distribuição das chuvas é unimodal, com uma precipitação anual média de 2200 mm, sendo março e abril os meses mais úmidos com mais de 300 mm de precipitação. A estação seca ocorre de julho a setembro, com precipitação mensal média abaixo de 100 mm (Lovejoy & Bierregaard, 1990). Entretanto, a Estação Agrometeorológica da sede da EMBRAPA Amazônia Ocidental, localizada no km 29 da Rodovia AM-010, não registrou nenhum mês com precipitação média abaixo de 100 mm na série histórica de 1971-2010 (Antonio, 2017).

Delineamento amostral

O experimento de fertilização foi implantado em 2000, quando dez florestas secundárias foram selecionadas dentro de três fazendas de gado: Fazenda Rodão (atualmente chamada Sítio Seringal) (km 46), Estação Experimental da Embrapa Amazônia Ocidental no Distrito Agropecuário da SUFRAMA (DAS) (km 53) e Fazenda Dimona (km 72) (T. R. Feldpausch et

al., 2004). As três fazendas estão localizadas ao longo da estrada BR-174, abrangendo um total de 10 florestas secundárias nos censos iniciais e 6 no último censo, em 2018 (Tabela 1).

Foram realizadas entrevistas com agricultores para determinar o histórico do local e quando o pasto foi abandonado. O ano em que cada floresta foi desmatada, o tempo em que as áreas foram mantidas como pastagens e a distância em relação à floresta primária foram relatados por (Ted R. Feldpausch et al., 2007). A data em que as pastagens foram abandonadas não é precisa, já que o gado podia esporadicamente frequentar a área até que todo o pasto fosse substituído por vegetação sucessional lenhosa. Portanto, foi estimado um valor médio de idade para cada floresta. As florestas secundárias dentro das fazendas são distintas, cada uma com um histórico único de manejo e cobertura vegetal.

A seleção das florestas secundárias foi feita para abranger florestas com diferentes idades (entre 1 e 13 anos) presentes na região no ano de instalação do experimento. As diferentes idades não se repetem em todas as fazendas (Ted R. Feldpausch et al., 2004). Em cada floresta foi instalado um bloco de quatro parcelas, sendo um controle e três fertilizadas. A distância entre blocos dentro da mesma fazenda varia de 100 a 1000 m e assume-se que dentro de cada bloco as condições ambientais pré-fertilização e o histórico de uso são similares.

Em novembro de 2000 foi feita a fertilização do solo nas parcelas. Foram implantados quatro tratamentos (parcelas) em cada uma das dez florestas, incluindo fertilização e correção da acidez do solo: (1) superfosfato triplo (50 kg/ha de $P_2O_5^-$), (2) superfosfato triplo + calcário dolomítico (2 t/ha de $CaCO_3$), (3) superfosfato triplo + calcário dolomítico + gesso (1 t/ha de $CaSO_4 \cdot 2H_2O$) e (4) um controle não fertilizado. As parcelas variam em tamanho, de 100 a 400 m², e estão separadas por 10 a 25 m dentro do mesmo bloco. As medições foram realizadas em subparcelas de 60 a 225 m² nos censos de 2001 a 2005 e realizadas nas parcelas no censo de 2018.

Coleta de dados

O primeiro censo (jan/2001) foi feito apenas dois meses após a fertilização e, portanto, assumimos que representa o estado inicial da floresta sem efeito da fertilização. Seis censos foram feitos entre 2001 e 2018: janeiro de 2001, julho de 2001, julho de 2002, janeiro de 2004, março de 2005 e setembro de 2018. No censo de 2018, 3 florestas secundárias não foram encontradas. Dentro de cada parcela, todas as árvores, palmeiras e lianas com diâmetro maior ou igual a 3 cm foram medidas com fita diamétrica. Para árvores e palmeiras, o diâmetro à altura do peito (DAP) foi medido a 1,3 m do solo. Para lianas, o diâmetro foi medido a 1,3 m a

partir do ponto de enraizamento e seguindo o contorno do caule. O ponto de medição dos diâmetros foi modificado em presença de sapopemas, raízes tabulares ou injúrias.

A altura (H) das árvores foi estimada usando equação alométrica H~DAP (equação 1) ajustada com dados de altura e diâmetro coletados em campo, na Fazenda Rodão, no censo de 2018. A medição do diâmetro e da altura de 55 árvores foi estratificada em três classes diamétricas (0-9.9 cm, 10-19.9 cm e 20-30 cm) e em dois tratamentos (controle e fertilização). O número de árvores medidas por classe diamétrica foi de 19, 27 e 9, respectivamente. As duas árvores com maior diâmetro entre todas as parcelas amostradas tinham 35,9 cm (florestas DAS-3 e Dimona-2), mas não foram amostradas para altura. As alturas foram estimadas em metro utilizando um hipsômetro *Vertex Laser Geo (Haglof Sweden)*. Com os dados das 55 árvores, testamos modelo log-log e modelo log-linear e o melhor ajuste para H~DAP foi obtido com o modelo log-log. A partir deste modelo, não verificamos diferenças na alometria H~DAP entre os tratamentos (controle e fertilização) (Tabelas 1 e 2). Portanto, ajustamos uma única equação para estimar a altura das árvores em função do DAP.

$$\text{Altura da árvore} = \exp(0,77819 + 0,59073 \times \ln(\text{DAP})) \quad \text{equação 1}$$

Estoque de biomassa acima do solo

Calculamos a biomassa seca acima do solo (kg) de cada árvore utilizando a equação alométrica de espécies mistas (equação 2) baseada no diâmetro e na altura, desenvolvida por (Nelson et al., 1999) no local de pesquisa da Embrapa, a qual fornece estimativas de biomassa seca válidas para árvores de 1 a 30 cm de DAP.

$$\text{Biomassa de árvore} = \exp(-2.5202 + 2.1400 \times \ln(\text{DBH}) + 0.4644 \times \ln(H))$$

equação 2

A biomassa seca acima do solo (kg) das palmeiras foi estimada usando a equação alométrica de biomassa ao nível de família (equação 3) baseada no diâmetro (Goodman et al., 2013). Essa equação foi ajustada para palmeiras com $6 \leq \text{DBH} < 40$ cm. No entanto, pela falta de uma equação ajustada para indivíduos com diâmetro menor que 6 cm, usamos essa equação para todas as palmeiras amostradas.

$$\text{Biomassa de palmeira} = \exp(-3.3488 + 2.7483 \times \ln(\text{DBH})) \quad \text{equação 3}$$

A biomassa total de lianas (kg) foi estimada usando a equação alométrica de espécies mistas (equação 5), desenvolvida por (C. Gehring, Park, & Denich, 2004), recomendada para a estimativa não destrutiva de biomassa de lianas em florestas tropicais e secundárias. Os parâmetros da equação foram ajustados com base no diâmetro medido a 30 cm de extensão a partir do enraizamento e não à altura do peito, por permitir a inclusão de lianas pequenas e médias e ser mais representativo para a vegetação de cipó da região estudada (Gehring et al., 2004). Transformamos as medidas de diâmetro a 1.30 m a partir do enraizamento para diâmetros na extensão de 30 cm (D) a partir da equação 4 (Gehring et al., 2004).

$$\text{Diâmetro} = 1.235 \times \text{DBH} + 0.002 \times (\text{DBH})^2 \quad \text{equação 4}$$

$$\text{Biomassa de liana} = \exp(-7.114 + 2.276 \times \ln(D)) \quad \text{equação 5}$$

A biomassa seca estimada para cada indivíduo (árvore, palmeira e liana) da parcela e subparcela foi somada e expressa como biomassa acima do solo (AGB) em toneladas por hectare (t/ha).

Densidade de caules

O número de caules (árvores, palmeiras e lianas) de cada parcela foi expresso como densidade de caule na base de 1 hectare.

Massa média individual

A massa individual média para cada parcela foi calculada dividindo o estoque de biomassa acima do solo pela densidade de indivíduos, expressa em quilogramas (kg).

Análise estatística

Para testar se a fertilização por P, correção de acidez do solo e idade da floresta no momento da fertilização (idade inicial) influenciaram as mudanças na estrutura das florestas ao

longo da sucessão secundária, usamos três modelos lineares mistos (LMM), em que o estoque de biomassa acima do solo, a densidade de caules e massa média individual são as variáveis dependentes e as variáveis independentes são separadas em fixas (idade inicial, tratamento e tempo após fertilização) e randômicas (florestas e parcelas) (e.g. Estoque de biomassa ~ idade inicial + tratamento + tempo após fertilização, random = $\sim 1|$ floresta/parcela). As variáveis randômicas foram incluídas nos modelos de forma aninhada para controlar as diferenças entre florestas (blocos) e para considerar as medidas repetidas nas parcelas dentro de cada floresta. Com isso avaliamos o efeito dos tratamentos, idade inicial das florestas e tempo após fertilização, considerando a dependência espacial das parcelas dentro das florestas de amostragem e dependência temporal das medidas repetidas. As análises estatísticas foram realizadas no software *R* 3.5.2 utilizando pacote *nlme4* (Pinheiro, Bates, DebRoy, Sarkar & 2019).

Resultados

Um total de 5498 indivíduos foram medidos considerando o diâmetro de inclusão de 3 cm. Árvores, lianas e palmeiras correspondem, respectivamente, a 76.4%, 13% e 0.2% do total de indivíduos medidos nos censos entre 01/2001 e 09/2018.

As mudanças na estrutura das florestas secundárias foram diferentes dependendo da idade no ano da fertilização (idade inicial). O estoque de biomassa acima do solo variou de 0 a 14.20 t/ha, 0 a 69.00 t/ha, 1.20 a 70.10 t/ha, 15.40 a 140.80 t/ha e 72.7 a 238.00 t/ha, nas florestas com idade inicial de 1, 3, 5, 7 e 13 anos, respectivamente. A densidade de caules variou de 0 a 2178 caules/ha, 0 a 2100 caules/ha, 500 a 5167 caules/ha, 1000 a 11000 caules/ha e 1905 a 6571 caules/ha, nas florestas com idade inicial de 1, 3, 5, 7 e 13 anos, respectivamente. A massa média individual variou de 0 a 10.00 kg, 0 a 36.00 kg, 2.00 a 28.00 kg, 4.00 a 77.00 kg e 15.00 a 59.00 kg, nas florestas com idade inicial de 1, 3, 5, 7 e 13 anos, respectivamente.

No momento da fertilização, as florestas mais velhas tinham maiores valores de estoque de biomassa acima do solo, densidade de caules e massa média individual. Os valores médios encontrados foram 0, 0, 13.39, 44.81 e 113.86 t/ha de biomassa acima do solo, 0, 0, 1771, 5680 e 4166 caules/ha e, 0, 0, 7.75, 12.25 e 28,62 kg de massa média individual para as idades iniciais 1, 3, 5, 7 e 13 anos, respectivamente.

De modo geral, o estoque de biomassa acima do solo e a massa média individual aumentaram ao longo do tempo, com maiores ganhos médios de biomassa acima do solo nas florestas de 1, 3 e 5 anos de idade inicial (6.48, 6.75 e 26.16 t/ha, respectivamente). Para as

florestas com idade inicial de 1 e 3 anos, a densidade de caule aumentou ao longo do tempo (1126 e 725 caules/ha, respectivamente), enquanto as demais florestas tiveram diminuição da densidade de caule ao longo do tempo.

Estoque de biomassa acima do solo

As mudanças no estoque de biomassa acima do solo ao longo da trajetória sucessional foram diferentes dependendo da fertilização e da idade inicial das florestas. As diferenças entre as florestas e parcelas (variáveis aleatórias) não modificaram o poder de explicação do modelo (Tabela 3).

Tanto as florestas controle e quanto as fertilizadas por P tiveram aumento do estoque de biomassa acima do solo ao longo do tempo. Entretanto, a taxa com que o estoque de biomassa acima do solo aumentou ao longo do tempo nas florestas fertilizadas por P não diferiu estatisticamente em relação ao controle. Nas florestas fertilizadas por P+Ca e P+Ca+G, o estoque de biomassa acima do solo diminuiu ao longo do tempo, com taxas de 3.04 e 2.53 t/ha/ano, respectivamente, menores em relação às florestas controle.

