

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS
CENTRO DE CIÊNCIAS BIOLÓGICAS E DA SAÚDE
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIAS AMBIENTAIS

CAMILA MORAIS RAMOS SILVA

**EFEITOS DAS CONDIÇÕES INICIAIS DO SOLO NA ESTRUTURA
DA FLORESTA E NO ESTOQUE DE CARBONO NUMA ÁREA EM
RESTAURAÇÃO**

SÃO CARLOS -SP

2025

CAMILA MORAIS RAMOS SILVA

EFEITOS DAS CONDIÇÕES INICIAIS DO SOLO NA ESTRUTURA DA
FLORESTA E NO ESTOQUE DE CARBONO NUMA ÁREA EM
RESTAURAÇÃO

Dissertação apresentada ao Programa de Pós- graduação em Ciências Ambientais da Universidade Federal de São Carlos, como parte dos requisitos para a obtenção do título de Mestre em Ciências Ambientais¹.

Orientadora: Profa. Dra. Andréa Lúcia Teixeira de Souza

São Carlos-SP
2025

¹ Apoio: Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001

Silva, Camila Morais Ramos

Efeitos das condições iniciais do solo na estrutura da floresta e no estoque de carbono numa área em restauração / Camila Morais Ramos Silva -- 2025. 38f.

Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de São Carlos, campus São Carlos, São Carlos
Orientador (a): Andréa Lúcia Teixeira de, Souza
Banca Examinadora: Lúciola Santos Lannes, Alessandra dos Santos Penha
Bibliografia

1. Floresta ripária. 2. Descarga de resíduos. 3. Restauração ecológica. I. Silva, Camila Morais Ramos. II. Título.

Ficha catalográfica desenvolvida pela Secretaria Geral de Informática (SIn)

DADOS FORNECIDOS PELO AUTOR

Bibliotecário responsável: Arildo Martins - CRB/8 7180



UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS

Centro de Ciências Biológicas e da Saúde
Programa de Pós-Graduação em Ciências Ambientais

Folha de Aprovação

Defesa de Dissertação de Mestrado da candidata Camila Morais Ramos Silva, realizada em 16/04/2025.

Comissão Julgadora:

Profa. Dra. Andrea Lucia Teixeira de Souza (UFSCar)

Profa. Dra. Alessandra dos Santos Penha (UFSCar)

Profa. Dra. Lucíola Santos Lannes (UNESP)

O Relatório de Defesa assinado pelos membros da Comissão Julgadora encontra-se arquivado junto ao Programa de Pós-Graduação em Ciências Ambientais.

Dedico este trabalho aos meus pais, Wagner e Aline, que tanto me apoiaram na realização dos meus sonhos.

AGRADECIMENTOS

Agradeço, em primeiro lugar, à minha orientadora, Andréa, por me acompanhar durante toda esta jornada. Agradeço imensamente pela compreensão, generosidade e pelo compromisso com a minha formação, que foram essenciais para a conclusão deste trabalho. Sou muito grata por acreditar em mim, mesmo em minhas ausências.

Agradeço imensamente ao Marcus por compartilhar seus conhecimentos e experiências, e por ter sido, na prática, um coorientador, mesmo que por questões burocráticas isso não tenha se formalizado, sua contribuição foi fundamental nessa caminhada. Também aproveito para expressar minha gratidão ao Pedro e ao Jhonas, que foram tão gentis em colaborar com as coletas em campo.

À minha amiga Jacqueline, pelas conversas e desabafos da vida acadêmica, e por ter sido minha companheira em São Carlos.

Agradeço ao meu amor, Victor Hugo, que esteve ao meu lado nos momentos mais desafiadores deste processo, e segurou as pontas dos meus exageros e faltas com o exercício de um amor que jamais imaginei ser possível.

Ao meu pai Wagner, pelas palavras de conforto e coragem, e por me ensinar desde cedo o valor das coisas.

À minha mãe Aline, que mesmo na distância se manteve presente, obrigada por acreditar em mim e ser exemplo de coragem.

Ao meu irmão caçula Tiago, que é a pessoa mais amorosa da qual já ouvi falar, ao meu irmão João Felipe que tem um coração gigante.

Agradeço ao PPGCam, aos professores do DCAm, e ao Vinicius pelo auxílio com as burocracias acadêmicas.

Ao prof. ° Dr. Rodolfo, a prof.^a Dra. Alessandra, e a prof. ° Dra. Letícia, por aceitarem ser banca da minha qualificação e pelas sugestões oferecidas.

A prof.^a Dra. Lucíola por aceitar ser banca da minha defesa, e por ter feito parte da minha formação como bióloga. Agradeço também a prof.^a Alessandra pelo aceite em compor a banca de defesa e pelas contribuições tão pertinentes ao meu trabalho.

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) – Código de Financiamento 001.

RESUMO

Silva, C.M.R. –Efeitos das condições iniciais do solo na estrutura da floresta e no estoque de carbono numa área em restauração. 2025 – 38p: Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de São Carlos, Centro de Ciências Biológicas e da Saúde, Programa de Pós-Graduação em Ciências Ambientais, São Carlos – 2025.

O desmatamento das florestas na região tropical leva a alterações substanciais da quantidade de matéria orgânica do solo, influenciando a comunidade microbiana do solo, a ciclagem de nutrientes e a degradação de sua estrutura. Algumas atividades humanas podem causar a entrada excessiva de matéria orgânica no solo, como os estábulos de ordenha de gado leiteiro, podendo aumentar a disponibilidade de nutrientes no solo através do escoamento de resíduos. No entanto, não há informações sobre o efeito da entrada de matéria orgânica no solo na estrutura de uma floresta restaurada, especialmente após uma década a partir da implementação das ações de restauração. Em uma área de floresta ripária desmatada, na região sudeste do estado de São Paulo, foi conduzida uma restauração florestal em 2013, a qual recebia em parte da área um escoamento de resíduos provenientes de um estábulo de ordenha. A entrada de matéria orgânica no solo e posicionamento do estábulo localizado numa das extremidades da área do restauro resultou na formação de um gradiente de fertilidade do solo ao longo da área restaurada. Assim, este estudo avaliou se as condições iniciais do solo, observadas no momento da implantação das ações de restauração da floresta influenciaram a sua estrutura, aproximadamente 11 anos após a restauração. Especificamente, avaliamos o efeito das condições iniciais do solo na área basal total de árvores, densidade de indivíduos arbóreos, quantidade de indivíduos regenerantes, estratificação e serapilheira, e no estoque de carbono acumulado na biomassa área da floresta restaurada. No início da restauração, amostras de solo na profundidade de 0 – 20cm foram coletadas em 10 parcelas ao longo de toda a área, e aproximadamente 11 anos ao plantio das mudas medimos a altura e o diâmetro de todas as árvores no interior dessas parcelas, as quais foram usadas para estimar os parâmetros da estrutura da floresta restaurada e coletamos a serapilheira acumulada em cinco subamostras dentro de cada parcela. A estrutura da floresta diferiu espacialmente na área restaurada em função das condições iniciais do solo. As áreas mais próximas do estábulo formaram florestas mais densas e com maior número de indivíduos regenerantes, maior área basal e estratificação, além de maiores quantidade de serapilheira. Os locais mais distantes do estábulo apresentaram menor densidade de indivíduos e poucos indivíduos regenerantes formando uma floresta menos estratificada e com uma menor quantidade de serapilheira. As condições iniciais do solo influenciaram positivamente o estoque de carbono nas partes aéreas de indivíduos arbóreos na

floresta restaurada. Nossos resultados mostraram que a quantidade de matéria orgânica na ocasião do plantio inicial das mudas influenciou positivamente a velocidade da recuperação da estrutura da floresta e na fixação de carbono 11 anos depois. Esses resultados sugerem que a melhoria do solo através da adição de esterco bovino em áreas degradadas, com solos pobres em matéria orgânica, poderia aumentar a eficiência dos projetos de restauração de florestas tropicais.

Palavras-chave: floresta ripária; descarga de resíduos; fertilidade do solo; serapilheira; biomassa acima do solo.

ABSTRACT

Silva, C.M.R. – Effects of initial soil conditions on forest structure and carbon stock in restored forest. 2025 – 38p: Dissertation (Master) – Universidade Federal de São Carlos, Centro de Ciências Biológicas e da Saúde, Graduate Program in Environmental Sciences, São Carlos – 2025.

Deforestation in tropical regions leads to substantial changes in soil organic matter content, affecting the soil microbial community, nutrient cycling, and the degradation of soil structure. Certain human activities, such as dairy cattle milking facilities, can cause an excessive input of organic matter into the soil, which may increase soil nutrient availability through waste runoff. However, there is a lack of information regarding the effect of organic matter input on the structure of a restored forest, particularly after a decade following the implementation of restoration actions. In a deforested riparian forest area in the southeastern region of the São Paulo state, a forest restoration project was initiated in 2013. Part of this area received waste runoff from a nearby milking facility. The organic matter input into the soil, combined with the positioning of the milking facility at one end of the restoration site, resulted in forming a soil fertility gradient across the restored area. This study assessed whether the initial soil conditions observed during restoration implementation influenced forest structure approximately 11 years after restoration. Specifically, we evaluated the effect of initial soil conditions on total tree basal area, tree density, the number of regenerating individuals, stratification and litterfall accumulation, and the carbon stock stored in the aboveground biomass of the restored forest. At the beginning of the restoration process, soil samples were collected at a depth of 0–20 cm from 10 plots distributed across the entire area. Approximately 11 years after seedling planting, we measured the height and diameter of all trees within these plots, which were used to estimate forest structure parameters. Additionally, we collected accumulated litterfall from five subsamples within each plot. Forest structure exhibited spatial variation within the restored area as a function of initial soil conditions. Areas closer to the milking facility developed denser forests with more regenerating individuals, higher basal area and stratification, and greater litterfall accumulation. Conversely, locations farther from the milking facility displayed lower tree density and fewer regenerating individuals, resulting in a less stratified forest with lower litterfall accumulation. Initial soil conditions positively influenced the carbon stock in the aboveground biomass of trees in the restored forest. Our results demonstrate that the amount of organic matter present during initial seedling planting positively influenced the speed of forest structure recovery and carbon sequestration 11 years later. These findings suggest that soil improvement by adding cattle manure in degraded areas with low organic matter content could enhance the efficiency of tropical forest restoration projects.

Keywords: riparian forest; waste discharge; soil fertility; litter; aboveground biomass.