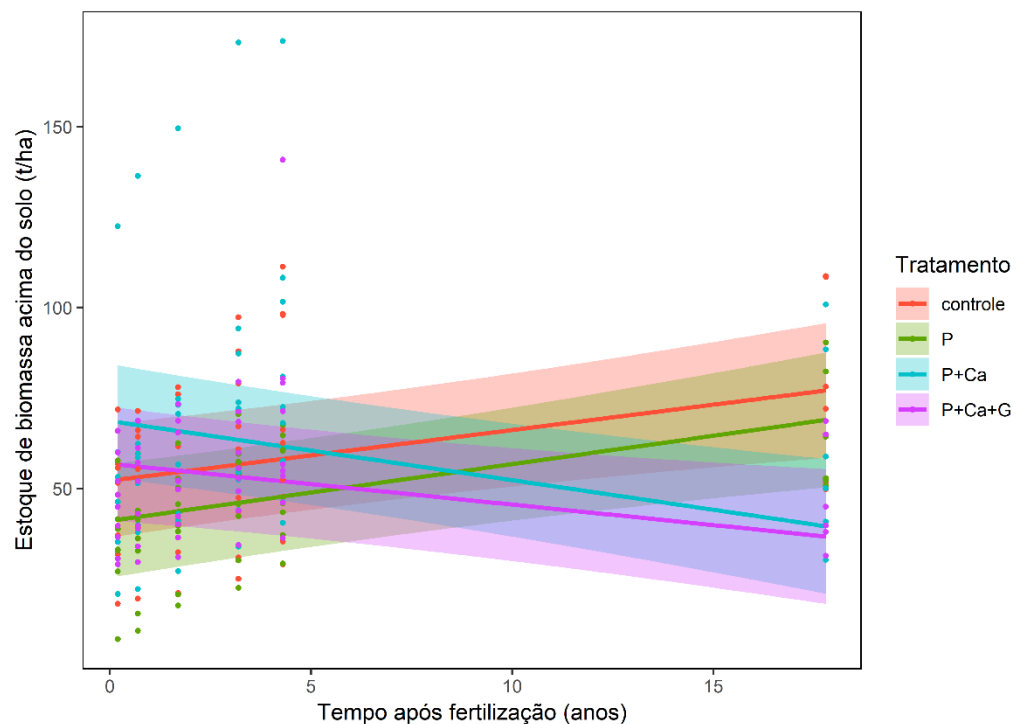


Figura 1. Parcial do modelo de estoque de biomassa acima do solo em função da interação entre tempo após fertilização e tratamento de fertilização (R^2 marginal = 75%). Cada ponto

representa uma parcela dentro de uma floresta e com medidas repetidas ao longo do tempo. Cada parcela representa um tratamento, expresso em diferentes cores. As linhas representam o ajuste do modelo para cada tratamento em interação com o tempo após fertilização.

O estoque de biomassa acima do solo foi similar entre as florestas com idade inicial 1 e 3 anos (5.44 t/ha, em média). As florestas com 7 e 13 anos, porém, apresentaram estoques médios de biomassa acima do solo cerca de 10 e 23 vezes maiores (estoques 55.77 e 125.60 t/ha, respectivamente) que as florestas mais jovens.

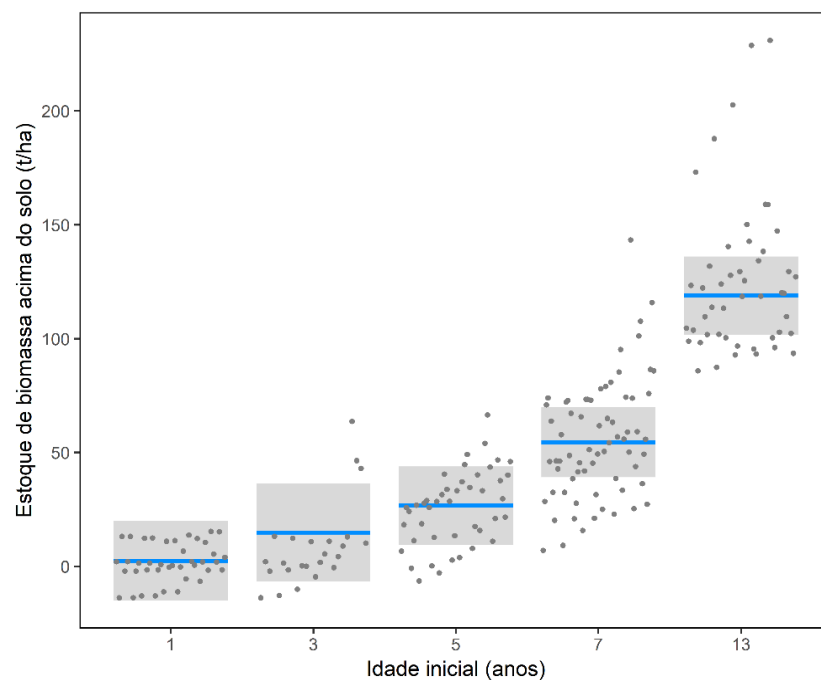


Figura 2. Parcial do modelo de estoque de biomassa acima do solo em função da idade inicial das florestas (R^2 marginal = 75%). Cada ponto representa o estoque de biomassa acima do solo ao longo do tempo para as florestas de mesma idade inicial. A linha em azul representa o valor médio do estoque de biomassa acima do solo que as florestas de mesma idade inicial apresentaram ao longo do tempo.

Densidade de caules

As mudanças na densidade de caules ao longo da trajetória sucessional não tiveram efeito da fertilização, mas foram diferentes dependendo da idade inicial das florestas. As diferenças entre as florestas e parcelas (variáveis aleatórias) explicam 20% das mudanças de densidade de caules, mas não modificam o poder de explicação do modelo (Tabela 3).

No ano da implantação do experimento, a densidade de caules das florestas de 5, 7 e 13 anos era, em média, 1771, 5680 e 4167 caules/ha, respectivamente, enquanto as florestas de 1 e 3 anos de idade não tinham indivíduos com o diâmetro mínimo. Ao longo do tempo, as florestas com idade inicial de 1 e 3 anos tiveram um aumento médio de 1126 e 725 caules/ha, respectivamente, com maiores valores nas florestas de 1 ano. Em média, o aumento da densidade de caules em 17 anos foi menor nas florestas na idade inicial de 5 anos (120 caules/ha), enquanto as florestas com 7 e 13 anos de idade inicial tiveram uma redução maior na densidade de caules no mesmo período, -2721 caules/ha e -1320 caules/ha, respectivamente.

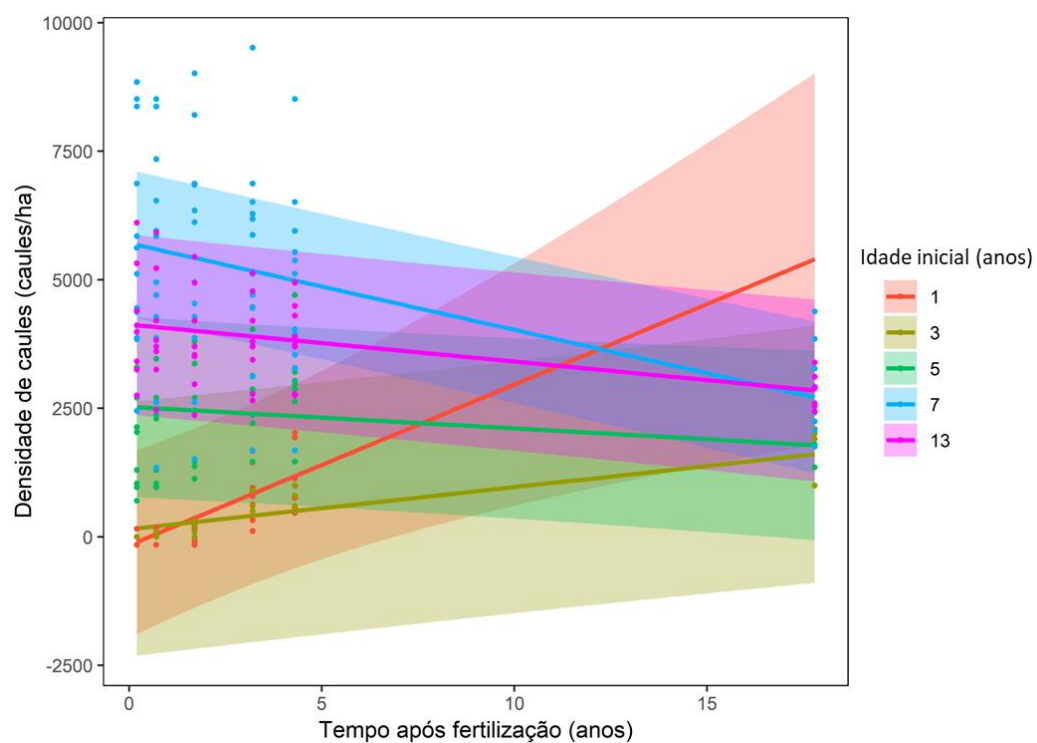


Figura 3. Parcial do modelo de densidade de caules em função da interação entre tempo após fertilização e idade inicial das florestas (R^2 marginal = 56%). Cada ponto representa uma parcela dentro de uma floresta, com medidas repetidas ao longo do tempo. As parcelas pertencentes a florestas de mesma idade inicial estão representadas na mesma cor. As linhas representam o ajuste do modelo para cada idade inicial em interação com o tempo após fertilização.

Massa média individual

As mudanças na massa média individual ao longo da trajetória sucessional foram diferentes dependendo da fertilização e da idade inicial das florestas. As diferenças entre as florestas e parcelas (variáveis aleatórias) explicam 4% das mudanças na massa média individual, mas não modificam o poder de explicação do modelo (Tabela 3).

Tanto nas florestas controle, quanto nas fertilizadas por P e P+Ca, a massa média individual aumentou ao longo do tempo. Entretanto, a taxa de aumento ao longo do tempo nas florestas fertilizadas por P não diferiu estatisticamente em relação ao controle. Nas florestas fertilizadas por P+Ca, o aumento da massa média individual é 0.72 t/ha/ano menor do que nas florestas controle. A fertilização por P+Ca+G reduziu a massa média individual ao longo do tempo, a uma taxa de 1.35 t/ha/ano menor em relação ao controle.

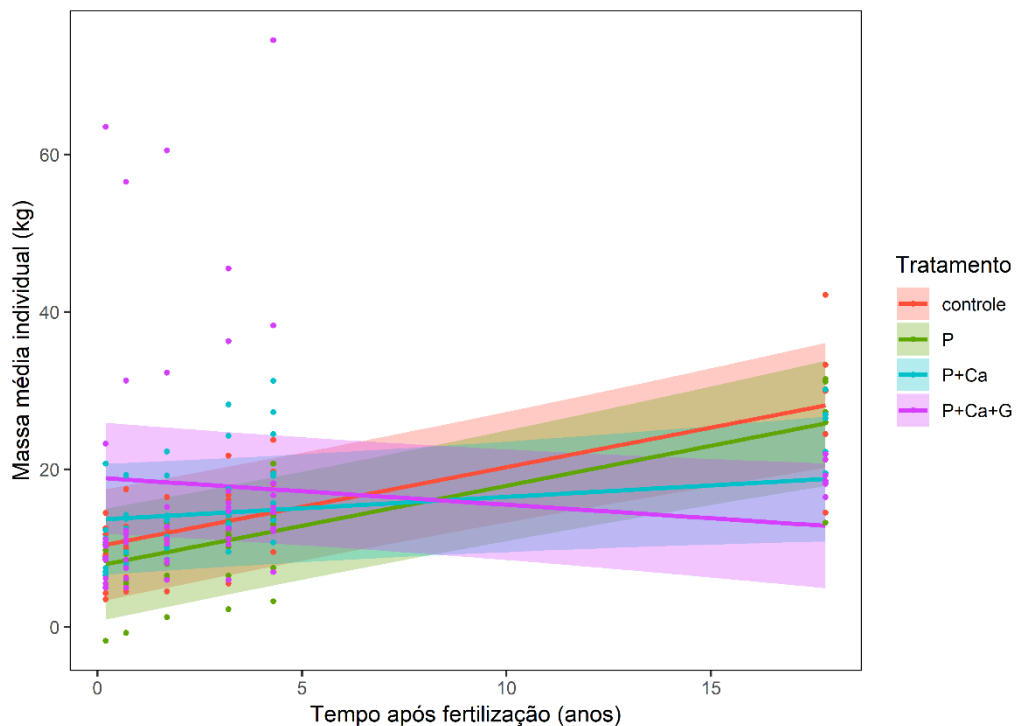


Figura 4. Parcial do modelo de massa média individual em função da interação entre tempo após fertilização e tratamento de fertilização (R^2 marginal = 57%). Cada ponto representa uma parcela dentro de uma floresta e com medidas repetidas ao longo do tempo. Cada parcela representa um tratamento, expresso em diferentes cores. As linhas representam o ajuste do modelo para cada tratamento em interação com o tempo após fertilização.

A massa média individual foi similar entre as florestas com idade inicial entre 1 e 7 anos (8.86 kg, em média). As florestas com 13 anos, porém, apresentaram indivíduos com massa média cerca de quatro vezes maior (35.21 kg, em média).

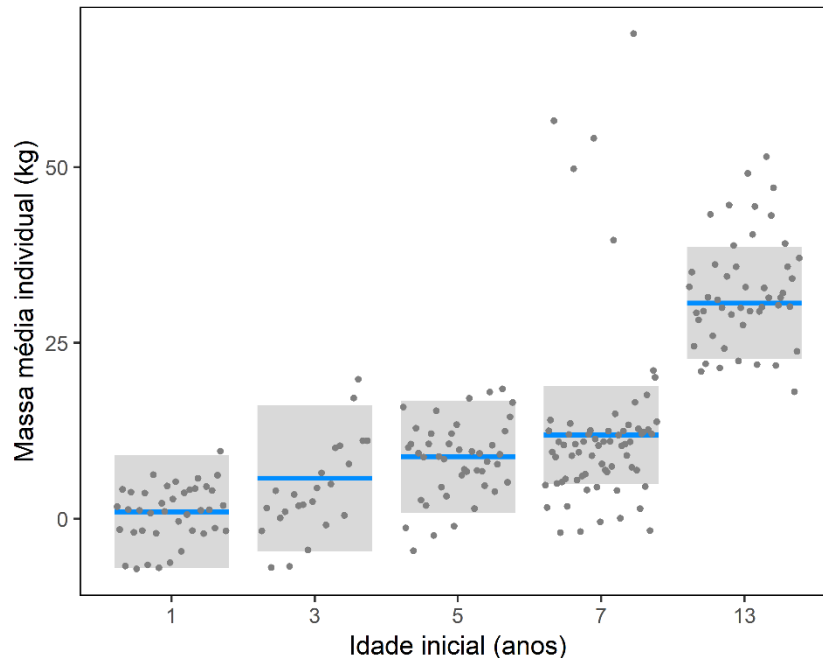


Figura 5. Parcial do modelo de massa média individual em função da idade inicial das florestas (R^2 marginal = 57%). Cada ponto representa a massa média individual ao longo do tempo para as florestas de mesma idade inicial. A linha em azul representa o valor médio da massa média individual que as florestas de mesma idade inicial apresentaram ao longo do tempo.

Discussão

O estoque de biomassa acima do solo e massa média individual das florestas mais velhas aumentaram ao longo da trajetória sucessional no tratamento controle. As florestas fertilizadas por P não diferiram do controle no estoque de biomassa acima do solo e na massa média individual. As florestas fertilizadas por P+Ca apresentaram diminuição no estoque de biomassa acima do solo e aumento da massa média individual, enquanto na fertilização por P+Ca+G tanto o estoque de biomassa acima do solo quanto a massa média dos indivíduos diminuíram ao longo do tempo. As mudanças na densidade caules não foram afetadas pela fertilização e florestas mais jovens no início do experimento apresentaram aumento da densidade de caules ao longo do tempo, enquanto as mais velhas apresentaram diminuição.

As florestas com idade inicial de 7 e 13 anos apresentaram estoques médios de biomassa acima do solo cerca de 10 e 23 vezes maiores que as florestas mais jovens, indicando que a biomassa inicial parece ser o fator mais importante para explicar a produtividade em florestas secundárias com histórico de pastagens. Este mesmo padrão foi observado em florestas tropicais secundárias com histórico de agricultura, onde a produtividade de madeira, como processo ecossistêmico, foi fortemente impulsionada pela quantidade de vegetação inicial, indicando aumento do ganho anual absoluto de biomassa em função do aumento de biomassa acima do solo (Lohbeck, Poorter, Martinez-Ramos, & Bongers, 2015). Portanto, diferentemente de florestas tropicais maduras, em que áreas mais produtivas têm menores estoques de biomassa acima do solo (Quesada et al., 2012), maiores estoques de biomassa acima do solo em florestas secundárias podem estar associados a maior produtividade a partir dos 7 anos de sucessão.

O aumento da densidade de caules no início da trajetória sucessional leva à competição por recursos, como luz, ao ponto em que se inicia o processo de autodesbaste (self-thinning). A partir deste momento, a densidade de caules diminui por mortalidade denso-dependente (White, 1981) e os indivíduos sobreviventes se desenvolvem apresentando aumento da massa individual acima do solo. Em florestas secundárias com histórico de pastagens na Amazônia Central, o aumento na densidade de caules na primeira década de sucessão, e a ausência do autodesbaste, foi explicado pelo fato de que essas áreas são, em sua maioria, destituídas de recrutamento de espécies lenhosas no início da trajetória sucessional, exceto para espécies de *Vismia*, o único gênero capaz de rebrotar após incêndios anuais para manutenção do pasto (R. D. C. G. Mesquita et al., 2015). Com o rebrotamento após a queima, o gênero *Vismia* torna-se dominante no processo inicial da sucessão secundária. Essa dominância foi observada nas florestas secundárias controle na nossa área de estudo. Entre janeiro de 2001 e março de 2005, espécies do gênero *Vismia* estavam entre as dominantes (Ted R. Feldpausch et al., 2007). Durante este período, a densidade de caules do gênero *Vismia* aumentou nas florestas mais novas (idade inicial de 1 a 5 anos) e diminuiu nas florestas mais velhas (idade inicial de 6 a 14 anos) (Ted R. Feldpausch et al., 2007).

As mudanças na densidade de caules não foram afetadas pelos tratamentos de fertilização e seguiram a trajetória esperada por autodesbaste, aumentando nas florestas com idade inicial de 1 e 3 anos e diminuindo ao longo do tempo nas florestas com idade inicial de 5 a 13 anos. Na Amazônia Central, florestas secundárias com histórico de pastagem tendem a aumentar a densidade de caules no início da trajetória sucessional, atingindo níveis de alto adensamento até iniciar o processo de autodesbaste e passar a reduzir a densidade de caules ao longo do tempo (R. D. C. G. Mesquita et al., 2015; Williamson et al., 2012). O pico de densidade

de caules (com diâmetro mínimo de 3 cm) reportado nestes trabalhos ocorreu na primeira década da trajetória sucessional, próximo a 5000 caules/ha. Entretanto, nossos resultados não indicam início de autodesbaste por mortalidade denso-dependente próximo aos 10 anos de sucessão secundária. Até o último censo em 2018, as florestas com idade inicial de 1 e 3 anos mantiveram o aumento de densidade de caules, mesmo passando pela primeira década de trajetória sucessional. Já as florestas com idade inicial de 5, 7 e 13 anos mantiveram a diminuição de densidade de caules, mesmo as que tinham idade inicial menor que 10 anos. O diâmetro mínimo adotado como critério de inclusão pode afetar a compreensão se existe ou não um tempo padrão em que o pico de densidade de caules é atingido (R. L Chazdon et al., 2007). Em Porto Rico, a densidade de caules com DAP maior que 2.5 cm em florestas secundárias com histórico de pastagens aumentou até 25 anos após o abandono e estabilizou-se (Aide, Zimmerman, Herrera, Rosario, & Serrano, 1995). No nosso estudo, a densidade de caules média em que as florestas secundárias com idade inicial de 5, 7 e 13 anos iniciaram o processo de autodesbaste foi de aproximadamente 3500, 7000 e 4500 caules/ha, respectivamente. Estes resultados sugerem que não há um tempo e sim uma densidade de caules em que se inicia o processo de autodesbaste em florestas secundárias com histórico de pastagens na Amazônia Central. Portanto, o tempo na sucessão secundária em que florestas com histórico de pastagens iniciam o processo de autodesbaste por mortalidade denso-dependente pode ter relação com as características específicas de cada floresta, com a intensidade do uso do solo e com o diâmetro mínimo de inclusão adotado nos trabalhos.

A fertilização por P não apresentou diferença significativa em relação ao controle nas mudanças estruturais das florestas secundárias estudadas, o que não era esperado. Os indícios de limitação por fósforo na área de estudo foram a principal motivação do trabalho (Ted R. Feldpausch et al., 2004). Este resultado sugere que o P disponibilizado pela fertilização não tenha sido absorvido pelas plantas. Em solos tropicais, o fosfato inorgânico, única forma de P que a planta é capaz de assimilar e que foi disponibilizado na fertilização, é largamente ligado a compostos orgânicos em solos tropicais (Walker & Syers, 1976). Além disso, o fosfato também pode formar complexos com o Al altamente solúvel em solos ácidos e intemperizados, como na Amazônia Central (Quesada et al., 2010; Walker & Syers, 1976). Mesmo com a fertilização, a absorção do P pelas plantas durante o crescimento pode ser muito baixa, pois no solo mais de 80% do P torna-se imóvel e não disponível devido à adsorção, precipitação ou conversão para a forma orgânica (Holford, 1997; Schachtman et al., 1998). Portanto, estes processos de perda e oclusão do P no solo poderiam explicar o porquê da fertilização por P não ter levado a mudanças estruturais diferentes do controle nas florestas secundárias estudadas.

De modo geral, as mudanças no estoque de biomassa acima do solo ao longo do tempo acompanharam as mudanças da massa média individual. As florestas secundárias ganham estoque de biomassa à medida que envelhecem e a massa das árvores aumentam (Stephenson et al., 2014). Entretanto, as florestas secundárias fertilizadas por P+Ca apresentaram redução do estoque de biomassa acima do solo e aumento da massa média individual ao longo do tempo. Embora a massa média dos indivíduos tenha aumentado em florestas fertilizadas por P+Ca, a taxa de aumento foi pequena e, compensada pela diminuição mais acentuada da densidade de caules (que não foi afetada pelos tratamentos de fertilização), acabou levando à redução do estoque do estoque de biomassa acima do solo ao longo do tempo.

O aumento da massa média individual ao longo do tempo nas florestas secundárias fertilizadas por P+Ca pode ser explicado pelos benefícios da calagem, que corrige solos ácidos (Scott et al. al., 2000), aliviando a toxicidade de Al e Mn (Illera, Garrido, Vizcayno, & García-González, 2004). Assim, a calagem pode ter diminuído as chances de possíveis perdas do P disponibilizado. Em geral, as respostas das plantas cultivadas à aplicação de Ca estão positivamente correlacionadas com um aumento do peso seco acima do solo e nas raízes (Caires, Churka, Garbuio, Ferrari & Morgano, 2006; Zambrosi, Alleoni, & Caires, 2007). Entretanto, o aumento da massa média individual ao longo do tempo foi a uma taxa de 0.72 kg/ano menor em relação às florestas controle. Esses resultados indicam possível realocação do crescimento para a biomassa abaixo do solo, não somente pelo melhor desenvolvimento radicular das plantas proporcionado pelo Ca, como também pelo aumento da produtividade primária líquida de raízes finas com a disponibilidade do P no solo. Em florestas tropicais maduras, a produtividade primária líquida (NPP) total, assim como a produtividade abaixo do solo, aumentam com a disponibilidade de fósforo no solo (Aragão et al., 2009). Apesar da produtividade primária líquida de biomassa total acima do solo (caules, folhas, galhos e compostos orgânicos voláteis) não variar com a fertilidade do solo nessas florestas tropicais maduras, os autores observaram aumento significativo na produtividade primária líquida de folhas e nenhuma tendência na produtividade primária líquida de caule (madeira) com o fósforo do solo (Aragão et al., 2009). Com base em experimento de fertilização, respostas análogas foram relatadas por (Christoph Gehring, Denich, Kanashiro, & Vlek, 1999) em florestas secundárias com histórico de agricultura intensa (corte e queima) no leste da Amazônia. Portanto, o efeito do P neste tratamento pode ter aumentado a produtividade de raízes e folhas e não de madeira, levando a menores valores de massa média individual ao longo do tempo em relação ao tratamento controle.