LISTA DE FIGURAS

- Figura 1.** Desenho esquemático mostrando a distribuição dos sítios amostrados na área restaurada e na mata remanescente. A seta em branco mostra a posição do estábulo de ordenha. (Fonte: *Google Earth*). 17
- Figura 2.** (A) Coleta da serapilheira acumulada sobre o solo. (B) Registro fotográfico do interior da área de restauro. 19
- Figura 3.** Resultados das análises dos componentes principais dos atributos químicos do solo das parcelas localizadas na área restaurada (R) e mata remanescente (M). Os círculos verdes representam as parcelas da área restaurada, os triângulos vermelhos representam as parcelas da mata e, os valores ao lado são as identificações das parcelas. Em que: P = fósforo, N = nitrogênio total, CTC = capacidade de troca catiônica, MO = matéria orgânica, SB= Soma de bases, pH= potencial hidrogeniônico e NP = razão nitrogênio e fósforo. 22
- Figura 4.** Resultados das regressões múltiplas entre a biomassa das partes aéreas dos indivíduos arbóreos e os parâmetros da estrutura da florestal em função dos dois primeiros eixos da ACP dos atributos químicos do solo. Os valores representam respectivamente os coeficientes de regressão parcial, os erros-padrão (entre parênteses) e em negrito, as estimativas padronizadas. A espessura das linhas é proporcional às estimativas padronizadas23
- Figura 5.** Relação entre o estoque de carbono de partes aéreas de indivíduos arbóreos nas parcelas da área restaurada em função do primeiro eixo da ACP das condições iniciais do solo.24
- Figura 6.** Desenho esquemático da estrutura da floresta restaurada em função dos dois primeiros eixos da Análise de Componentes Principais (ACP) dos atributos químicos do solo no início das ações de restauração. Em que: P = fósforo, N = nitrogênio total, CTC = capacidade de troca catiônica, MO = matéria orgânica, SB= Soma de bases, pH= potencial hidrogeniônico e NP = razão nitrogênio e fósforo. 28

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	12
2. OBJETIVOS	15
3. MATERIAL E MÉTODOS	15
3.1. Área de estudo	15
3.2. Delineamento amostral	16
3.3. Amostragem do solo	17
3.4. Estrutura da vegetação e serapilheira	18
3.5. Estoque de carbono na biomassa acima do solo	19
3.6. Análise dos dados	19
4. RESULTADOS	20
4.1. Atributos químicos do solo nos anos iniciais do restauro	20
4.2. Influência dos atributos químicos do solo na estrutura da floresta	22
4.3. Influência das condições iniciais do solo no estoque de carbono	24
5. DISCUSSÃO	24
6. CONSIDERAÇÕES FINAIS	29
REFERÊNCIAS	30
APÊNDICE	37
Apêndice A – Lista de espécies encontradas na área em restauro e mata remanescente, classificadas em ordem alfabética das famílias botânicas, com suas respectivas ocorrências e densidades de madeira	37

1. INTRODUÇÃO

As florestas ripárias representam parte importante na microbacia. As interações entre ecossistemas aquáticos e terrestres em áreas ribeirinhas criam um ecossistema com alta diversidade, tornando esses ambientes críticos para a conservação da biodiversidade (Olson et al., 2007). Além disto, as florestas ripárias detêm grande quantidade de carbono acima e abaixo do solo, e promove estabilidade do solo das margens dos cursos d'água (Bieluczyk et al., 2023). A resistência e resiliência dos ecossistemas florestais dependem fortemente de solos com grandes quantidades de matéria orgânica, que detêm recursos essenciais para as plantas resultando em florestas mais complexas (Peña-claros et al., 2012; Nolan et al., 2021).

Esses ecossistemas têm sido frequentemente destruídos ou degradados, devido à expansão agrícola e conversão de florestas em terras cultiváveis, contribuindo para a diminuição da resiliência e das funções ecossistêmicas (Celentano et al., 2017; Wu et al., 2023; Maragkaki et al., 2024). A degradação das florestas ripárias tem resultado em taxas elevadas de erosão do solo e conseqüentemente, no aumento do assoreamento dos cursos d'água, causando perda de produção e qualidade da água e a diminuição da biodiversidade terrestre e aquática (Tockner e Stanford, 2002; Bieluczyk et al., 2023).

O desmatamento leva a perdas significativas de matéria orgânica do solo (MOS), o que representa um dos principais fatores de degradação edáfica (Fujisaki et al., 2015; Minasny et al., 2017; Veldkamp et al., 2020). Esse processo leva a um declínio na qualidade e função do solo, impactando as funções desses ecossistemas, além de contribuir para as emissões de CO₂. A perda da matéria orgânica no solo altera a ciclagem de nutrientes e outras funções do solo associadas como redução da capacidade de retenção de água e diminuição de agregados e microagregados do solo, afetando sua estrutura, aeração e compactação, levando assim ao aumento da erosão (Widyati et al., 2022; Amoakwah et al., 2022). Além disto, a supressão da vegetação afeta a comunidade microbiana edáfica, reduzindo sua biomassa e alterando as atividades enzimáticas, que são cruciais para a ciclagem de nutrientes e a qualidade do solo (Raiesi e Beheshti, 2015).

A magnitude da quantidade de matéria orgânica perdida com o desmatamento de florestas é influenciada pelo tipo de solo, com o tempo decorrido e com as práticas de manejo de terras pós-desmatamento (Lemenih et al., 2005; Houghton et al., 2012; Qin et al., 2020, Alvarez-Castellanos et al., 2024). Alguns estudos mostraram que as florestas tropicais sofrem rápido esgotamento de matéria orgânica (Veldkamp, 1994; Guo e Gifford, 2002; Drake et al., 2019; Requena Suarez et al., 2020). Villarino et al. (2017) mostraram que com o desmatamento de florestas secas na região semiárida do Chaco, na Argentina, a matéria orgânica do solo diminuiu cerca de 30% dentro de uma década de desmatamento e uso agrícola subsequente. Além disto, o tipo de uso da terra pós-desmatamento também influencia as mudanças na quantidade de matéria orgânica no solo ao longo

do tempo: sistemas agroflorestais ou de pastagem rotacional podem mitigar perdas de carbono do solo em comparação com a monocultura (Stefano e Jacobson, 2017; Bossio et al., 2020). Algumas atividades antrópicas podem causar até mesmo a entrada de matéria orgânica no solo, como no caso de sistemas pecuários com a presença de estábulos de ordenha de gado leiteiro.

Tais espaços são locais específicos que os produtores constroem para a ordenha das vacas leiteiras, que também são frequentemente usados também para repouso noturno desses animais. São locais que acumulam os dejetos das vacas e, por isso, são lavados com frequência. O escoamento dessas águas residuárias, juntamente com as águas de chuva, transporta esses dejetos para terras mais baixas e podem impactar significativamente as características dos solos de locais próximos. Como a perda da MOS resulta na diminuição de nutrientes disponíveis e degradação da sua estrutura física, o aporte de matéria orgânica, supostamente, causaria a melhoria na estrutura e aumento da disponibilidade de nutrientes para as plantas. Essa situação foi particularmente observada em ambientes mediterrâneos, onde a entrada de esterco por 11 anos contribuiu para aumentar as frações de carbono orgânico do solo, protegendo o solo da degradação física (Yagüe et al., 2016).

As ações de restauração ecológica de florestas muitas vezes envolvem o plantio de mudas de espécies arbóreas, que pode apresentar altas taxas de mortalidade das plantas jovens (Dyderski e Jagodziński, 2019), especialmente quando plantadas em áreas degradadas, uma vez que as condições acima e abaixo de solo podem ser muito adversas para espécies tipicamente de florestas conservadas (Andrade et al., 2014). Desta maneira, a disponibilidade de nutrientes no solo podem ser determinantes para a sobrevivência e crescimento destas plantas (Van Breugel et al., 2011; Norden et al., 2015; Scholten et al., 2017). Como o aporte de matéria orgânica pode aumentar a disponibilidade de nutrientes no solo, seria esperado que a sobrevivência e a velocidade de crescimento de espécies arbóreas, nessas áreas poderiam ser maiores quando comparados a áreas degradadas comuns. No entanto, as informações sobre os possíveis efeitos do aporte elevado de matéria orgânica no solo na dinâmica sucessional de florestas ainda são escassas.

Para avaliar a eficácia das estratégias da restauração ecológica, principalmente em florestas tropicais, são comumente utilizadas as análises da estrutura da vegetação, medindo atributos como a área basal, altura das árvores, estratificação florestal e biomassa, possibilitando identificar se os esforços de restauração estão resultando em florestas mais complexas e, portanto, em recuperação das funções desses ecossistemas (Ruiz-Jaen e Aide, 2005; Suganuma e Durigan, 2014; Fernandes et al., 2014; Ma et al., 2024). À medida que as florestas tropicais se desenvolve, a estrutura e a funcionalidade do ecossistema atingem níveis mais complexos (Calvo – Rodriguez, 2017; Ali, 2018), os quais são correlacionados com a maior diversidade de espécies (Clark, 2010, Ali, 2018; Matsuo et al., 2021). A área basal e a densidade de indivíduos parecem ser bons indicadores pois refletem a sobrevivência e crescimento das plantas reintroduzidas nas ações de restauração

(Suganuma e Durigan, 2015) Um outro forte indicador para avaliar a resiliência de uma floresta em restauração é o recrutamento natural de espécies arbóreas ao longo do tempo, pois reflete as condições ambientais favoráveis ao aumento das populações das espécies plantadas e na entrada de novas espécies no ecossistema (Kulikowski et al., 2022). O recrutamento de indivíduos, comumente denominados de regenerantes, resulta numa maior variedade de estratos florestais, os quais são diretamente correlacionados com as taxas de decomposição (Fernandes et al., 2021).

A variedade de estratos em florestas em restauração é composta pela variação da altura das árvores plantadas e pela altura dos indivíduos recrutados ao longo do seu desenvolvimento e reflete como cada espécie desempenha seu nicho específico; sendo assim, a estratificação da comunidade é tida como um bom indicador do estágio sucessional de uma floresta (Zhang e Chen, 2015). Além disso, a estratificação reflete a complexidade estrutural da floresta e o potencial de armazenamento de carbono acima do solo (Yuan et al., 2018). Assim, alguns autores apontam que a estratificação também é um dos indicadores que devem ser monitorados ao longo do tempo durante o processo de restauração, especialmente em relação ao processo de sucessão secundária em florestas tropicais (Chazdon, 2012; Oliveira, 2021). Contudo, para entender o potencial de sumidouros de carbono florestais é necessário estimar a biomassa acima do solo, uma vez que a biomassa da floresta é uma porção substancial da quantidade de carbono armazenada nesses ecossistemas (Yuan et al., 2018; Ma et al., 2024). A serapilheira é a principal via de entrada de MOS e é normalmente correlacionada com o tamanho e densidade das árvores (Silver et al., 2014; Nakasato et al., 2024) e reflete diretamente a dinâmica de ciclagem de nutrientes e o retorno de processos ecossistêmicos essenciais em áreas de recuperação (Powers e Marín-Spiotta, 2017). Sua produção é composta por resíduos vegetais depositados no solo, desempenhando um papel crucial na ciclagem de nutrientes, transferindo matéria orgânica e nutrientes da vegetação para o solo (Erfani et al., 2017; Giweta, 2020). Tais aspectos demonstram a relevância da serapilheira como um indicador da efetividade da restauração florestal, haja vista que influencia positivamente a ciclagem de nutrientes favorecendo a recuperação das funções ecológicas (Ostertag et al., 2008).