Nas florestas secundárias fertilizadas com P+Ca+G, tanto o estoque de biomassa acima do solo quanto a massa média dos indivíduos reduziram ao longo do tempo, assim como a densidade de indivíduos (não afetada pelos tratamentos de fertilização). Estes resultados sugerem um efeito da fertilização na dinâmica das florestas, de modo que o balanço entre mortalidade e recrutamento pode ter mantido a diminuição de caules ao longo da trajetória sucessional. Além disso, a mortalidade de indivíduos grandes e/ou o recrutamento de indivíduos pequenos pode ser uma possível explicação para a diminuição da massa média individual ao longo do tempo. Na bacia Amazônica, florestas maduras em solos férteis são mais produtivas e dinâmicas do que florestas em solos pobres, de modo que o tempo de permanência da biomassa acima do solo no sistema seja menor, o que explica menores estoques de biomassa acima do solo em solos férteis (Quesada et al., 2010; Quesada et al., 2012). Além da importância para as taxas metabólicas das plantas, as concentrações de P no solo podem ter um papel importante na distribuição de espécies arbóreas em florestas tropicais (Condit et al., 2013). O enriquecimento do solo com P associado à correção da acidez do solo em profundidade pode ter causado mudanças na composição de espécies ao longo do processo de sucessão e resultado em trajetória diferente de crescimento, acúmulo e estoque de biomassa. Portanto, a fertilização por P+Ca+G pode ter favorecido o estabelecimento de espécies mais produtivas, de rápido crescimento e ciclo de vida mais curto, refletindo em menores estoques de biomassa ao longo da trajetória sucessional.

Conclusão

Nossos resultados mostram que a fertilização por fósforo em florestas secundárias com histórico de pastagem na Amazônia central tem efeitos nas mudanças estruturais ao longo da sucessão dependendo da idade das florestas no momento da fertilização e da correção superficial e subsuperficial do solo. A fertilização não afetou a densidade de caules, que diminuiu ao longo da trajetória sucessional, mas reduziu os estoques de biomassa acima do solo e a massa média dos indivíduos. Portanto, investigar o efeito da fertilização na dinâmica das florestas secundárias, na composição de espécies e na dinâmica de raízes, bem como as mudanças nas propriedades químicas e físicas do solo destas florestas, permitirá melhor compreensão de como florestas secundárias com histórico de pastagem respondem ao alívio da limitação nutricional do solo ao longo da trajetória sucessional.

Implicações

Estudos com o objetivo de compreender as mudanças nos processos ecossistêmicos ao longo da recuperação natural ou assistida de florestas secundárias com histórico de pastagem, geram resultados importantes e que podem dar suporte às políticas locais e globais de mitigação de mudanças climáticas e ao gerenciamento do sequestro de carbono atmosférico. Ao optar pela manutenção de florestas secundárias com histórico de pastagens, direcionando a sucessão, ou estabelecendo plantações ou sistemas agroflorestais, os gestores da terra podem influenciar a distribuição do armazenamento de carbono na biomassa acima do solo e abaixo do solo, além da taxa na qual o carbono se acumula dentro desses reservatórios.

Agradecimentos

Agradeço ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pela bolsa de estudo concedida durante os dois anos de mestrado, à Universidade de Exeter (*College of Life and Environmental Sciences*) pelo financiamento, ao Projeto Dinâmica Biológica de Fragmentos Florestais pelo apoio logístico e financeiro, à Embrapa Amazônia Ocidental pelo apoio logístico, ao Laboratório de Biodiversidade e Ecologia Funcional e AO Centro de Estudos Integrados da Biodiversidade Amazônica pelo apoio logístico e aos assistentes de campo João Araújo e Ivanery.

Referências bibliográficas

- Aide, T. M., Zimmerman, J. K., Herrera, L., Rosario, M., & Serrano, M. (1995). Forest recovery in abandoned tropical pastures in Puerto Rico: implications for restoration ecology. *Forest Ecology and Management*, 77(1–3), 77–86. doi: 10.1016/0378-1127(95)03576-V
- Antonio, I. C. (2017). Série Histórica dos Parâmetros Climáticos Registrados na Estação Agrometeorológica Convencional da Embrapa, no Entorno de Manaus. *Embrapa Amazônia Ocidental*.
- Aragão, L. E. O. C., Malhi, Y., Metcalfe, D. B., Silva-Espejo, J. E., Jiménez, E., Navarrete, D., ... Vásquez, R. (2009). Above- and below-ground net primary productivity across ten Amazonian forests on contrasting soils. *Biogeosciences Discussions*, 6(1), 2441–2488. doi: 10.5194/bgd-6-2441-2009
- Baccini, A., Goetz, S. J., Walker, W. S., Laporte, N. T., Sun, M., Sulla-Menashe, D., ...

- Houghton, R. A. (2012). Estimated carbon dioxide emissions from tropical deforestation improved by carbon-density maps. *Nature Climate Change*, 2(3), 182–185. doi: 10.1038/nclimate1354
- Bakker, M. R. 1999. The effect of lime and gypsum applications on a sessile oak (*Quercus petraea* (M.) Liebl.) stand at la croix-scaille (French Ardennes) fine root dynamics. *Plant Soil* 206, 109 - 121.
- Brienen, R. J. W., Phillips, O. L., Feldpausch, T. R., Gloor, E., Baker, T. R., Lloyd, J., ... Zagt, R. J. (2015). Long-term decline of the Amazon carbon sink. *Nature*, 519(7543), 344–348. doi: 10.1038/nature14283
- Brown, S., Schroeder, P., & Birdsey, R. (1997). *Forest Ecology and Management* (pp. 37–47). pp. 37–47.
- Burman, U., Garg, B. K., & Kathju, S. (2009). Effect of phosphorus application on clusterbean under different intensities of water stress. *Journal of Plant Nutrition*, 32(4), 668–680. doi: 10.1080/01904160802715620
- Caires, E. F., Churka, S., Garbuio, F. J., Ferrari, R. A., Morgano, M. A. 2006. Soybean yield and quality as a function of lime and gypsum applications. *Sci. Agric.* 63, 370 -379.
- Chazdon, R. L, Letcher, S. G., van Breugel, M., Martinez-Ramos, M., Bongers, F., & Finegan, B. (2007). Rates of change in tree communities of secondary Neotropical forests following major disturbances. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, 362(1478), 273–289. doi: 10.1098/rstb.2006.1990
- Chazdon, Robin L., Broadbent, E. N., Rozendaal, D. M. A., Bongers, F., Zambrano, A. M. A., Aide, T. M., ... Poorter, L. (2016). Carbon sequestration potential of second-growth forest regeneration in the Latin American tropics. *Science Advances*, 2(5), e1501639. doi: 10.1126/sciadv.1501639
- Condit, R., Engelbrecht, B. M. J., Pino, D., Pérez, R., Turner, B. L. (2013). Species distributions in response to individual soil nutrients and seasonal drought across a community of tropical trees. *PNAS*, 110(13), 5064-5068.
- Davidson, E. A., Carvalho, C. J. R. De, Vieira, I. C. G., O, R. De, Moutinho, P., Ishida, F. Y., ... Ishida, Y. (2004). Nitrogen and Phosphorus Limitation of Biomass Growth in a Tropical Secondary Forest. *Ecological Applications*, 14(4), 150–163.
- DeLucia E, Hamilton J, Naidu S, Thomas R, Andrews J, Finzi A, ... Schlesinger, W. (1999). Net primary production of a forest ecosystem with experimental CO2 enrichment. *Science*, 284(May), 1177–1179.
- Fearnside, P. M. (1996). Amazonian deforestation and global warming: carbon stocks in vegetation replacing Brazil's Amazon forest. *Forest Ecology and Management*, 80(1–3), 21–34. doi: 10.1016/0378-1127(95)03647-4

- Feldpausch, T. R., Rodon, M. A., Fernandes, E. C. M., Riha, S. J., & Wandelli, E. (2004). Carbon and nutrient accumulation in secondary Forests regenerating on pasture in central Amazonia. *Ecological Applications*, *14*(4), 164 – 176.
- Feldpausch, T R, Riha, S. J., Fernandes, E. C. M., & Wandelli, E. V. (2005). *Development of forest structure and leaf area in secondary forests regenerating on abandoned pastures in central Amazônia*. *9*(6). doi: 10.1175/EI140.1
- Feldpausch, Ted R., da Conceicao Prates-Clark, C., Fernandes, E. C. M., & Riha, S. J. (2007). Secondary forest growth deviation from chronosequence predictions in central Amazonia. *Global Change Biology*, *13*(5), 967–979. doi: 10.1111/j.1365-2486.2007.01344.x
- Feldpausch, Ted R., Rondon, M. A., Fernandes, E. C. M., Riha, S. J., & Wandelli, E. (2004). Carbon and nutrient accumulation in secondary forests regenerating on pastures in central Amazonia. *Ecological Applications*, *14*(4 SUPPL.), 164–176. doi: 10.1890/01-6015
- Feldpausch, Ted R, Fernandes, E. C. M., & Riha, S. J. (2005). *Recovery of forest structure and leaf area in secondary forests regenerating from degraded pastures in central Amazônia*. *9*(6). doi: 10.1175/EI140.1
- Garg, B. K., Burman, U., & Kathju, S. (2004). The influence of phosphorus nutrition on the physiological response of moth bean genotypes to drought. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*, *167*(4), 503–508. doi: 10.1002/jpln.200320368
- Gehring, C., Park, S., & Denich, M. (2004). Liana allometric biomass equations for Amazonian primary and secondary forest. *Forest Ecology and Management*, *195*(1–2), 69–83. doi: 10.1016/j.foreco.2004.02.054
- Gehring, Christoph, Denich, M., Kanashiro, M., & Vlek, P. L. G. (1999). Response of secondary vegetation in Eastern Amazonia to relaxed nutrient availability constraints. *Biogeochemistry*, *45*(3), 223–241. doi: 10.1023/A:1006138815453
- Gehring, Christoph, Denich, M., & Vlek, P. L. G. (2005). Resilience of secondary forest regrowth after slash-and-burn agriculture in central Amazonia. *Journal of Tropical Ecology*, *21*(05), 519–527. doi: 10.1017/S0266467405002543
- Girardin, C. A. J., Malhi, Y., Aragão, L. E. O. C., Mamani, M., Huaraca Huasco, W., Durand, L., ... Whittaker, R. J. (2010). Net primary productivity allocation and cycling of carbon along a tropical forest elevational transect in the Peruvian Andes. *Global Change Biology*, *16*(12), 3176–3192. doi: 10.1111/j.1365-2486.2010.02235.x
- Goodman, R. C., Phillips, O. L., Del Castillo Torres, D., Freitas, L., Cortese, S. T., Monteagudo, A., & Baker, T. R. (2013). Amazon palm biomass and allometry. *Forest Ecology and Management*, *310*, 994–1004. doi: 10.1016/j.foreco.2013.09.045

- Harris, N. L., Brown, S., Hagen, S. C., Saatchi, S. S., Petrova, S., Salas, W., ... Lotsch, A. (2012). Baseline Map of Carbon Emissions from Deforestation in Tropical Regions. *Science*, 336(6088), 1573–1576. doi: 10.1126/science.1217962
- Hedin, L. O., Vitousek, P. M., & Matson, P. A. (2003). Nutrient losses over four million years of tropical forest development. *Ecology*, 84(9), 2231–2255. doi: 10.1890/02-4066
- Holford, I. C. R. (1997). An introduction to early years pioneers in context. *Australian Journal of Soil Research*, 35, 227–239. doi: 10.4324/9781315747026
- Houghton, R. A., Skole, D. L., Nobre, C. A., Hackler, J. L., Lawrence, K. T., & Chomentowski, W. H. (2000). Letters To Nature. *Nature*, 403, 301–304. doi: 10.1038/35002062
- Illera, V., Garrido, F., Vizcayno, C., & García-González, M. T. (2004). Field application of industrial by-products as Al toxicity amendments: Chemical and mineralogical implications. *European Journal of Soil Science*, 55(4), 681–692. doi: 10.1111/j.1365-2389.2004.00640.x
- Köppen, W. Climatologia; versão para o espanhol de Pedro R. Hendrichs Pérez. México, *Fundo de Cultura Econômica*. 466 p. 1948.
- Laurance, W. F., Fearnside, P. M., Laurance, S. G., Delamonica, P., Lovejoy, T. E., Merona de Rankin, M. J., ... Gascon, C. (1999). Relationship between soils and Amazon forest biomass: a landscape scale study. *Forest Ecology and Management*, 118(1–3), 127–138. doi: 10.1016/S0378-1127(98)00494-0
- Lepsch, I. F. 19 Lições de Pedologia. São Paulo, SP. *Oficina de Textos*, 456 p. 2011.
- Lohbeck, M., Poorter, L., Martinez-Ramos, M., & Bongers, F. (2015). Biomass is the main driver of changes in ecosystem process rates during tropical forest succession. *Ecology*, 96(5), 1242–1252.
- Longworth, J. B., Mesquita, R. C., Bentos, T. V., Moreira, M. P., Massoca, P. E., & Williamson, G. B. (2014). Shifts in dominance and species assemblages over two decades in alternative successions in central Amazonia. *Biotropica*, 46(5), 529–537. doi: 10.1111/btp.12143
- Lovejoy, T. E.; Bierregaard, R.O. Central Amazonian forest fragments and the minimum critical size of ecosystems project. In: A. H. Gentry, editor. *Four neotropical rainforests*. Yale University Press, New Haven, Connecticut, USA. P. 60–71, 1990.
- Malhi, Y., & Grace, J. (2000). Tropical forests and atmospheric carbon dioxide. *Trends in Ecology & Evolution*, 15(8), 332–337. doi: 10.1016/S0169-5347(00)01906-6
- Meriño-Gergichevich, C., Alberdi, M., Ivanov, a G., & Reyes-Diaz, M. (2010). Al³⁺ - Ca²⁺ interaction in plants growing in acid soils: al-phytotoxicity response to calcareous amendments. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition*, 10, 217–243.