No município de São Carlos, às margens do córrego Engenho Velho, uma área composta por uma floresta ciliar foi restaurada através da reintrodução de espécies arbóreas via plantio de mudas combinado com semeadura direta. Em uma das extremidades da faixa em restauração, localizava-se um estábulo de ordenha de gado leiteiro, a uma distância de aproximadamente 30m acima desta área, em terras mais altas, que despejou, por vários anos, uma grande quantidade de matéria orgânica nas áreas imediatamente abaixo do estábulo, enquanto que, na outra extremidade da faixa restaurada não houve aporte de matéria orgânica.

2. OBJETIVOS

Assim, este estudo avaliou como os atributos químicos do solo na ocasião da implementação do restauro variavam espacialmente, devido à constante deposição de dejetos provenientes do estábulo de ordenha. Inicialmente questionamos (1) se as variações nos atributos químicos do solo, observadas no momento da implementação do projeto de restauração influenciaram a estrutura da floresta formada aproximadamente 11 anos após o plantio; (2) investigamos se as condições iniciais do solo exerceram influência sobre as seguintes variáveis: a área basal total das árvores; a densidade de indivíduos arbóreos; a quantidade de indivíduos regenerantes; a estratificação vertical da floresta e a quantidade de serapilheira acumulada no solo da floresta; (3) se as condições químicas iniciais do solo afetaram os estoques de carbono acumulados na biomassa aérea da floresta em restauração.

3. MATERIAL E MÉTODOS

3.1. Área de estudo

A área de estudo está localizada às margens do Córrego Engenho Velho, classificada como Área de Proteção Permanente (APP), nas coordenadas 21°54'43,569" S e 47°51'37,942" W, em propriedade rural Estância Dois Irmãos, situada no município de São Carlos- SP, Brasil (Figura 3).

O clima no município de São Carlos é classificado como Aw no sistema Köppen (Rolim et al., 2007), apresenta predominância subtropical, com verões úmidos de outubro a março, e os invernos secos, entre abril e setembro. A temperatura média no mês mais quente ultrapassa 22°C, a do mês mais frio é menor que 18°C e a pluviosidade média anual é 1468,0 mm (Soares et al., 2003). Geologicamente a área é caracterizada pela presença de Serra Geral, composta por rochas vulcânicas e arenitos da formação Botucatu-Pirambóia (Sousa Junior et al., 2011). O solo é distrófico, com áreas compostas por Latossolos Vermelhos, Latossolos Vermelho-Amarelos e Nitossolos (Calderano Filho et al., 1998), a textura de argila apresenta variação entre 5% e 7%, que foram determinadas a partir de coletas de solo realizadas no ano de 2014. A vegetação original da área de estudo está inserida dentro dos limites da Floresta Estacional Semidecídua (FES) (VELOSO et al., 1991).

A área total do estudo tinha 2308 m², compreendendo duas categorias de uso do solo: uma faixa de floresta nativa que variava entre 10 e 20 metros de largura e de aproximadamente 200 m de comprimento longitudinal e uma faixa adjacente de pasto, constituída totalmente por gramíneas exóticas, que sofreu ações de restauração em fevereiro de 2013 (Figura 1).

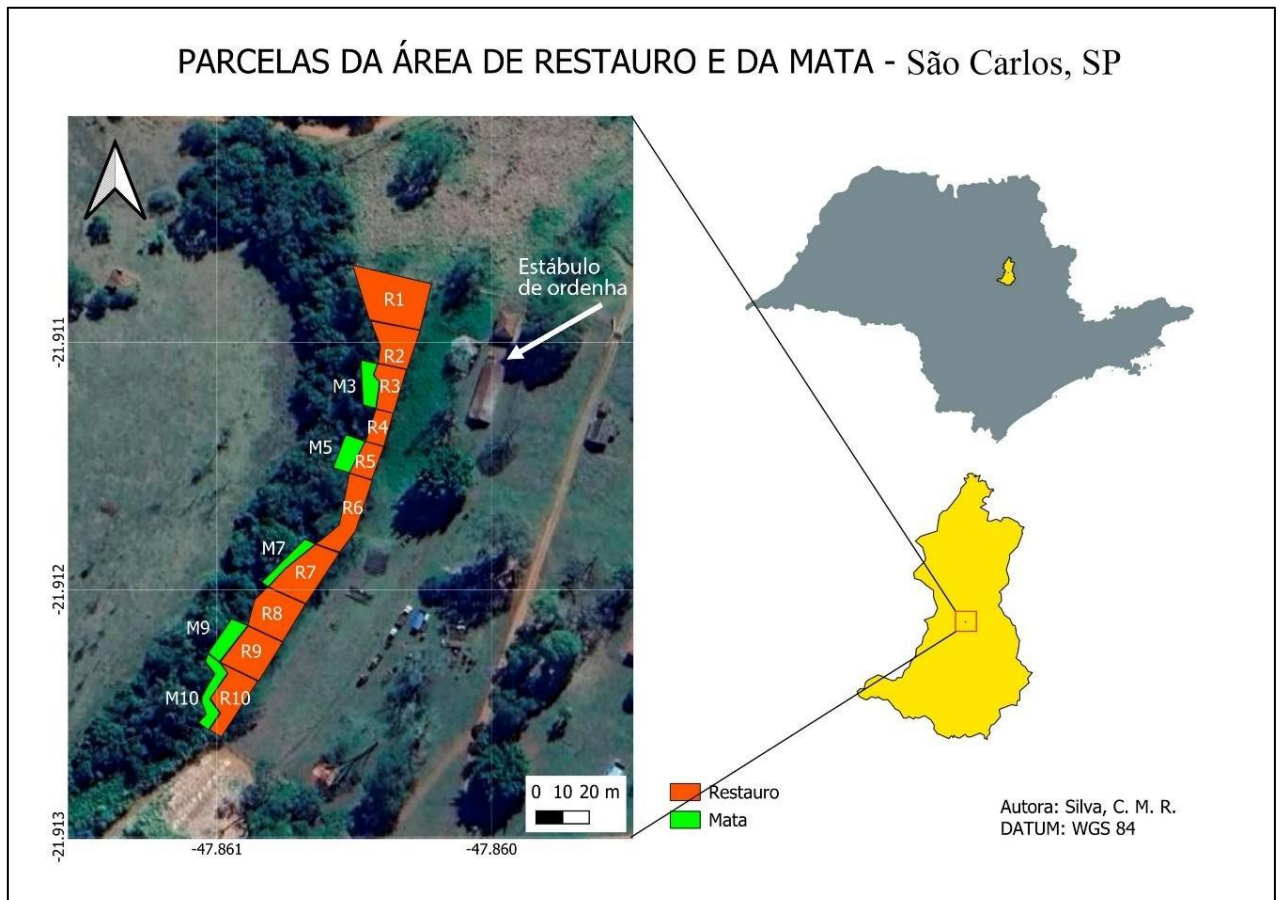
Em fevereiro de 2013, foi iniciado um experimento de plantio voltado para a restauração do trecho da floresta ripária degradada (Figura 1). O propósito primordial desse estudo consistia em avaliar o efeito do tamanho das sementes na sobrevivência e crescimento no primeiro ano do desenvolvimento das plantas (Macera et al., 2017). Para esse experimento foram selecionadas dez espécies arbóreas nativas, comumente encontradas em florestas ripárias na região de São Carlos,

conforme indicado por Barbosa e Martins (2003). As espécies escolhidas para compor o experimento de restauração foram: *Cedrela fissilis* Vell., *Pterogyne nitens* Tul., *Cariniana estrellensis* (Mart.) Kuntze, *Enterolobium contortisiliquum* (Vell.) Morong, *Copaifera langsdorffii* Desf., *Hymenaea courbaril* L., *Schizolobium parahyba* (Vell.) Blake, *Enterolobium timbouva* Mart., *Platypodium elegans* Vogel. e *Centrolobium tomentosum* Guillem. ex Benth.

3.2. Delineamento amostral

A área restaurada foi dividida em 10 parcelas, cada uma com cerca de 20 metros de comprimento, dispostas de forma paralela ao curso d'água e adjacente ao remanescente da floresta ripária (Figura 1). A largura das parcelas variava entre 4 e 28 metros, refletindo os contornos do trecho de remanescente da floresta ripária (Figura 1). Ao longo de vários anos, sendo seis anos dentro do intervalo de monitoramento do restauro, uma das extremidades da área experimental recebia aporte contínuo de dejetos bovinos, provenientes de um estábulo de ordenha localizado em uma elevação adjacente (Figura 1). Devido ao declive natural do terreno, os dejetos escoavam até a área de remanescente da floresta ripária passando pela área de restauro. Como este estábulo ficava em uma das extremidades da área, o relevo permitia um espraiamento das águas de chuva. As parcelas R1, R2, R3 e R4 eram as parcelas mais próximas ao estábulo de ordenha, as parcelas R5 e R6 estavam localizadas à uma distância intermediária e as parcelas R7, R8, R9 e R10 estavam localizadas mais distantes do estábulo (Figura 1). Adicionalmente, foram estabelecidas cinco parcelas dentro dos remanescentes florestais adjacentes, denominados como Mata remanescente (Mata), as quais foram consideradas como áreas de referência (Figura 1). Dentro da mata remanescente, a parcela M3 se localizava mais próxima ao estábulo, a parcela M5 estava numa posição intermediária e as demais parcelas se localizavam mais distantes ao estábulo de ordenha (Figura 1).

Figura 1 - Desenho esquemático mostrando a distribuição dos sítios amostrados na área restaurada e na mata remanescente. A seta em branco mostra a posição do estábulo de ordenha.



Fonte: *Google earth* e figura elaborada pela autora.

As ações de restauração florestal da área conduzidas em fevereiro de 2013 consistiram no plantio homogêneo em toda a área de 577 mudas pertencentes a dez espécies diferentes tamanhos de sementes em espaçamento 2 m × 2 m. As mudas utilizadas foram produzidas em viveiro e transplantadas para o campo. A disposição das espécies transplantadas foi completamente randomizada (Macera et al., 2017). Além disso, empregou-se a técnica de semeadura direta, com as sementes das mesmas 10 espécies de mudas, as sementes foram lançadas nas entrelinhas do plantio das mudas, totalizando e 1154 sementes. Todos as mudas plantadas e o local onde foram enterradas as sementes foram especificamente marcados e mapeados para o acompanhamento do crescimento de todos os indivíduos.

3.3. Amostragem do solo

As condições iniciais dos atributos químicos do solo foram descritas através de amostras do solo conduzidas em novembro de 2014, um ano e nove meses após o restauro ser implantado. A amostragem de cada parcela no remanescente florestal e na área restaurada teve auxílio de trado-

de-caneco e consistiu em cinco subamostras do solo à profundidade de 0 – 20 cm, livre de serapilheira e distribuídas aleatoriamente em cada uma das parcelas. O material das subamostras foi homogeneizado e retirada 300 g. As amostras de solo foram enviadas para o Laboratório Solo da Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz da Universidade de São Paulo (ESALQ – USP).

As análises químicas foram realizadas de acordo com as metodologias propostas por Embrapa (1997) e Raij et al. (2001). Os atributos do solo medidos de cada amostra foram; potencial hidrogeniônico (pH); matéria orgânica (MO); fósforo (P); cálcio (Ca), magnésio (Mg) e nitrogênio total (N). A estimativa de pH foi feita através de solução tamponada de acetato de cálcio, a MO foi estimada usando o método de Walkley-Black. O método de resina trocadora de ânions foi utilizado para as estimativas de P, K, Ca e Mg e o método de Kjeldahl foi usado para a estimativa da concentração de N e o H+AL, as quais foram estimados através da solução tamponada de acetato de cálcio a pH 7. Depois da obtenção desses dados, estimamos a soma de bases (SB) através da soma dos cátions K, Ca e Mg, a Capacidade de Troca Catiônica (CTC) através de SB e de H+Al e a razão nitrogênio-fósforo (NP). Usamos as variáveis pH, P, MO, SB, N, CTC e NP para descrever às condições iniciais do solo.

3.4. Estrutura da vegetação e serapilheira

Os dados para análise da estrutura da floresta foram coletados nos meses de outubro e novembro de 2023, aproximadamente 11 anos após as ações de restauro da área. Todas as árvores foram medidas altura e diâmetro à altura do solo (DAS). As medidas de altura foram obtidas com auxílio de uma trena eletrônica (Leica Disto™ A3) e a medição do DAS foi feita com o auxílio de um paquímetro e/ou uma fita métrica (dependendo do diâmetro das plantas) a uma altura mais próximo possível do solo, mas de maneira que evitasse as expansões radiculares das árvores. Todos os indivíduos arbóreo-arbustivos que não foram plantados originalmente foram considerados como regenerantes, com critério de inclusão de altura mínima de 1,0 metro.

Para cada parcela, estimamos a densidade total (Densidade) como sendo o número de todos os indivíduos por unidade de área, a estratificação em altura (Estratificação), através da estimativa do coeficiente de variação da altura de todos os indivíduos, a densidade de regenerantes (Regenerantes), como a contagem de todos os indivíduos, que não foram plantados e tinham a altura superior a um metro, por unidade de área e a área basal total (Área basal), estimada pelo somatório da área basal de todos os indivíduos lenhosos. A área basal de cada indivíduo foi estimada através da analogia com a circunferência, usando o DAS.

Em novembro de 2023, amostras de serapilheira (Serapilheira) foram coletadas nas parcelas de restauração com auxílio de um gabarito de PVC de 0,25m × 0,25 m. Em cada parcela foram conduzidas cinco subamostras (Figura 2). As amostras de serapilheira foram acondicionadas em sacos de papel identificados e levados em estufa para secagem em 60°C por 72 horas. O peso seco

das subamostras de cada parcela foi somado para representar a quantidade de serapilheira de cada parcela.

Figura 2. (A) Coleta da serapilheira acumulada sobre o solo. (B) Registro fotográfico do interior da área de restauro.



Fonte: Elaborado pela autora.

3.5. Estoque de carbono na biomassa acima do solo

Para a quantificação do estoque de carbono acima do solo, estimamos a biomassa seca das partes aéreas de todos os indivíduos através da fórmula determinada por Chave et al. (2005), para florestas tropicais úmidas:

$$BS = 0,0509 \times \rho \times DAS^2 \times H$$

Onde, *BS* é a biomassa seca (Kg), ρ é a densidade da madeira (g/cm^3), *DAS* é o diâmetro à altura do solo e *H* é a altura de cada indivíduo. A densidade da madeira de cada espécie arbórea foi obtida através da literatura (Carvalho, 2003; Carvalho, 2006; Carvalho, 2008, Carvalho, 2010; Amirta et al., 2016; Lorenzi, 1992, Zanne et al., 2009) (Apêndice A).

O carbono estocado na vegetação acima do nível do solo a estimativa do carbono se deu pela multiplicação da biomassa da parte aérea de cada parcela pelo fator 0,485, determinado por Nogueira et al. (2008), cujo a percentagem de carbono presente nessa biomassa seca é 48,5%. Portanto, a estimativa de carbono será aplicada a seguinte expressão:

$$EC = BS \times 0,485$$

Onde, *EC* é o estoque de carbono da biomassa aérea (Kg) e *BS* é a biomassa seca (Kg).

3.6. Análise dos dados

Para descrever a variação das condições iniciais do solo na estrutura de floresta, conduzimos a Análise de Componentes Principais (ACP) para reduzir os sete estimadores do solo em apenas dois eixos. Denominamos os dois primeiros eixos da ACP das variáveis do solo de Eixo 1 e Eixo 2. Previamente, a avaliação se os dados seguiam a distribuição normal foi realizada utilizando o teste

de Shapiro-Wilk através do software PAST. Os dados de P foram transformados em logaritmo neperiano para normalização. A correlação entre cada variável do solo e os dois primeiros eixos da ACP foi estimada através da fórmula:

$$r = u_{jk}\sqrt{\lambda_k},$$

Onde, u_{jk} é o coeficiente do atributo j no eixo k e λ é o autovalor do eixo k (Legendre e Legendre, 2012).

A avaliação do efeito das condições iniciais do solo no acúmulo de biomassa das partes aéreas dos indivíduos arbóreos e dos outros estimadores da estrutura da floresta, foi feita através de regressões múltiplas usando os dois primeiros eixos da ACP como variáveis preditoras e os cinco estimadores da estrutura da floresta como variáveis respostas (Legendre e Legendre, 2012).

Para quantificação de estoque de carbono das partes aéreas da biomassa vegetal multiplicou-se a biomassa da parte aérea de cada parcela pelo fator 0,485. O efeito das condições iniciais do solo no estoque de carbono foi estimado através de regressão linear múltipla usando os primeiros dois eixos da ACP do solo como variáveis preditoras (Legendre e Legendre, 2012). Todas as análises foram conduzidas no Systat 13 (Systat, 2012).

4. RESULTADOS

4.1. Atributos químicos do solo nos anos iniciais do restauro

A Análise de Componente Principal (ACP) que descreveu a variação espacial dos atributos químicos do solo na área restaurada e na mata remanescente explicou 84,78% da variação dos dados (Figura 3), sendo que o primeiro eixo foi responsável por 61,89% (autovalor=4,34) e foi positivamente correlacionado com a CTC ($r = 0,69$), MO ($r = 0,76$), N ($r = 0,80$), SB ($r = 0,90$), P ($r = 0,81$) e pH ($r = 0,86$). O segundo eixo foi responsável por 22,80% (autovalor = 1,60) e correlacionado positivamente com a razão nitrogênio e fósforo ($r = 0,67$), e negativamente com fósforo ($r = -0,55$).

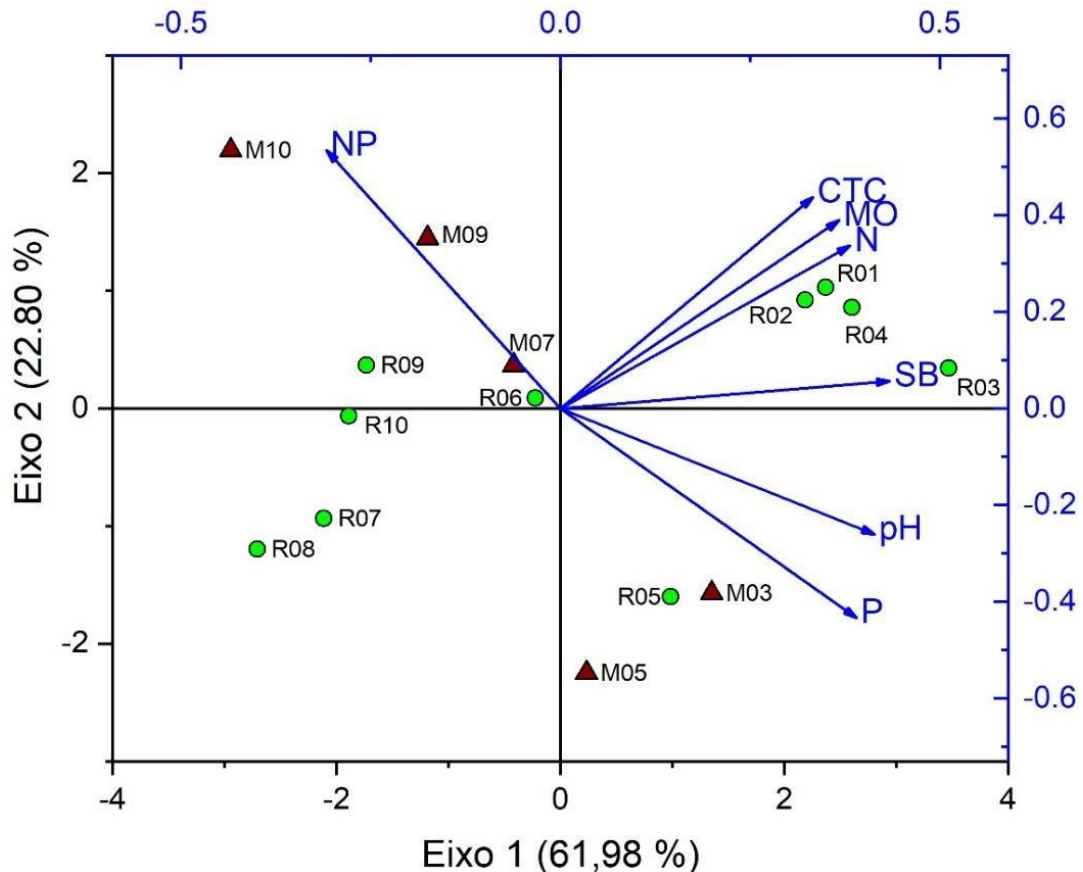
Os resultados da ACP indicaram uma grande variação espacial no interior da faixa da mata remanescente (Tabela 1) tanto com relação ao Eixo 1, quanto com relação ao Eixo 2 e refletiram a distância do estábulo com relação tanto ao primeiro eixo quanto ao segundo eixo da ACP (Figura 3). As parcelas dentro da mata remanescente próximas ao estábulo apresentaram maiores concentrações dos atributos positivamente correlacionados com o primeiro eixo da ACP e também maiores concentrações de fósforo e menores valores de NP, quando comparadas com as parcelas mais distantes do estábulo (Figura 3).