- Mesquita, R. C. G., Ickes, K., Ganade, G., & Williamson, G. B. (2001). Alternative Successional Pathways in the Amazon Basin Linked references are available on JSTOR for this article : Alternative successional pathways in the Amazon Basin. *Journal of Ecology*, *89*(4), 528–537.
- Mesquita, R. D. C. G., Massoca, P. E. D. S., Jakovac, C. C., Bentos, T. V., & Williamson, G. B. (2015). Amazon Rain Forest Succession: Stochasticity or Land-Use Legacy? *BioScience*, *65*(9), 849–861. doi: 10.1093/biosci/biv108
- Moran, E. F., Brondizio, E. S., Tucker, J. M., Da Silva-Forsberg, M. C., McCracken, S., & Falesi, I. (2000). Effects of soil fertility and land-use on forest succession in amazonia. *Forest Ecology and Management*, *139*(1–3), 93–108. doi: 10.1016/S0378-1127(99)00337-0
- Nelson, B. W., Mesquita, R., Pereira, J. L. G., Souza, S. G. a, Batista, G. T., & Couto, L. B. (1999). Allometric Regressions for Improved of Secondary Forest Biomass in the Central Amazon. *Forest Ecology and Management*, *117*(June), 149–167. doi: 10.1016/S0378-1127(98)00475-7
- Norden, N., Mesquita, R. C. G., Bentos, T. V., Chazdon, R. L., & Williamson, G. B. (2011). Contrasting community compensatory trends in alternative successional pathways in central Amazonia. *Oikos*, *120*(1), 143–151. doi: 10.1111/j.1600-0706.2010.18335.x
- Novais, R. F. et al. Fertilidade do solo. *Sociedade Brasileira de Ciência do Solo*. Viçosa, MG. 1017 p. 2007.
- Oren, R., Ellsworth, D. S., Johnsen, K. H., Phillips, N., Ewers, B. E., Maier, C., ... Katul, G. G. (2001). Soil fertility limits carbon sequestration by forest ecosystems in a CO₂-enriched atmosphere. *Nature*, *411*(6836), 469–472. doi: 10.1038/35078064
- Pan, Y., Birdsey, R. A., Fang, J., Houghton, R., Kauppi, P. E., Kurz, W. A., ... Hayes, D. (2011). A Large and Persistent Carbon Sink in the World's Forests. *Science*, *333*(6045), 988–993. doi: 10.1126/science.1201609
- Pavan, M. A., Bingham, F. T., & Peryea, F. J. (1987). Influence of Calcium and Magnesium Salts on Acid Soil Chemistry and Calcium Nutrition of Apple1. *Soil Science Society of America Journal*, *51*(6), 1526. doi: 10.2136/sssaj1987.03615995005100060022x
- Peel, M. C., Finlayson, B. L., & McMahon, T. A. (2007). Updated world map of the Koppen-Geiger climate classificatio. *Hydrology and Earth System Sciences*, *11*, 1633–1644. doi: 10.1002/ppp.421
- Phillips, O. L., Malhi, Y., Higuchi, N., Laurance, W. F., Percy, V., Vásquez, R. M., ... Grace, J. (2016). Changes in the Carbon Balance of Tropical Forests : Evidence from Long-Term

- Plots. *American Association for the Advancement of Science Stable*, 282(5388), 439–442.
- Pinheiro J, Bates D, DebRoy S, Sarkar D, R Core Team (2019). nlme: Linear and Nonlinear Mixed Effects Models. *R package version 3.1-140*, <https://CRAN.R-project.org/package=nlme>.
- Poorter, L., Bongers, F., Aide, T. M., Almeyda Zambrano, A. M., Balvanera, P., Becknell, J. M., ... Rozendaal, D. M. A. (2016). Biomass resilience of Neotropical secondary forests. *Nature*, 530(7589), 211–214. doi: 10.1038/nature16512
- Quesada, C. A., Lloyd, J., Anderson, L. O., Fyllas, N. M., Schwarz, M., & Czimczik, C. I. (2011). Soils of Amazonia with particular reference to the RAINFOR sites. *Biogeosciences*, 8(6), 1415–1440. doi: 10.5194/bg-8-1415-2011
- Quesada, C. A., Lloyd, J., Schwarz, M., Patiño, S., Baker, T. R., Czimczik, C., ... Paiva, R. (2010). Variations in chemical and physical properties of Amazon forest soils in relation to their genesis. *Biogeosciences*, 7(5), 1515–1541. doi: 10.5194/bg-7-1515-2010
- Quesada, C. A., Phillips, O. L., Schwarz, M., Czimczik, C. I., Baker, T. R., Patiño, S., ... Lloyd, J. (2012). Basin-wide variations in Amazon forest structure and function are mediated by both soils and climate. *Biogeosciences*, 9(6), 2203–2246. doi: 10.5194/bg-9-2203-2012
- Saatchi, S., Houghton, R. A., Dos Santos Alvalá, R. C., Soares, J. V., & Yu, Y. (2007). Distribution of aboveground live biomass in the Amazon basin. *Global Change Biology*, 13(4), 816–837. doi: 10.1111/j.1365-2486.2007.01323.x
- Sanchez, P. A. Properties and management of soils in the tropics. John Wiley e Sons, *New York*. 1976.
- Schachtman, Reid, & Ayling. (1998). Phosphorus Uptake by Plants: From Soil to Cell. *Plant Physiology*, 116(2), 447–453. doi: 10.1104/pp.116.2.447
- Schiatti, J., Martins, D., Emilio, T., Souza, P. F., Levis, C., Baccaro, F. B., ... Magnusson, W. E. (2016). Forest structure along a 600 km transect of natural disturbances and seasonality gradients in central-southern Amazonia. *Journal of Ecology*, 104(5), 1335–1346. doi: 10.1111/1365-2745.12596
- Scott, B. J., Ridley, A. M., Conyers, M. K. 2000. Management of soil acidity in long-term pastures of south-eastern Australia: a review. *Aust. J. Exp. Agrl.* 40, 1173 - 1198.
- Silver, W. L., Ostertag, R., & Lugo, A. E. (2000). The potential for carbon sequestration through reforestation of abandoned tropical agricultural and pasture lands. *Restoration Ecology*, 8(4), 394–407. doi: 10.1046/j.1526-100X.2000.80054.x
- Steininger, M. K. (2000). Satellite estimation of tropical secondary forest above-ground biomass: data fromm Brazil and Bolivia. *Int. J. Remote Sens.*, 21(6/7), 1139–1158.
- Stephenson, N. L., Das, A. J., Condit, R., Russo, S. E., Baker, P. J., Beckman, N. G., ... Zavala, M. A. (2014). Rate of tree carbon accumulation increases continuously with tree size.

- Nature*, 507(7490), 90–93. doi: 10.1038/nature12914
- Suriyagoda, L. D. B., Ryan, M. H., Renton, M., & Lambers, H. (2014). Plant responses to limited moisture and phosphorus availability: A meta-analysis. In *Advances in Agronomy* (1st ed., Vol. 124). doi: 10.1016/B978-0-12-800138-7.00004-8
- Tan, Z., Zhang, Y., Yu, G., Sha, L., Tang, J., Deng, X., & Song, Q. (2010). Carbon balance of a primary tropical seasonal rain forest. *Journal of Geophysical Research Atmospheres*, 115(13), 1–17. doi: 10.1029/2009JD012913
- Uhl, C., Buschbacher, R., & Serrao, E. A. S. (1988). Abandoned Pastures in Eastern Amazonia. I. Patterns of Plant Succession. *The Journal of Ecology*, 76(3), 663–681.
- Van Wambeke, A. Soils of the tropics: properties and appraisal. McGraw-Hill, New York, USA. 1992.
- Vance, C. P., Uhde-Stone, C., & Allan, D. L. (2003). Phosphorus acquisition and use: Critical adaptations by plants for securing a nonrenewable resource. *New Phytologist*, 157(3), 423–447. doi: 10.1046/j.1469-8137.2003.00695.x
- Veloso, H. P. et al. Classificação da vegetação Brasileira adaptada a um sistema universal. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE)/Departamento de Recursos Naturais e Estudos Ambientais, Rio de Janeiro, Brasil. 1991.
- Vitousek, P M, & Sanford, R. L. (1986). Nutrient Cycling in Moist Tropical Forest. *Annual Review of Ecology and Systematics*, 17(1), 137–167. doi: 10.1146/annurev.es.17.110186.001033
- Vitousek, Peter M., Porder, S., Houlton, B. Z., & Chadwick, O. A. (2010). Terrestrial phosphorus limitation: Mechanisms, implications, and nitrogen-phosphorus interactions. *Ecological Applications*, 20(1), 5–15. doi: 10.1890/08-0127.1
- Vitousek, Peter M. (1984). Litterfall, nutrient cycling, and nutrient limitation in tropical forests. *Ecology*, 65(1), 285–298.
- Walker, T. W., & Syers, J. K. (1976). The fate of phosphorus during pedogenesis. *Geoderma*, 15(1), 1–19. doi: 10.1016/0016-7061(76)90066-5
- White, J. (1981). The Allometric of the Self-thinning. *Journal Theor. Biol.*, 89, 475–500.
- Williamson, G. B., Bentos, T. V., Longworth, J. B., & Mesquita, R. C. G. (2012). Convergence and divergence in alternative successional pathways in Central Amazonia. *Plant Ecology and Diversity*, 7(1–2), 1–8. doi: 10.1080/17550874.2012.735714
- Zambrosi, F. C. B., Alleoni, L. R. F., & Caires, E. F. (2007). Nutrient concentration in soil water extracts and soybean nutrition in response to lime and gypsum applications to an acid Oxisol under no-till system. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 79(2), 169–179. doi: 10.1007/s10705-007-9105-7

- Zarin, D. J., Davidson, E. a, Brondizio, E., Vieira, I. C. G., Sá, T., Schuur, E. a G., ... Denich, M. (2005). Legacy of fire slows carbon accumulation in. *Ecology*, 3(7), 365–369. doi: 10.1890/1540-9295(2005)003%5B0365:LOFSCA%5D2.0.CO;2
- Zarin, D. J., Ducey, M. J., Tucker, J. M., & Salas, W. A. (2001). Potential biomass accumulation in Amazonian regrowth forests. *Ecosystems*, 4(7), 658–668. doi: 10.1007/s10021-001-0035-y

Tabela 1: Constante alométrica (a), coeficiente angular (b), coeficiente de determinação (R^2) erro padrão residual (RES) e critério de informação de Akaike (AIC) de modelos alométricos Altura-Diâmetro (H-DAP) ajustados com medidas de 55 árvores da Fazenda Rodão. O intervalo de DAP é de 3 a 29 cm, com os seguintes números de indivíduos por classe diamétrica de 10 cm: 19 (0-9.9 cm), 27 (10-19.9 cm) e 9 (20-30 cm).

Modelo	Constante alométrica	Coeficiente angular	R^2	RES	AIC
$\ln(H) = a + b * DAP$ (log-linear)	1.53	0.05	0.58	0.29	25.56
$\ln(H) = a + b * \ln(DAP)$ (log-log)	0.78	0.59	0.66	0.26	13.65

Tabela 2: Resultados do modelo log-log para altura (H) em função do diâmetro (DAP) e do tratamento (controle e fertilização). A contribuição relativa dos preditores é dada pelos coeficientes dos modelos. A probabilidade para os preditores isolados ou da interação entre preditores está entre parênteses. Os coeficientes em negrito têm $P < 0.05$.