Tabela 1 - Atributos químicos do solo coletado em 2014 e a estrutura da floresta medida em 2023 na área restaurada e na mata remanescente. Os números representam a média; entre parêntese estão

representados os valores mínimo e máximo e os números em negrito representam o coeficiente de variação.

Parâmetro	Restauro	Mata remanescente
Solo		
P (mg/dm ³)	47,00 (12,00 – 115,00) 0,78	50,00 (7,0 – 115,0) 0,99
MO (g/dm ³)	19,10 (11,00 – 31,00) 0,36	16,2 (13,0 – 19,0) 0,14
pH	4,72 (4,30 – 5,20) 0,07	4,68 (4,3 – 5,4) 0,11
SB (mmolc/dm ³)	24,34 (8,92 – 42,74) 0,44	21,21 (10,25 – 30,53) 0,40
CTC (mmolc/dm ³)	66,14 (48,92 – 82,74) 0,16	64,41 (55,99 – 75,53) 0,13
N total (ppm)	1325 (950 – 2000) 0,30	1200 (1000 – 1500) 0,17
Razão N:P	41,61 (10,0 – 83,33) 0,52	68,31 (8,70 – 178,57) 1,03
Estrutura da floresta		
Biomassa seca (Mg/ha)	284,6 (158,9 – 401,7) 0,28	315,5 (71,7 – 595,9) 0,59
Densidade (ind/100m ²)	31,63 (21,74 – 43,75) 0,23	17,13 (10,0 – 21,6) 0,26
Altura (m)	6,72 (5,88 – 7,55) 0,09	6,09 (4,91 – 7,68) 0,23
Estratificação em altura	0,66 (0,53 – 1,06) 0,25	0,71 (0,46 – 1,03) 0,29
Área basal (m ² /(100m ²))	0,70 (0,38 – 0,91) 0,28	0,59 (0,14 – 0,91) 0,47
Densidade de regenerantes (ind/100m ²)	5,41 (2,42 – 14,38) 0,70	–
Serrapilheira (g/m ²)	847,6 (573,5 – 1117,5) 0,20	890,1 (619,0 – 1588,9) 0,45

Figura 3. Resultados das análises dos componentes principais dos atributos químicos do solo das parcelas localizadas na área restaurada (R) e mata remanescente (M). Os círculos verdes representam as parcelas da área restaurada, os triângulos vermelhos representam as parcelas da mata e, os valores ao lado são as identificações das parcelas. Em que: P = fósforo, N = nitrogênio total, CTC = capacidade de troca catiônica, MO = matéria orgânica, SB= Soma de bases, pH= potencial hidrogeniônico e NP = razão nitrogênio e fósforo.



Fonte: Elaborado pela autora

No interior do restauro, as primeiras parcelas, R1, R2, R3 e R4 que eram localizadas próximas ao estábulo de ordenha, apresentaram maiores concentrações dos atributos positivamente correlacionados no primeiro eixo, CTC, MO, N, e SB, enquanto que as parcelas localizadas mais distantes do estábulo apresentaram menores valores desses atributos. As parcelas R5 e R6 localizadas na porção intermediária com relação à distância do estábulo, apresentaram valores de escores intermediários em relação ao primeiro eixo da ACP, e as parcelas mais distantes do estábulo, R7, R8, R9 e R10, apresentaram menores valores de escores do primeiro eixo e do fósforo e maiores valores de escores da razão nitrogênio: fósforo (Figura 3).

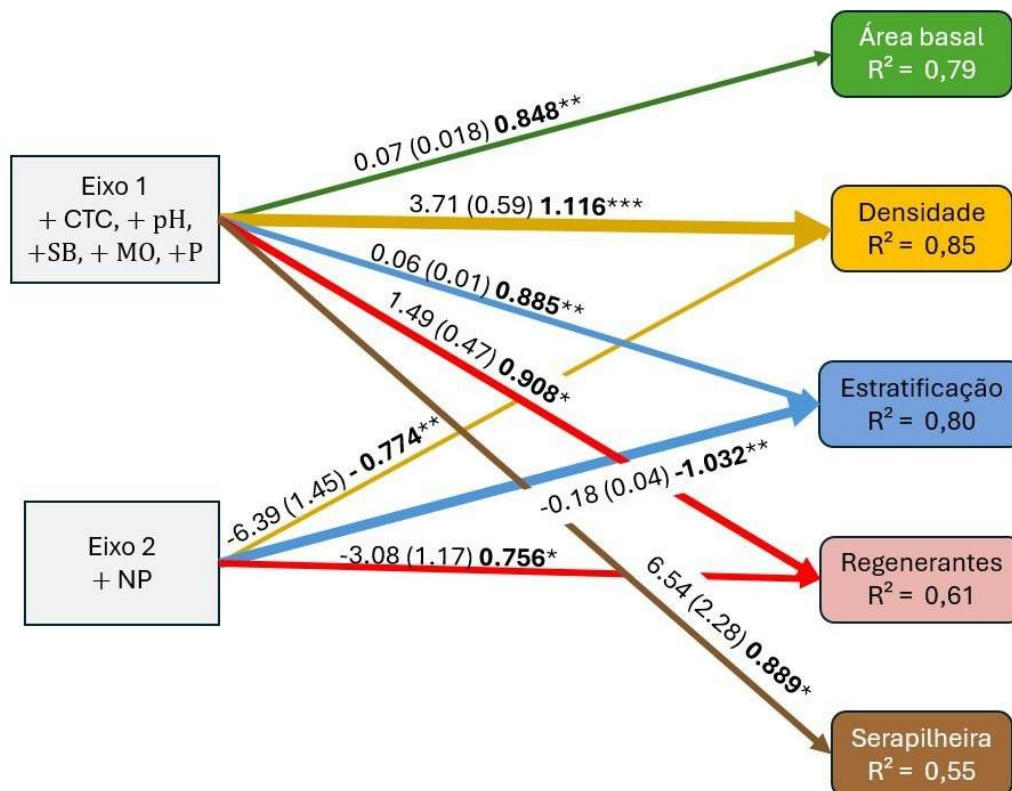
4.2. Influência dos atributos químicos do solo na estrutura da floresta

Os resultados das regressões múltiplas mostraram que os parâmetros da estrutura da floresta foram fortemente relacionados às condições iniciais do solo. O primeiro eixo da ACP do solo influenciou positivamente a área basal e a quantidade de serapilheira explicando 79% e 55% da

variação dos dados, respectivamente. No entanto, o segundo eixo da ACP do solo não influenciou esses atributos da estrutura da floresta (Figura 4).

As regressões múltiplas também mostraram que os dois primeiros eixos da ACP do solo influenciaram a densidade total de árvores, a densidade de regenerantes e a estratificação da floresta. A densidade total de árvores foi positivamente influenciada pelo primeiro eixo e negativamente pelo segundo eixo da ACP e explicaram juntas 85% da variação dos dados (Figura 4). O primeiro eixo da ACP influenciou positivamente a densidade de regenerantes, mas o segundo eixo influenciou negativamente esse parâmetro e ambos os eixos explicaram 61% da variação dos dados (Figura 4). O primeiro eixo da ACP também influenciou positivamente e o segundo eixo da ACP influenciou negativamente a estratificação da floresta, sendo que o efeito do segundo eixo nesse parâmetro foi mais forte do que o primeiro eixo da ACP e ambos explicaram 80% da variação dos dados (Figura 4). Os resultados referentes a esses dois parâmetros sugerem que menores valores de NP, e, portanto, maiores valores de fósforo em relação ao nitrogênio influenciaram positivamente a quantidade de regenerantes na área.

Figura 4. Resultados das regressões múltiplas entre a biomassa das partes aéreas dos indivíduos arbóreos e os parâmetros da estrutura da floresta em função dos dois primeiros eixos da ACP dos atributos químicos do solo. Os valores representam respectivamente os coeficientes de regressão parcial, os erros-padrão (entre parênteses) e em negrito, as estimativas padronizadas. A espessura das linhas é proporcional às estimativas padronizadas.

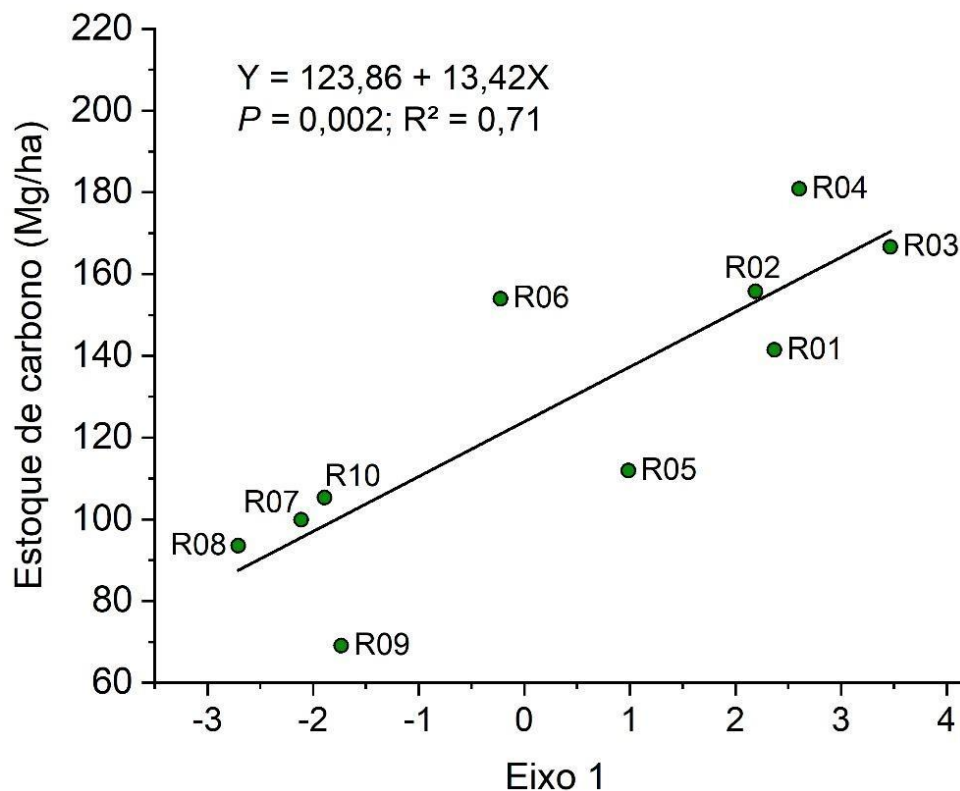


Fonte: Elaborado pela autora.

4.3. Influência das condições iniciais do solo no estoque de carbono.

Os resultados da regressão múltipla mostraram que apenas o primeiro eixo da ACP influenciou positivamente o estoque de carbono acumulado nas partes aéreas da biomassa vegetal (Figura 5), sugerindo que maiores quantidades de nutrientes do solo no início das ações de restauração resultaram no maior acúmulo de carbono na floresta onze anos após as ações de restauração da floresta.

Figura 5 – Relação entre o estoque de carbono de partes aéreas de indivíduos arbóreos nas parcelas da área restaurada em função do primeiro eixo da ACP das condições iniciais do solo.



Fonte: Elaborado pela autora

5. DISCUSSÃO

As estratégias de restauração florestal necessitam de processos que vão além da simples reintrodução de espécies através do plantio de mudas, exigindo a reconstrução das interações ecológicas que determinam a recuperação de funções do ecossistema. Por isso, a restauração de florestas tem incorporado cada vez mais a compreensão das interações entre os componentes acima e abaixo do solo (Kardol e Wardle, 2010). Por exemplo, a relação entre vegetação e solo define a trajetória sucessional, pois influencia diretamente a ciclagem de nutrientes, a dinâmica da matéria orgânica e a estrutura da microbiota do solo (Wardle e Peltzer, 2007, Zhang et al., 2021). Nosso

estudo mostrou que as condições iniciais do solo, não apenas podem influenciar a sobrevivência e crescimento de plantas jovens, mas também sugerem que a adição de matéria orgânica no solo pode ser muito eficaz para aumentar a velocidade da recuperação da estrutura da floresta.

As ações de restauração conduzidas em 2013, com o objetivo de aumentar a largura da floresta ripária resultaram na formação de uma floresta densa, com grandes árvores e muitos indivíduos arbóreos recrutados para o local. No entanto, a estrutura dessa floresta restaurada variou em função das condições iniciais do solo. O constante aporte de esterco oriundo do escoamento superficial a partir do estábulo de ordenha, proporcionou uma variação espacial dos atributos químicos do solo nessa área, na ocasião da implementação das ações de restauração (Figura 3). As parcelas na mata remanescente que eram mais próximas ao estábulo também foram influenciadas pelos dejetos bovinos, apresentando uma maior quantidade de matéria orgânica e nitrogênio, quando comparadas com as parcelas distantes. Essa variação sugere fortemente que o escoamento de águas superficiais e subterrâneas ricas em dejetos bovinos alcançavam a área de restauro e a mata remanescente, provavelmente impactando o curso d'água. O escoamento descontrolado de águas residuais proveniente de estábulos de ordenha pode levar a acúmulo de nutrientes, particularmente nitrogênio e fósforo, acarretando a eutrofização do solo de áreas adjacentes e das águas superficiais e subterrâneas (Filipi e Middlebrooks, 1976; Vaillant et al., 2009; Garcia et al., 2012).

A grande variação da quantidade de matéria orgânica presente no solo resultou numa floresta bastante heterogênea após aproximadamente 11 anos a partir das ações de restauro. Os atributos do solo correlacionados com o primeiro eixo da ACP explicaram quase 80 % da variação da área basal. A área basal total por unidade de área variou aproximadamente 2,4 vezes entre as parcelas com os menores (R08) e maiores (R03) valores de escores do primeiro eixo da ACP. A relação positiva com o primeiro eixo da ACP sugere que maiores valores de MO, N, CTC, P, SB e pH influenciaram o crescimento das árvores, mas o segundo eixo da ACP não influenciou os resultados, sugerindo que maiores concentrações de nitrogênio em relação ao fósforo não exerceram influência na área basal total. Essa variação da área basal refletiu uma maior taxa de crescimento em diâmetro das árvores. Em florestas tropicais, a disponibilidade de nutrientes pode facilitar o rápido crescimento de árvores, sendo grande influenciador no crescimento da área basal total (Kobal et al., 2015). Estrada-Villegas et al. (2019), conduziu um estudo que investigou como os fatores edáficos afetaram a sucessão florestal, em áreas com diferentes idades em uma floresta tropical seca no Panamá, os resultados mostraram que a disponibilidade de fósforo (P), bem como de outros nutrientes no solo influenciaram diretamente o crescimento da biomassa da vegetação. Parcelas com mais nutrientes tiveram um crescimento mais rápido da biomassa arbórea. A sobrevivência diferencial e a velocidade de crescimento das árvores influenciaram também os outros parâmetros da estrutura da floresta.

A densidade total de indivíduos variou fortemente com as condições iniciais do solo, mas o segundo eixo da ACP do solo contribuiu significativamente para essa variação (Figura 4). A densidade total de árvores é composta pelo número de indivíduos que sobreviveram a partir do plantio inicial, combinado com o número de indivíduos recrutados ao longo de 11 anos. Nossos resultados mostraram que tanto a densidade total de árvores quanto a densidade de indivíduos regenerantes foram positivamente relacionadas com o primeiro eixo da ACP e negativamente com o segundo eixo. O aumento da matéria orgânica no solo influenciou diretamente a disponibilidade de nutrientes, como o nitrogênio, fósforo, soma de bases e alguns outros parâmetros como a capacidade de troca catiônica (CTC) e o pH (Figura 3). Esses atributos contribuem para um solo mais fértil, e provavelmente uma maior atividade biológica, favorecendo maior disponibilidade de nutrientes para as plantas (Craswell e Lefroy, 2011; Tipping, Somerville e Luster, 2016). Assim, os atributos químicos do solo relacionados com o primeiro eixo influenciaram fortemente e positivamente tanto a sobrevivência das mudas plantadas como a sobrevivência de indivíduos que germinaram a partir de sementes que chegaram depois do plantio inicial. As relações negativas com o segundo eixo da ACP de ambos os parâmetros da estrutura da floresta mostraram que a densidade de árvores que sobreviveram a partir do plantio e a densidade de regenerantes era maior nas parcelas com menores valores de NP, isto é, as que tinham maiores quantidades de fósforo em relação às concentrações de nitrogênio no solo.

Assim, nossos resultados sugerem que a sobrevivência de plantas jovens tenha sido fortemente e positivamente influenciada pela quantidade de fósforo disponível no solo. Especificamente, nas parcelas onde a razão nitrogênio e fósforo eram menores, o estabelecimento de indivíduos arbóreos jovens regenerantes foi maior. As plântulas recém-emersas podem ser mais limitadas pela quantidade de fósforo disponível no solo em relação ao nitrogênio disponível do que as plantas em estágios mais avançados como as que foram plantadas na área em 2013. O fósforo é fundamental para o crescimento inicial das plantas, especialmente durante as fases de germinação e estabelecimento, pois atua na transferência de energia (ATP) e formação de ácidos nucleicos, promovendo o crescimento das raízes, melhorando a absorção de água e nutrientes (Cramer et al., 2009, Malhotra et al. 2018, Muindi 2019). Assim, uma maior disponibilidade de fósforo no solo parece ter proporcionado uma taxa mais alta de recrutamento de novos indivíduos na área do restauro. O fósforo deve ter promovido um crescimento mais acelerado das plântulas e uma forte influência nas taxas de sobrevivência desses indivíduos.

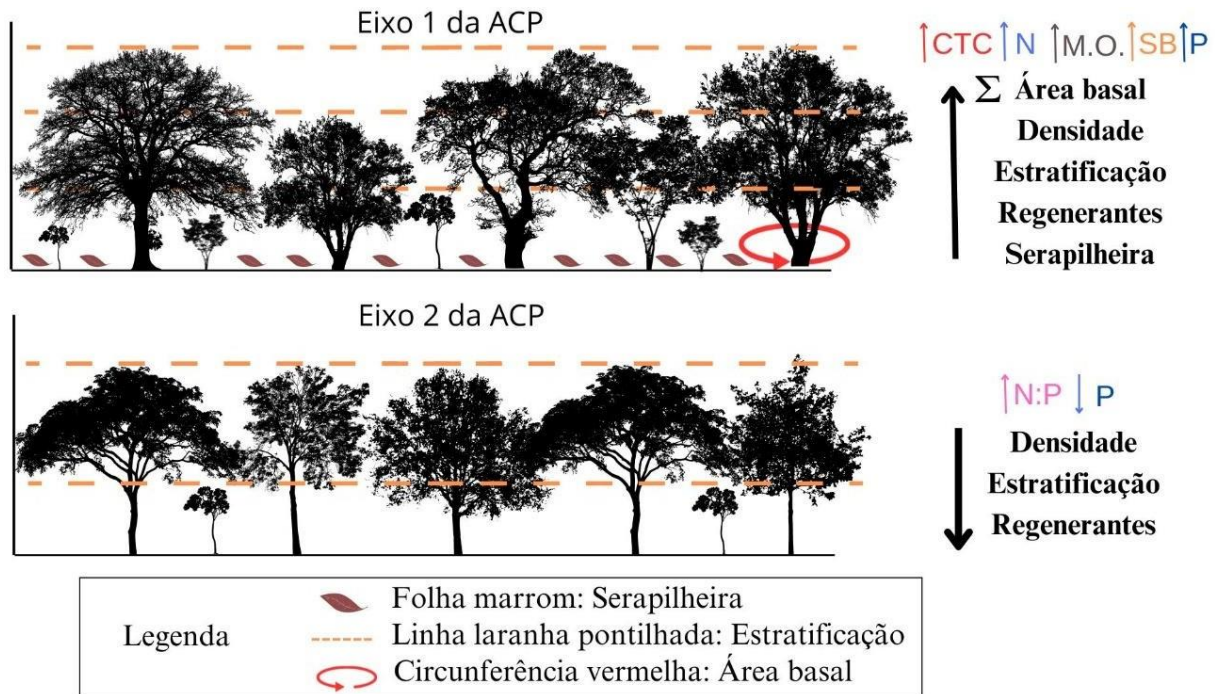
No entanto, a hipótese de que menores valores da razão N:P no solo resulta em maiores taxas de recrutamento, sobrevivência e crescimento de plântulas requer uma investigação mais profunda no contexto fisiológico das espécies, porque a razão N:P dentro das plantas pode depender tanto da disponibilidade de N e P no solo, quanto de fatores fisiológicos das espécies envolvidas, como

translocação interna de nutrientes e regulação homeostática das plantas (Güsewell, 2004), e no contexto das condições ambientais o que varia entre diferentes tipos de ecossistemas e de fatores climáticos (Soong et al., 2020, Chen et al., 2023).