Modelo	Preditores	Contribuição relativa dos preditores	Erro padrão	Valor de t	Nível de significância do valor de t
$\ln(H) = a + b * \ln(DAP) * c * \text{tratamento}$	constante alométrica	1.01	0.28	3.60	<0
	$\ln(DAP)$	0.49	0.11	4.57	<0
	fertilização	-0.35	0.33	-1.05	ns
	$\ln(DAP) * \text{fertilização}$	0.16	0.13	1.24	ns
$\ln(H) = a + b * \ln(DAP) + c * \text{tratamento}$	constante alométrica	0.73	0.16	4.45	<0
	$\ln(DAP)$	0.60	0.06	10.24	<0
	fertilização	0.05	0.08	0.64	ns
$\ln(H) = a + b * \ln(DAP)$	constante alométrica	0.78	0.14	5.43	<0
	$\ln(DAP)$	0.59	0.06	10.33	<0

Tabela 3: Resultados dos modelos lineares mistos para estoque de biomassa acima do solo, densidade de caules e massa média individual (variáveis dependentes) em função da idade inicial das florestas secundárias, dos tratamentos de fertilização e do tempo após fertilização (variáveis predictoras fixas). As florestas secundárias (blocos) e parcelas foram aninhadas e consideradas efeito randômico em todos os modelos. Os valores de R² marginal são dos modelos ajustados considerando somente os efeitos fixos e os valores de R² condicional correspondem ao modelo completo (incluindo o efeito randômico). A contribuição relativa dos preditores é dada pelos coeficientes dos modelos (β). A probabilidade para os preditores isolados ou da interação entre preditores está entre parênteses. Os coeficientes em negrito têm $P < 0.05$.

Variáveis dependentes	R ²		Contribuição relativa dos preditores		
	R ² marg	R ² cond	Tempo após fertilização	Fertilização	Idade inicial
Estoque de biomassa acima do solo	0.75	0.75	$\beta = \mathbf{1.40 (0.0020)}$	(P) $\beta = -11.10 (0.2390)$	(3 anos) $\beta = 12.35 (0.3449)$
				(P+Ca) $\beta = 16.50 (0.0847)$	(5 anos) $\beta = 24.24 (0.0564)$
				(P+Ca+G) $\beta = 4.71 (0.6139)$	(7 anos) $\beta = \mathbf{52.04 (0.0021)}$
					(13 anos) $\beta = \mathbf{116.40 (0.0001)}$
Densidade de caules	0.56	0.76	$\beta = \mathbf{312.56 (0.0029)}$	*	(3 anos) $\beta = 312.56 (0.8491)$
					(5 anos) $\beta = 2694.45 (0.0892)$
					(7 anos) $\beta = \mathbf{5873.88 (0.0041)}$
					(13 anos) $\beta = \mathbf{4293.33 (0.0202)}$
Massa média individual	0.57	0.61	$\beta = \mathbf{1.01 (0.0000)}$	(P) $\beta = -2.47 (0.5013)$	(3 anos) $\beta = 4.77 (0.4609)$
				(P+Ca) $\beta = 3.39 (0.3576)$	(5 anos) $\beta = 7.82 (0.1724)$
				(P+Ca+G) = $\mathbf{8.72 (0.0230)}$	(7 anos) $\beta = 10.92 (0.0591)$
					(13 anos) $\beta = \mathbf{29.67 (0.0018)}$

* Densidade de caules não teve efeito da variável fertilização e, portanto, foi removida do modelo.

Tabela 3: Extensão.

Variáveis dependentes	R ²		Contribuição relativa dos preditores
	R ² marg	R ² cond	Interação entre preditores
Estoque de biomassa acima do solo	0.75	0.75	(Tempo após fertilização * P) $\beta = 0.17$ (0.7910)
			(Tempo após fertilização * P+Ca) $\beta = -3.04$ (0.0000)
			(Tempo após fertilização * P+Ca+G) $\beta = -2.53$ (0.001)
Densidade de caules	0.56	0.76	(Tempo após fertilização * idade inicial 3 anos) $\beta = -230.65$ (0.0314)
			(Tempo após fertilização * idade inicial 5 anos) $\beta = -354.64$ (0.0010)
			(Tempo após fertilização * idade inicial 7 anos) $\beta = -480.90$ (0.0000)
			(Tempo após fertilização * idade inicial 13 anos) $\beta = -384.56$ (0.0003)
Massa média individual	0.57	0.61	(Tempo após fertilização * P) $\beta = 0.01$ (0.9642)
			(Tempo após fertilização * P+Ca) $\beta = -0.72$ (0.0022)
			(Tempo após fertilização * P+Ca+G) $\beta = -1.35$ (0.0000)

Tabela 4: Informações e valores das variáveis explicativas e respostas das 40 parcelas distribuídas nas 10 florestas secundárias com histórico de pastagens ao longo da BR-174, na Amazônia Central. A floresta DAS-1 possui 3 repetições por tratamento (12 parcelas) e, portanto, foi obtido um valor médio por tratamento (4 parcelas).

Fazenda	Floresta (bloco)	Parcela	Área (m ²)	Censo 1 (jan/2001)							
				Área amostrada dos censos 1 ao 5 (m ²)	Área amostrada no censo 6 (m ²)	Tratamento	Idade inicial (anos)	Tempo após fertilização (anos)	Estoque de biomassa acima do solo (t/ha)	Densidade de caules (caules/ha)	Massa média individual (kg)
DAS	DAS-1	DAS1-PC1	100	100		controle	1	0.2	0	0	0
DAS	DAS-1	DAS1-PC2	100	100		P	1	0.2	0	0	0
DAS	DAS-1	DAS1-PC3	100	100		P+Ca	1	0.2	0	0	0
DAS	DAS-1	DAS1-PC4	100	100		P+Ca+G	1	0.2	0	0	0
DAS	DAS-2	DAS2-PC1	225	60		P+Ca	5	0.2	20.5	1167	18
DAS	DAS-2	DAS2-PC2	225	60		P+Ca+G	5	0.2	20.4	3167	6
DAS	DAS-2	DAS2-PC3	225	60		controle	5	0.2	23.7	2500	9
DAS	DAS-2	DAS2-PC4	225	60		P	5	0.2	11	1500	7
DAS	DAS-3	DAS3-PC1	400	105	400	P	13	0.2	91.4	2952	31
DAS	DAS-3	DAS3-PC2	400	105	400	P+Ca+G	13	0.2	100.9	2286	44
DAS	DAS-3	DAS3-PC3	400	105	400	controle	13	0.2	121.2	4857	25
DAS	DAS-3	DAS3-PC4	400	105	400	P+Ca	13	0.2	117.5	3524	33
DIM	Dimona-1	DIM1-PC1	225	60		P+Ca	7	0.2	20.8	3833	5
DIM	Dimona-1	DIM1-PC2	225	60		P+Ca+G	7	0.2	30.6	4333	7
DIM	Dimona-1	DIM1-PC3	225	60		P	7	0.2	57.7	8333	7
DIM	Dimona-1	DIM1-PC4	225	60		controle	7	0.2	71.8	6833	11
DIM	Dimona-3	DIM3-PC1	225	60	225	P	7	0.2	32.8	4167	8
DIM	Dimona-3	DIM3-PC2	225	60	225	P+Ca+G	7	0.2	65.9	1000	66

Tabela 4: Extensão.

Fazenda	Floresta (bloco)	Parcela	Área (m ²)	Censo 1 (jan/2001)							
				Área amostrada dos censos 1 ao 5 (m ²)	Área amostrada no censo 6 (m ²)	Tratamento	Idade inicial (anos)	Tempo após fertilização (anos)	Estoque de biomassa acima do solo (t/ha)	Densidade de caules (caules/ha)	Massa média individual (kg)
DIM	Dimona-3	DIM3-PC3	225	60	225	P+Ca	7	0.2	46.3	3667	13
DIM	Dimona-3	DIM3-PC4	225	60	225	controle	7	0.2	18.1	3000	6
DIM	Dimona-2	DIM2-PC1	400	105	400	P+Ca	13	0.2	186.8	6571	28
DIM	Dimona-2	DIM2-PC2	400	105	400	P	13	0.2	72.7	4857	15
DIM	Dimona-2	DIM2-PC3	400	105	400	controle	13	0.2	96.1	3714	26
DIM	Dimona-2	DIM2-PC4	400	105	400	P+Ca+G	13	0.2	124.3	4571	27
RD	Rodão-1	RD1-PC1	225	225		controle	1	0.2	0	0	0
RD	Rodão-1	RD1-PC2	225	225		P+Ca	1	0.2	0	0	0
RD	Rodão-1	RD1-PC3	225	225		P	1	0.2	0	0	0
RD	Rodão-1	RD1-PC4	225	225		P+Ca+G	1	0.2	0	0	0
RD	Rodão-4	RD4-PC1	100	100	100	P+Ca	3	0.2	0	0	0
RD	Rodão-4	RD4-PC2	100	100	100	controle	3	0.2	0	0	0
RD	Rodão-4	RD4-PC3	100	100	100	P+Ca+G	3	0.2	0	0	0
RD	Rodão-4	RD4-PC4	100	100	100	P	3	0.2	0	0	0
RD	Rodão-3	RD3-PC1	225	60	225	P+Ca+G	5	0.2	1.2	500	2
RD	Rodão-3	RD3-PC2	225	60	225	controle	5	0.2	9.2	833	11
RD	Rodão-3	RD3-PC3	225	60	225	P	5	0.2	13.7	2833	5
RD	Rodão-3	RD3-PC4	225	60	225	P+Ca	5	0.2	7.4	1667	4
RD	Rodão-2	RD2-PC1	225	60	225	P	7	0.2	33.1	5333	6
RD	Rodão-2	RD2-PC2	225	60	225	P+Ca+G	7	0.2	44.9	10333	4
RD	Rodão-2	RD2-PC3	225	60	225	P+Ca	7	0.2	60	10000	6
RD	Rodão-2	RD2-PC4	225	60	225	controle	7	0.2	55.7	7333	8

Tabela 4: Extensão.

Fazenda	Floresta (bloco)	Parcela	Área (m ²)	Censo 2 (july/2001)							
				Área amostrada dos censos 1 ao 5 (m ²)	Área amostrada no censo 6 (m ²)	Tratamento	Idade (anos)	Tempo após fertilização (anos)	Estoque de biomassa acima do solo (t/ha)	Densidade de caules (caules/ha)	Massa média individual (kg)
DAS	DAS-1	DAS1-PC1	100	100		controle	1.5	0.7	0	0	0
DAS	DAS-1	DAS1-PC2	100	100		P	1.5	0.7	0.1	33	3
DAS	DAS-1	DAS1-PC3	100	100		P+Ca	1.5	0.7	0	0	0
DAS	DAS-1	DAS1-PC4	100	100		P+Ca+G	1.5	0.7	0	0	0
DAS	DAS-2	DAS2-PC1	225	60		P+Ca	5.5	0.7	31.7	2833	11
DAS	DAS-2	DAS2-PC2	225	60		P+Ca+G	5.5	0.7	29.3	3167	9
DAS	DAS-2	DAS2-PC3	225	60		controle	5.5	0.7	27.5	2833	10
DAS	DAS-2	DAS2-PC4	225	60		P	5.5	0.7	13.5	1500	9
DAS	DAS-3	DAS3-PC1	400	105	400	P	13.5	0.7	97.1	3238	30
DAS	DAS-3	DAS3-PC2	400	105	400	P+Ca+G	13.5	0.7	103.3	2000	52
DAS	DAS-3	DAS3-PC3	400	105	400	controle	13.5	0.7	130.4	4762	27
DAS	DAS-3	DAS3-PC4	400	105	400	P+Ca	13.5	0.7	126.7	3143	40
DIM	Dimona-1	DIM1-PC1	225	60		P+Ca	7.5	0.7	22.2	3833	6
DIM	Dimona-1	DIM1-PC2	225	60		P+Ca+G	7.5	0.7	34	4667	7
DIM	Dimona-1	DIM1-PC3	225	60		P	7.5	0.7	59.7	8333	7
DIM	Dimona-1	DIM1-PC4	225	60		controle	7.5	0.7	71.4	6500	11
DIM	Dimona-3	DIM3-PC1	225	60	225	P	7.5	0.7	36.2	4500	8
DIM	Dimona-3	DIM3-PC2	225	60	225	P+Ca+G	7.5	0.7	68.7	1167	59
DIM	Dimona-3	DIM3-PC3	225	60	225	P+Ca	7.5	0.7	51.4	3500	15
DIM	Dimona-3	DIM3-PC4	225	60	225	controle	7.5	0.7	19.5	2833	7

Tabela 4: Extensão.