Os dois primeiros eixos da ACP explicaram 80 % da variação da estratificação em altura das árvores. O primeiro eixo influenciou positivamente e o segundo eixo influenciou negativamente a estratificação da floresta, sendo que a força do efeito do segundo eixo foi maior do que a do primeiro eixo (Figura 4). Esses resultados mostraram que solos menos férteis e com menores quantidades de fósforo em relação ao nitrogênio formaram florestas menos estratificadas. A estratificação arbórea da floresta foi estimada através do coeficiente de variação da altura das árvores, dependendo assim da variação da velocidade de crescimento entre as espécies, mas também entre indivíduos dentro da mesma espécie. A reintrodução das mesmas espécies em todas as parcelas no plantio inicial resultou em diferenças na velocidade de crescimento dentro das espécies. Essas diferenças combinadas com a entrada de regenerantes em diferentes períodos foi determinante para a variação na estratificação ao longo do tempo. Esse processo pode ser explicado, em parte, pela plasticidade fenotípica de crescimento das árvores, uma característica que permite às espécies ajustarem seus processos fisiológicos e morfológicos às condições ambientais, incluindo os níveis de nutrientes do solo (Valladares, Gianoli e Gómez, 2007). Portanto, a interação entre a plasticidade fenotípica e o estabelecimento de indivíduos regenerantes em função da heterogeneidade do solo não apenas moldaram a dinâmica de crescimento das espécies, mas também a entrada de regenerantes na área de restauro, atribuindo um papel importante nas diferenças de altura das árvores, ou seja, na estratificação em altura da floresta.

Nossos resultados apontaram que nas áreas mais densas e estratificadas foram registradas também as maiores quantidades de serapilheira. No entanto, este efeito foi relacionado apenas com o primeiro eixo da ACP (Figura 4). Os maiores valores de MO, N, CTC, P, SB e pH influenciaram positivamente a quantidade de serapilheira, mas essa relação é indireta. As parcelas com altos valores desses atributos do solo são as parcelas mais densas, com maior área basal e mais estratificadas (Figura 6). A estrutura mais complexa da floresta normalmente leva à maior produção de folhas e galhos da floresta nessas parcelas. Nakasato et al. (2024), mostrou o mesmo processo em uma floresta estacional no sudeste do Brasil, onde a implementação da restauração no período de 12 anos mostrou uma relação positiva entre a quantidade de serapilheira e a complexidade da floresta expressa através da densidade, estratificação e tamanho das árvores. Em florestas secundárias que estão se regenerando após o uso de pastagens, a rápida restauração da produção de serapilheira demonstra a importância das mudanças na vegetação no avanço da sucessão ecológica e recuperação dos processos ecossistêmicos (Williams-Linera et al., 2021).

Figura 6. Desenho esquemático da estrutura da floresta restaurada em função dos dois primeiros eixos da Análise de Componentes Principais (ACP) dos atributos químicos do solo no início das ações de restauração. Em que: P = fósforo, N = nitrogênio total, CTC = capacidade de troca catiônica, MO = matéria orgânica, SB= Soma de bases, pH= potencial hidrogeniônico e NP = razão nitrogênio e fósforo.



Fonte: Elaborada pela autora.

A relação entre o primeiro eixo da ACP do solo e o estoque de carbono na floresta mostrou que a fertilidade do solo influenciou o acúmulo de biomassa arbórea da floresta, contribuindo para a fixação de uma maior quantidade de carbono nas partes aéreas da floresta. As parcelas R08, R09, R07 e R10, com estoques de carbono abaixo de 115 Mg/ha, sugerem que áreas com menor quantidade de matéria orgânica apresentaram menor potencial para acúmulo de biomassa aérea. A contrário das parcelas mais próximas ao estábulo de ordenha, representadas pelas parcelas R01, R02, R03 e R04, as quais tiveram maiores quantidades de atributos químicos que aumentaram a fertilidade do solo, o estoque de carbono foi superior à 140 Mg/ha. Um estudo realizado por Lawrence (2005), apontou resultados semelhantes, onde a fertilidade do solo foi responsável por um terço ou mais da variação da biomassa acima do solo na Amazônia brasileira, a biomassa acima do solo foi maior em solos com maior concentração de nitrogênio, matéria orgânica e bases trocáveis, mas sem efeito da disponibilidade de fósforo sobre a biomassa acima do solo da floresta. A matéria orgânica do solo atua como um sumidouro de carbono, uma vez que a incorporação de insumos como o esterco animal, promovem o aumento da densidade e tamanho das árvores e portando da produtividade primária do ecossistema (Gama, 2023).

6. CONSIDERAÇÕES FINAIS

As interações entre os processos que ocorrem acima e abaixo do solo desempenham um papel essencial no funcionamento dos ecossistemas florestais. A compreensão das interações solo-planta pode auxiliar a prever a velocidade e a estrutura da floresta a partir das ações de restauração desses ecossistemas, além de aprimorar as técnicas usadas nos projetos de restauração que direcionem a recuperação das funções e processos ecossistêmicos. Nossos resultados mostraram que devido à constante deposição de dejetos provenientes do estábulo de gado leiteiro determinou a maior parte da variação espacial dos atributos químicos do solo. A presença do estábulo causou um acentuado aumento de nutrientes no solo até a mata remanescente e isto pode impactar seriamente o curso d'água. Como as águas superficiais e subterrâneas tendem a ser despejadas nos cursos hídricos a preservação de florestas ripárias podem reduzir o impacto de resíduos nos corpos d'água (Chazdon, 2014; Mello et al., 2017; Allek et al., 2022). Assim, é provável que as ações de restauração da floresta aumentando a largura da floresta ciliar tenda a amenizar este impacto por fixar nutrientes nas partes aéreas e radiculares das plantas e na biota do solo (Mello, 2017; Souza et al., 2013; Fernandes et al., 2021), mas outros estudos são necessários para quantificar os efeitos da floresta recém-formada na quantidade de nutrientes na água e nos remanescentes.

Nossos resultados quantificaram o efeito das condições iniciais do solo na velocidade de recuperação da estrutura de uma floresta restaurada e na fixação de carbono nas partes aéreas das árvores mais de uma década após a sua implementação. Normalmente, as áreas degradadas que são destinadas para a restauração das florestas, sofreram desmatamento há muito tempo e por consequência são muito mais pobres em matéria orgânica no solo. A melhoria do solo, a partir da adição de matéria orgânica em regiões tropicais, pode acelerar a recuperação dos ecossistemas florestais, reestabelecendo as principais funções desses ecossistemas e promovendo uma maior fixação de carbono num menor período de tempo. Como as práticas associadas à produção de leite bovino são extremamente comuns nas regiões tropicais, o aproveitamento dos resíduos produzidos nessas práticas poderia ser mais amplamente usado na recuperação das florestas. A relação custo-benefício desse tipo de manejo de resíduos deve ser particularmente favorável, pois além de diminuir a descarga desses dejetos nos cursos d'água, dando um destino mais sustentável a esses resíduos, pode promover uma aceleração acentuada na recuperação das florestas e na fixação de carbono, diminuindo também emissões de gases do efeito estufa.

REFERÊNCIAS

- ALLEK, A., PRIETO, P., KORYS, K., RODRIGUES, A., LATAWIEC, A., & CROUZEILLES, R. How does forest restoration affect the recovery of soil quality? A global meta-analysis for tropical and temperate regions. **Restoration Ecology**, Washington, v. 31, n. 3, jun. 2022.
- ALVAREZ-CASTELLANOS, M., ESCUDERO-CAMPOS, L., MONGIL-MANSO, J., JOSE, F., JIMÉNEZ-SÁNCHEZ, A., & JIMÉNEZ-BALLESTA, R. Organic Carbon Storage in Waterlogging Soils in Ávila, Spain: A Traditional Agrosilvopastoral Region. **Land**. Basel, v. 13, n. 10, p. 1630, 2024.
- AMIRTA, R.; YULIANSYAH, Y.; ANGI, E. M.; ANANTO, B. R.; SETIYONO, B.; HAQIQI, M. T.; OKTAVIANTO, R. N. Plant diversity and energy potency of community forest in East Kalimantan, Indonesia: Searching for fast growing wood species for energy production. **Nusantara Bioscience**, Surakarta, v. 8, n. 1, p. 23-29, maio. 2016.
- AMOAKWAH, E.; LUCAS, S. T.; DIDENKO, N. A.; RAHMAN, M. A.; ISLAM, K. R. Impact of deforestation and temporal land-use change on soil organic carbon storage, quality, and lability. **PLoS One**, Califórnia, v. 17, n.8, p. 25, ago. 2022.
- ANDRADE, B. O.; OVERBECK, G. E.; PILGER, G. E.; HERMANN, J. M.; CONRADI, T.; BOLDRINI, I. I.; KOLLMANN, J. Intraspecific trait variation and allocation strategies of calcareous grassland species: results from a restoration experiment. **Basic and Applied Ecology**, Amsterdam, v.15, n. 7, p. 590-598, 2014.
- BARBOSA, L. M.; MARTINS, S. E. **Diversificando o reflorestamento no Estado de São Paulo: espécies disponíveis por região e ecossistema**. São Paulo: Instituto de Botânica, 2003, 64p.
- BIELUCZYK, W., MERLOTI, L.F.; CHERUBIN, M. R.; MENDES, L. W.; BENDASSOLI, J. A.; RODRIGUES, R. R.; CAMARGO, P. B.; PUTTEN, W.H. V D.; TSAI, S.M. Forest restoration rehabilitates soil multifunctionality in riparian zones of sugarcane production landscapes. **Science of The Total Environment**, Amsterdam, v. 888, p. 1-15. 2023.
- BOSSIO, D. A., COOK-PATTON, S. C.; ELLIS, P. W.; FARGIONE, J.; SANDERMAN, J.; SMITH, P.; S. WOOD, R. J. ZOMER, M. VON UNGER, I. M. EMMER; GRISCOM, B. W. The role of soil carbon in natural climate solutions. **Nature Sustainability**, v. 3, n.5, p. 391–398, mar. 2020.
- CALDERANO FILHO, B.; SANTOS, H. G. dos; FONSECA, O. O. M.; SANTOS, R. D. dos; PRIMAVESI, O.; PRIMAVESI, A. C. **Os solos da Fazenda Canchim**. São Carlos: Embrapa Solos, 1998, 95p.
- CALVO-RODRIGUEZ, S.; CALVO-ALVORADO, J.C.; ESPÍRITO-SANTO, M.M., NUNES, Y.R.F. Changes in forest structure and composition in a successional tropical dry forest. **Revista Forestal Mesoamericana Kurú**, Cartago, v. 14, n.35, p. 12-23, jun. 2017.
- CARVALHO, P. E. R. **Espécies Arbóreas Brasileiras. v. 1 ed.** Colombo/PR: Embrapa Florestas, 2003, 1044p.
- CARVALHO, P. E. R. **Espécies Arbóreas Brasileiras. v. 2 ed.** Colombo/PR: Embrapa Florestas, 2006. 629p.