Fazenda	Floresta (bloco)	Parcela	Área (m ²)	Censo 2 (july/2001)							
				Área amostrada dos censos 1 ao 5 (m ²)	Área amostrada no censo 6 (m ²)	Tratamento	Idade (anos)	Tempo após fertilização (anos)	Estoque de biomassa acima do solo (t/ha)	Densidade de caules (caules/ha)	Massa média individual (kg)
DIM	Dimona-2	DIM2-PC1	400	105	400	P+Ca	13.5	0.7	200.7	6381	31
DIM	Dimona-2	DIM2-PC2	400	105	400	P	13.5	0.7	75	4667	16
DIM	Dimona-2	DIM2-PC3	400	105	400	controle	13.5	0.7	100.5	3714	27
DIM	Dimona-2	DIM2-PC4	400	105	400	P+Ca+G	13.5	0.7	125.5	4286	29
RD	Rodão-1	RD1-PC1	225	225		controle	1.5	0.7	0	0	0
RD	Rodão-1	RD1-PC2	225	225		P+Ca	1.5	0.7	0	0	0
RD	Rodão-1	RD1-PC3	225	225		P	1.5	0.7	0	0	0
RD	Rodão-1	RD1-PC4	225	225		P+Ca+G	1.5	0.7	0	0	0
RD	Rodão-4	RD4-PC1	100	100	100	P+Ca	3.5	0.7	0.2	100	2
RD	Rodão-4	RD4-PC2	100	100	100	controle	3.5	0.7	0	0	0
RD	Rodão-4	RD4-PC3	100	100	100	P+Ca+G	3.5	0.7	0	0	0
RD	Rodão-4	RD4-PC4	100	100	100	P	3.5	0.7	0	0	0
RD	Rodão-3	RD3-PC1	225	60	225	P+Ca+G	5.5	0.7	1.8	500	4
RD	Rodão-3	RD3-PC2	225	60	225	controle	5.5	0.7	11.3	833	14
RD	Rodão-3	RD3-PC3	225	60	225	P	5.5	0.7	16.1	3000	5
RD	Rodão-3	RD3-PC4	225	60	225	P+Ca	5.5	0.7	10.1	1833	6
RD	Rodão-2	RD2-PC1	225	60	225	P	7.5	0.7	15.4	2833	5
RD	Rodão-2	RD2-PC2	225	60	225	P+Ca+G	7.5	0.7	43	10000	4
RD	Rodão-2	RD2-PC3	225	60	225	P+Ca	7.5	0.7	58.5	8833	7
RD	Rodão-2	RD2-PC4	225	60	225	controle	7.5	0.7	64.3	7333	9

Tabela 4: Extensão.

Fazenda	Floresta (bloco)	Parcela	Área (m ²)	Censo 3 (july/2002)							
				Área amostrada dos censos 1 ao 5 (m ²)	Área amostrada no censo 6 (m ²)	Tratamento	Idade (anos)	Tempo após fertilização (anos)	Estoque de biomassa acima do solo (t/ha)	Densidade de caules (caules/ha)	Massa média individual (kg)
DAS	DAS-1	DAS1-PC1	100	100		controle	2.5	1.7	0.3	100	3
DAS	DAS-1	DAS1-PC2	100	100		P	2.5	1.7	0.5	200	3
DAS	DAS-1	DAS1-PC3	100	100		P+Ca	2.5	1.7	0.2	67	2
DAS	DAS-1	DAS1-PC4	100	100		P+Ca+G	2.5	1.7	0.1	33	2
DAS	DAS-2	DAS2-PC1	225	60		P+Ca	6.5	1.7	42.8	3833	11
DAS	DAS-2	DAS2-PC2	225	60		P+Ca+G	6.5	1.7	40.9	4167	10
DAS	DAS-2	DAS2-PC3	225	60		controle	6.5	1.7	33.8	3167	11
DAS	DAS-2	DAS2-PC4	225	60		P	6.5	1.7	17.8	1833	10
DAS	DAS-3	DAS3-PC1	400	105	400	P	14.5	1.7	102.5	3048	34
DAS	DAS-3	DAS3-PC2	400	105	400	P+Ca+G	14.5	1.7	100.8	1905	53
DAS	DAS-3	DAS3-PC3	400	105	400	controle	14.5	1.7	140.4	4476	31
DAS	DAS-3	DAS3-PC4	400	105	400	P+Ca	14.5	1.7	139.1	3238	43
DIM	Dimona-1	DIM1-PC1	225	60		P+Ca	8.5	1.7	27.1	3833	7
DIM	Dimona-1	DIM1-PC2	225	60		P+Ca+G	8.5	1.7	42.3	4500	9
DIM	Dimona-1	DIM1-PC3	225	60		P	8.5	1.7	62.5	8167	8
DIM	Dimona-1	DIM1-PC4	225	60		controle	8.5	1.7	73.3	6833	11
DIM	Dimona-3	DIM3-PC1	225	60	225	P	8.5	1.7	40.4	4667	9
DIM	Dimona-3	DIM3-PC2	225	60	225	P+Ca+G	8.5	1.7	73.3	1167	63
DIM	Dimona-3	DIM3-PC3	225	60	225	P+Ca	8.5	1.7	56.6	3500	16
DIM	Dimona-3	DIM3-PC4	225	60	225	controle	8.5	1.7	21.1	2833	7
DIM	Dimona-2	DIM2-PC1	400	105	400	P+Ca	14.5	1.7	213.9	5905	36

Tabela 4: Extensão.

Fazenda	Floresta (bloco)	Parcela	Área (m ²)	Área amostrada dos censos 1 ao 5 (m ²)	Área amostrada no censo 6 (m ²)	Tratamento	Censo 3 (july/2002)				
							Idade (anos)	Tempo após fertilização (anos)	Estoque de biomassa acima do solo (t/ha)	Densidade de caules (caules/ha)	Massa média individual (kg)
DIM	Dimona-2	DIM2-PC2	400	105	400	P	14.5	1.7	82	4667	18
DIM	Dimona-2	DIM2-PC3	400	105	400	controle	14.5	1.7	96.7	3429	28
DIM	Dimona-2	DIM2-PC4	400	105	400	P+Ca+G	14.5	1.7	129.8	4000	32
RD	Rodão-1	RD1-PC1	225	225		controle	2.5	1.7	0.7	311	2
RD	Rodão-1	RD1-PC2	225	225		P+Ca	2.5	1.7	0.2	44	3
RD	Rodão-1	RD1-PC3	225	225		P	2.5	1.7	0.2	89	2
RD	Rodão-1	RD1-PC4	225	225		P+Ca+G	2.5	1.7	0	0	0
RD	Rodão-4	RD4-PC1	100	100	100	P+Ca	4.5	1.7	1.3	300	4
RD	Rodão-4	RD4-PC2	100	100	100	controle	4.5	1.7	0.2	100	2
RD	Rodão-4	RD4-PC3	100	100	100	P+Ca+G	4.5	1.7	0.4	200	2
RD	Rodão-4	RD4-PC4	100	100	100	P	4.5	1.7	0	0	0
RD	Rodão-3	RD3-PC1	225	60	225	P+Ca+G	6.5	1.7	3.2	667	5
RD	Rodão-3	RD3-PC2	225	60	225	controle	6.5	1.7	13.4	1000	13
RD	Rodão-3	RD3-PC3	225	60	225	P	6.5	1.7	22.4	3333	7
RD	Rodão-3	RD3-PC4	225	60	225	P+Ca	6.5	1.7	15.2	2000	8
RD	Rodão-2	RD2-PC1	225	60	225	P	8.5	1.7	20.7	3000	7
RD	Rodão-2	RD2-PC2	225	60	225	P+Ca+G	8.5	1.7	49.7	10500	5
RD	Rodão-2	RD2-PC3	225	60	225	P+Ca	8.5	1.7	73.1	8333	9
RD	Rodão-2	RD2-PC4	225	60	225	controle	8.5	1.7	78	7833	10

Tabela 4: Extensão.

Fazenda	Floresta (bloco)	Parcela	Área (m ²)	Censo 4 (jan/2004)							
				Área amostrada dos censos 1 ao 5 (m ²)	Área amostrada no censo 6 (m ²)	Tratamento	Idade (anos)	Tempo após fertilização (anos)	Estoque de biomassa acima do solo (t/ha)	Densidade de caules (caules/ha)	Massa média individual (kg)
DAS	DAS-1	DAS1-PC1	100	100		controle	4	3.2	2.6	467	6
DAS	DAS-1	DAS1-PC2	100	100		P	4	3.2	3.8	733	5
DAS	DAS-1	DAS1-PC3	100	100		P+Ca	4	3.2	2.4	633	4
DAS	DAS-1	DAS1-PC4	100	100		P+Ca+G	4	3.2	0.7	167	4
DAS	DAS-2	DAS2-PC1	225	60		P+Ca	8	3.2	46	4500	10
DAS	DAS-2	DAS2-PC2	225	60		P+Ca+G	8	3.2	43.4	3333	13
DAS	DAS-2	DAS2-PC3	225	60		controle	8	3.2	51.2	2667	19
DAS	DAS-2	DAS2-PC4	225	60		P	8	3.2	26.2	2833	9
DAS	DAS-3	DAS3-PC1	400	105	400	P	16	3.2	110	3238	34
DAS	DAS-3	DAS3-PC2	400	105	400	P+Ca+G	16	3.2	124.2	2190	57
DAS	DAS-3	DAS3-PC3	400	105	400	controle	16	3.2	152.2	4667	33
DAS	DAS-3	DAS3-PC4	400	105	400	P+Ca	16	3.2	151.6	3333	45
DIM	Dimona-1	DIM1-PC1	225	60		P+Ca	10	3.2	33.9	4167	8
DIM	Dimona-1	DIM1-PC2	225	60		P+Ca+G	10	3.2	49.2	4667	11
DIM	Dimona-1	DIM1-PC3	225	60		P	10	3.2	70.5	6833	10
DIM	Dimona-1	DIM1-PC4	225	60		controle	10	3.2	67.1	5833	11
DIM	Dimona-3	DIM3-PC1	225	60	225	P	10	3.2	45.8	4833	9
DIM	Dimona-3	DIM3-PC2	225	60	225	P+Ca+G	10	3.2	79.5	1667	48
DIM	Dimona-3	DIM3-PC3	225	60	225	P+Ca	10	3.2	72.1	3667	20
DIM	Dimona-3	DIM3-PC4	225	60	225	controle	10	3.2	25	3000	8
DIM	Dimona-2	DIM2-PC1	400	105	400	P+Ca	16	3.2	237.6	5238	45

Tabela 4: Extensão.

Fazenda	Floresta (bloco)	Parcela	Área (m ²)	Censo 4 (jan/2004)							
				Área amostrada dos censos 1 ao 5 (m ²)	Área amostrada no censo 6 (m ²)	Tratamento	Idade (anos)	Tempo após fertilização (anos)	Estoque de biomassa acima do solo (t/ha)	Densidade de caules (caules/ha)	Massa média individual (kg)
DIM	Dimona-2	DIM2-PC2	400	105	400	P	16	3.2	86.9	4667	19
DIM	Dimona-2	DIM2-PC3	400	105	400	controle	16	3.2	95.3	3238	29
DIM	Dimona-2	DIM2-PC4	400	105	400	P+Ca+G	16	3.2	132.8	3905	34
RD	Rodão-1	RD1-PC1	225	225		controle	4	3.2	8.8	1822	5
RD	Rodão-1	RD1-PC2	225	225		P+Ca	4	3.2	3.4	1111	3
RD	Rodão-1	RD1-PC3	225	225		P	4	3.2	5.3	1600	3
RD	Rodão-1	RD1-PC4	225	225		P+Ca+G	4	3.2	0.9	267	4
RD	Rodão-4	RD4-PC1	100	100	100	P+Ca	6	3.2	4.3	600	7
RD	Rodão-4	RD4-PC2	100	100	100	controle	6	3.2	3.9	500	8
RD	Rodão-4	RD4-PC3	100	100	100	P+Ca+G	6	3.2	4.2	900	5
RD	Rodão-4	RD4-PC4	100	100	100	P	6	3.2	2.6	600	4
RD	Rodão-3	RD3-PC1	225	60	225	P+Ca+G	8	3.2	6.6	1000	7
RD	Rodão-3	RD3-PC2	225	60	225	controle	8	3.2	19.6	2333	8
RD	Rodão-3	RD3-PC3	225	60	225	P	8	3.2	31.7	4000	8
RD	Rodão-3	RD3-PC4	225	60	225	P+Ca	8	3.2	24.6	2667	9
RD	Rodão-2	RD2-PC1	225	60	225	P	10	3.2	30.1	3167	10
RD	Rodão-2	RD2-PC2	225	60	225	P+Ca+G	10	3.2	55.6	11000	5
RD	Rodão-2	RD2-PC3	225	60	225	P+Ca	10	3.2	94.2	8000	12
RD	Rodão-2	RD2-PC4	225	60	225	controle	10	3.2	97.3	7667	13

Tabela 4: Extensão.

Fazenda	Floresta (bloco)	Parcela	Área (m ²)	Censo 5 (mar/2005)							
				Área amostrada dos censos 1 ao 5 (m ²)	Área amostrada no censo 6 (m ²)	Tratamento	Idade (anos)	Tempo após fertilização (anos)	Estoque de biomassa acima do solo (t/ha)	Densidade de caules (caules/ha)	Massa média individual (kg)
DAS	DAS-1	DAS1-PC1	100	100		controle	5.2	4.3	5.5	600	9
DAS	DAS-1	DAS1-PC2	100	100		P	5.2	4.3	8.4	833	10
DAS	DAS-1	DAS1-PC3	100	100		P+Ca	5.2	4.3	5.5	1000	5
DAS	DAS-1	DAS1-PC4	100	100		P+Ca+G	5.2	4.3	1.4	400	4
DAS	DAS-2	DAS2-PC1	225	60		P+Ca	9.2	4.3	40.3	5167	8
DAS	DAS-2	DAS2-PC2	225	60		P+Ca+G	9.2	4.3	51.4	3667	14
DAS	DAS-2	DAS2-PC3	225	60		controle	9.2	4.3	70.1	3333	21
DAS	DAS-2	DAS2-PC4	225	60		P	9.2	4.3	36.8	3500	11
DAS	DAS-3	DAS3-PC1	400	105	400	P	17.2	4.3	111.9	3238	35
DAS	DAS-3	DAS3-PC2	400	105	400	P+Ca+G	17.2	4.3	135.7	2286	59
DAS	DAS-3	DAS3-PC3	400	105	400	controle	17.2	4.3	162.6	4476	36
DAS	DAS-3	DAS3-PC4	400	105	400	P+Ca	17.2	4.3	165.9	3429	48
DIM	Dimona-1	DIM1-PC1	225	60		P+Ca	11.2	4.3	40.5	3500	12
DIM	Dimona-1	DIM1-PC2	225	60		P+Ca+G	11.2	4.3	53.4	4000	13
DIM	Dimona-1	DIM1-PC3	225	60		P	11.2	4.3	67.5	5500	12
DIM	Dimona-1	DIM1-PC4	225	60		controle	11.2	4.3	62.6	5333	12
DIM	Dimona-3	DIM3-PC1	225	60	225	P	11.2	4.3	43.4	4500	10
DIM	Dimona-3	DIM3-PC2	225	60	225	P+Ca+G	11.2	4.3	140.8	1833	77
DIM	Dimona-3	DIM3-PC3	225	60	225	P+Ca	11.2	4.3	80.9	3667	22
DIM	Dimona-3	DIM3-PC4	225	60	225	controle	11.2	4.3	29	2500	12
DIM	Dimona-2	DIM2-PC1	400	105	400	P+Ca	17.2	4.3	238	4952	48

Tabela 4: Extensão.

Fazenda	Floresta (bloco)	Parcela	Área (m ²)	Censo 5 (mar/2005)							
				Área amostrada dos censos 1 ao 5 (m ²)	Área amostrada no censo 6 (m ²)	Tratamento	Idade (anos)	Tempo após fertilização (anos)	Estoque de biomassa acima do solo (t/ha)	Densidade de caules (caules/ha)	Massa média individual (kg)
DIM	Dimona-2	DIM2-PC2	400	105	400	P	17.2	4.3	93.6	4762	20
DIM	Dimona-2	DIM2-PC3	400	105	400	controle	17.2	4.3	99.7	3238	31
DIM	Dimona-2	DIM2-PC4	400	105	400	P+Ca+G	17.2	4.3	144.7	4190	35
RD	Rodão-1	RD1-PC1	225	225		controle	5.2	4.3	14.2	2178	7
RD	Rodão-1	RD1-PC2	225	225		P+Ca	5.2	4.3	5.4	1289	4
RD	Rodão-1	RD1-PC3	225	225		P	5.2	4.3	8.6	2089	4
RD	Rodão-1	RD1-PC4	225	225		P+Ca+G	5.2	4.3	2.8	622	4
RD	Rodão-4	RD4-PC1	100	100	100	P+Ca	7.2	4.3	6.5	500	13
RD	Rodão-4	RD4-PC2	100	100	100	controle	7.2	4.3	7.9	600	13
RD	Rodão-4	RD4-PC3	100	100	100	P+Ca+G	7.2	4.3	6.4	1000	6
RD	Rodão-4	RD4-PC4	100	100	100	P	7.2	4.3	6.2	800	8
RD	Rodão-3	RD3-PC1	225	60	225	P+Ca+G	9.2	4.3	8.5	1000	9
RD	Rodão-3	RD3-PC2	225	60	225	controle	9.2	4.3	24.6	2500	10
RD	Rodão-3	RD3-PC3	225	60	225	P	9.2	4.3	40	4500	9
RD	Rodão-3	RD3-PC4	225	60	225	P+Ca	9.2	4.3	44.7	2167	21
RD	Rodão-2	RD2-PC1	225	60	225	P	11.2	4.3	37.1	3167	12
RD	Rodão-2	RD2-PC2	225	60	225	P+Ca+G	11.2	4.3	56.6	10000	6
RD	Rodão-2	RD2-PC3	225	60	225	P+Ca	11.2	4.3	108.2	8000	14
RD	Rodão-2	RD2-PC4	225	60	225	controle	11.2	4.3	111.3	8000	14

Tabela 4: Extensão.

Fazenda	Floresta (bloco)	Parcela	Área (m ²)	Área amostrada dos censos 1 ao 5 (m ²)	Área amostrada no censo 6 (m ²)	Tratamento	Censo 6 (set/2018)				
							Idade (anos)	Tempo após fertilização (anos)	Estoque de biomassa acima do solo (t/ha)	Densidade de caules (caules/ha)	Massa média individual (kg)
DAS	DAS-1	DAS1-PC1	100	100		controle					
DAS	DAS-1	DAS1-PC2	100	100		P					
DAS	DAS-1	DAS1-PC3	100	100		P+Ca					
DAS	DAS-1	DAS1-PC4	100	100		P+Ca+G					
DAS	DAS-2	DAS2-PC1	225	60		P+Ca					
DAS	DAS-2	DAS2-PC2	225	60		P+Ca+G					
DAS	DAS-2	DAS2-PC3	225	60		controle					
DAS	DAS-2	DAS2-PC4	225	60		P					
DAS	DAS-3	DAS3-PC1	400	105	400	P	31	17.8	117.2	2450	48
DAS	DAS-3	DAS3-PC2	400	105	400	P+Ca+G	31	17.8	102.3	2450	42
DAS	DAS-3	DAS3-PC3	400	105	400	controle	31	17.8	142.5	2650	54
DAS	DAS-3	DAS3-PC4	400	105	400	P+Ca	31	17.8	94.6	2425	39
DIM	Dimona-1	DIM1-PC1	225	60		P+Ca					
DIM	Dimona-1	DIM1-PC2	225	60		P+Ca+G					
DIM	Dimona-1	DIM1-PC3	225	60		P					
DIM	Dimona-1	DIM1-PC4	225	60		controle					
DIM	Dimona-3	DIM3-PC1	225	60	225	P	24.7	17.8	50.8	2400	21
DIM	Dimona-3	DIM3-PC2	225	60	225	P+Ca+G	24.7	17.8	31.4	1467	21
DIM	Dimona-3	DIM3-PC3	225	60	225	P+Ca	24.7	17.8	40.8	1822	22
DIM	Dimona-3	DIM3-PC4	225	60	225	controle	24.7	17.8	49.8	2933	17
DIM	Dimona-2	DIM2-PC1	400	105	400	P+Ca	30.7	17.8	114.4	2900	39

Tabela 4: Extensão.

Fazenda	Floresta (bloco)	Parcela	Área (m ²)	Área amostrada dos censos 1 ao 5 (m ²)	Área amostrada no censo 6 (m ²)	Tratamento	Censo 6 (set/2018)				
							Idade (anos)	Tempo após fertilização (anos)	Estoque de biomassa acima do solo (t/ha)	Densidade de caules (caules/ha)	Massa média individual (kg)
DIM	Dimona-2	DIM2-PC2	400	105	400	P	30.7	17.8	116.7	3850	30
DIM	Dimona-2	DIM2-PC3	400	105	400	controle	30.7	17.8	116	3050	38
DIM	Dimona-2	DIM2-PC4	400	105	400	P+Ca+G	30.7	17.8	109.3	3000	36
RD	Rodão-1	RD1-PC1	225	225		controle					
RD	Rodão-1	RD1-PC2	225	225		P+Ca					
RD	Rodão-1	RD1-PC3	225	225		P					
RD	Rodão-1	RD1-PC4	225	225		P+Ca+G					
RD	Rodão-4	RD4-PC1	100	100	100	P+Ca	20.7	17.8	48.7	2000	24
RD	Rodão-4	RD4-PC2	100	100	100	controle	20.7	17.8	69	1900	36
RD	Rodão-4	RD4-PC3	100	100	100	P+Ca+G	20.7	17.8	25.2	2100	12
RD	Rodão-4	RD4-PC4	100	100	100	P	20.7	17.8	24.6	1000	25
RD	Rodão-3	RD3-PC1	225	60	225	P+Ca+G	22.7	17.8	11.9	889	13
RD	Rodão-3	RD3-PC2	225	60	225	controle	22.7	17.8	44.2	2133	21
RD	Rodão-3	RD3-PC3	225	60	225	P	22.7	17.8	54.5	1956	28
RD	Rodão-3	RD3-PC4	225	60	225	P+Ca	22.7	17.8	31	1333	23
RD	Rodão-2	RD2-PC1	225	60	225	P	24.7	17.8	90.3	3556	25
RD	Rodão-2	RD2-PC2	225	60	225	P+Ca+G	24.7	17.8	68.6	3244	21
RD	Rodão-2	RD2-PC3	225	60	225	P+Ca	24.7	17.8	100.8	3911	26
RD	Rodão-2	RD2-PC4	225	60	225	controle	24.7	17.8	108.4	3733	29

CONCLUSÃO

Nossos resultados mostram que a fertilização por fósforo em florestas secundárias com histórico de pastagem na Amazônia central tem efeitos nas mudanças estruturais ao longo da sucessão dependendo da idade das florestas no momento da fertilização e da correção superficial e subsuperficial do solo. A fertilização não afetou a densidade de caules, que diminuiu ao longo da trajetória sucessional, mas reduziu os estoques de biomassa acima do solo e a massa média dos indivíduos. Portanto, investigar o efeito da fertilização na dinâmica das florestas secundárias, na composição de espécies e na dinâmica de raízes, bem como as mudanças nas propriedades químicas e físicas do solo destas florestas, permitirá melhor compreensão de como florestas secundárias com histórico de pastagem respondem ao alívio da limitação nutricional do solo ao longo da trajetória sucessional. Estudos com o objetivo de compreender as mudanças nos processos ecossistêmicos ao longo da recuperação natural ou assistida de florestas secundárias com histórico de pastagem, geram resultados importantes e que podem dar suporte às políticas locais e globais de mitigação de mudanças climáticas e ao gerenciamento do sequestro de carbono atmosférico. Ao optar pela manutenção de florestas secundárias com histórico de pastagens, direcionando a sucessão, ou estabelecendo plantações ou sistemas agroflorestais, os gestores da terra podem influenciar a distribuição do armazenamento de carbono na biomassa acima do solo e abaixo do solo, além da taxa na qual o carbono se acumula dentro desses reservatórios.