- CARVALHO, P. E. R. **Espécies Arbóreas Brasileiras. v. 3 ed.** Colombo/PR: Embrapa Florestas, 2008. 597p.
- CARVALHO, P. E. R. **Espécies Arbóreas Brasileiras. v. 4 ed.** Colombo/PR: Embrapa Florestas, 2010. 649p.
- CELENTANO, D., ROUSSEAU, G., ENGEL, V., ZELARAYÁN, M., OLIVEIRA, E., ARAUJO, A., & MOURA, E. (2017). Degradation of Riparian Forest Affects Soil Properties and Ecosystem Services Provision in Eastern Amazon of Brazil. **Land Degradation & Development**, Hoboken, v. 28, 482 - 493. <https://doi.org/10.1002/ldr.2547>.
- CHAVE, J.; ANDALO, C; BROWN, S., CAIRNS, M.A.; CHAMBERS, J.Q.; EAMUS, D.; FOLSTER, H.; FROMARD, F.; HIGUCHI, N.; KIRA, T.; LESCURE, J.P.; NELSON, B.W.; OGAWA, H.; PUIG, H.; RIERA, B.; YAMAKURA, T. **Tree allometry and improved estimation of carbon stocks and balance in tropical forests.** *Oecologia*, Berlim, v. 145, p. 87- 99, jun. 2005.
- CHAZDON, R. L. Regeneração de florestas tropicais. **Boletim do Museu Paraense Emílio Goeldi-Ciências Naturais**, v. 7, n. 3, p. 195-218, 2012.
- CHAZDON, R. L. **Second growth: the promise of tropical forest regeneration in an age of deforestation.** Chicago: The University of Chicago Press, 2014. 472 p.
- CHEN, S., ZHANG, W., Ge, X., ZHENG, X., ZHOU, X., DING, H., ZHANG, A. Response of plant and soil N, P, and N: P stoichiometry to N addition in China: A meta-analysis. **Plants**, New York, v. 12, n. 11, p. 2104, 2023
- CLARK, J. S. Individuals and the Variation Needed for High Species Diversity in Forest Trees. **Science**, Washington, v. 327, n. 5969, 1129–1132. 2010. doi:10.1126/science.1183506
- CRAMER, M. D.; HAWKINS, H. J.; VERBOOM, G. A. The importance of nutritional regulation of plant water flux. *Oecologia*, Berlim, v. 161, p. 15–24, 2009.
- CRASWELL, E.T, LEFROY, R. D. B., The role and function of organic matter in tropical soils. **Nutrient Cycling in Agroecosystems**, Berlim, v.61, p. 7–18, 2001.
- DRAKE, T. W., Van OOST, K., BARTHEL, M., BAUTERS, M., HOYT, A. M., PODGORSKI, D. C., ... & SPENCER, R. G. Mobilization of aged and biolabile soil carbon by tropical deforestation. **Nature geoscience**, Berlim, v. 12, n.7, p. 541-546, 2019.
- DYDERSKI, M. K.; JAGODZIŃSKI, A. M. Seedling survival of *Prunus serotina* Ehrh., *Quercus rubra* L. and *Robinia pseudoacacia* L. in temperate forests of Western Poland. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v. 450, p. 117498, 2019.
- EMBRAPA – EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. **Manual de métodos de análise de solo.** Rio de Janeiro: EMBRAPA-CNPq, 1997, 212p.
- ERFANI, M.; SALMANMAHINY, A.; DANEHKAR, A.; ETEMAD, V. Modeling of forest soil and litter health using disturbance and landscape heterogeneity indicators in northern Iran. **Journal of Mountain Science**, Berlim, v. 14, p. 1801-1813, 2017.
- ESTRADA-VILLEGAS, S. BAILÓN, M., HALL, J. S., SCHNITZER, S.A., TURNER, B., CAUGHLIN, T., BREUGEL, M.V. Edaphic factors and initial conditions influence successional trajectories of early regenerating tropical dry forests. **Journal of ecology**, London, v. 108, p. 160-174, jul. 2019

FERNANDES, Janaína F.; SOUZA, Andréa LT; TANAKA, Marcel O. Can the structure of a riparian forest remnant influence stream water quality? A tropical case study. **Hydrobiologia**, Berlim, v. 724, p. 175-185, 2014.

FERNANDES, P.H.G., SOUZA, A.L.T., TANAKA, M.O., SEBASTIANI, R. Decomposition and stabilization of organic matter in an old-growth tropical riparian forest: effects of soil properties and vegetation structure. **Forest ecosystems**, Amsterdam, v. 8, p. 13. 2021.

FILIPI, D.S.; MIDDLEBROOKS, E.J. Eutrophication potencial of dairy cattle waste runoff. **Water research**, Amsterdam, v.10, p. 89 – 93, 1976.

FUJISAKI, K.; PERRIN, A. S.; DESJARDINS, T.; BERNOUX, M.; BALBINO, L. C.; BROSSARD, M. From forest to cropland and pasture systems: a critical review of soil organic carbon stocks changes in Amazonia. **Global change biology**, Hoboken, v. 21, p. 2773-2786, 2015.

GAMA, T. The Role of Soils in Sustainability, Climate Change, and Ecosystem Services: Challenges and Opportunities. **Ecologies**, Basel, v. 4, p. 552-567. 2023.

GARCÍA, A., MAISONNAVE, R., MASSOBRIO, M., & De IORIO, A. Field-scale evaluation of water fluxes and manure solution leaching in feedlot pen soils. **Journal of environmental quality**, Hoboken, v. 41, n. 5, p. 1591-1599. 2012.

GIWETA, M. Role of litter production and its decomposition, and factors affecting the processes in a tropical forest ecosystem: a review. **Journal of Ecology and Environment**, Amsterdam, v. 44, p. 1 - 9, mai. 2020.

Guo, L. B., & Gifford, R. M. Soil carbon stocks and land use change: A meta-analysis. **Global Change Biology**, Hoboken, v.8, n. 4, p. 345–360, 2002.

Güsewell, S. N: P ratios in terrestrial plants: variation and functional significance. **New phytologist**, Hoboken, v. 164, n. 2, p. 243-266, 2004.

HOUGHTON, R. A.; HOUSE, J. I.; PONGRATZ, J.; VAN DER WERF, G. R.; DEFRIES, R. S.; HANSEN, M. C.; LE QUÉRE, C.; RAMANKUTTY, N. Carbon emissions from land use and land-cover change. **Biogeosciences**, Gottingen, v. 9, n.12, p. 5125–5142, dez. 2012.

KARDOL, P.; WARDLE, D. A. How aboveground–belowground links understanding can assist restoration ecology. **Trends in Ecology & Evolution**, Amsterdam, v. 25, p. 670-679, set. 2010.

KOBAL, M.; GRČMAN, H.; ZUPAN, M.; LEVANIC, T.; SIMONCIC, P.; KADUNC, A.; HLADNIK, D. Influence of soil properties on silver fir (*Abies alba* Mill.) growth in the Dinaric Mountains. **Forest ecology and management**, Amsterdam, v. 337, p. 77-87, nov. 2014

KULIKOWSKI II, A. J.; ZAHAWI, R.A.; WERDEN, L.; ZHU, K.; HOLL, K.D. Restoration interventions mediate tropical tree recruitment dynamics over time. **Phil. Trans. R. Soc. B**, Lodon, v. 378, 2021.

LAWRENCE, D. Biomass accumulation after 10–200 years of shifting cultivation in bornean rain forest. **Ecology**, Washington, v. 86, p. 26-33, 2005.

LEGENDRE, P.; LEGENDRE, L. **Numerical Ecology**. 3rd ed. Amsterdam: Elsevier, 2012, 1006 p.

LEMENIH, M., KARLTUN, E., & OLSSON, M. Soil organic matter dynamics after deforestation along a farm field chronosequence in southern highlands of Ethiopia. **Agriculture, ecosystems & environment**, Amsterdam, v. 109, p. 9-19. 2005.

LORENZI, H. **Árvores brasileiras: Manual de identificação e cultivo de plantas arbóreas nativas do Brasil**. Nova Odessa, SP, Brazil, Instituto Plantarum de Estudos da Flora Ltda. ISBN, 1992, 352p.

MA T.; ZHANG C.; JI L.; ZUO, Z.; BECKLINE M.; HU Y.; LI X.; XIAO X. Development of forest aboveground biomass estimation, its problems and future solutions: A review. **Ecological indicators**, Amsterdam, v. 159, p. 402- 411, 2024.

MACERA, L. G.; PEREIRA, S. R.; SOUZA, A. L. T. de. Survival and growth of tree seedlings as a function of seed size in a gallery forest under restoration. **Acta Botanica Brasilica**, Brasília, v. 31, p. 539-545. 2017.

MALHOTRA, H.; VANDANA, SHARMA, S.; PANDEY, R. (2018). Phosphorus nutrition: plant growth in response to deficiency and excess. In: Hasanuzzaman, M., Fujita, M., Oku, H., Nahar, K., & Hawrylak-Nowak, B. (Eds.). **Plant nutrients and abiotic stress tolerance**, Amsterdam, 171-190. 2018.

MARAGKAKI, A., KOUKIANAKI, E., LILLI, M., EFSTATHIOU, D., & NIKOLAIDIS, N. Optimizing the water-ecosystem-food nexus using nature-based solutions at the basin scale. **Frontiers in Water**, Lausanne, v. 6, p. 1286925, 2024.

MATSUO, T.; MARTÍNEZ-RAMOS, M.; BONGERS, F.; VAN DER SANDE, M.T.; POORTER, L. Forest structure drives changes in light heterogeneity during tropical secondary forest succession. **Journal of ecology**, London, v. 109, p. 2871- 2884, abril, 2021.

MELLO, K.; RANDHIR, T. O.; VALENTE, R.A.; VETTORAZZI, C.A. Riparian restoration for protecting water quality in tropical agricultural watersheds. **Ecological engineering**, Amsterdam, v. 108, p. 514-524, jun. 2017.

MINASNY, B.; MALONE, B. P.; MCBRATNEY, A. B.; ANGERS, D. A.; ARROUAYS, D.; CHAMBERS, A.; WINOWIECKI, L. Soil carbon 4 per mille. **Geoderma**, Amsterdam, v. 292, p. 59-86, 2017.

MUINDI, E. (2019). Understanding Soil Phosphorus. **International Journal of Plant and Soil Science**, Washington, v. 31, n. 2, p. 1-18. 2019.

NAKASATO, M. V.; SOUZA, A.L.T.; BERNARDI, A.C.C. Waterline distance effects in the recovery of forest structure and soil organic matter 12 years after restoration. **Ecological Engineering**, Amsterdam, v. 206, n. 107315, 2024.

NOGUEIRA, E.M., FEARNSSIDE, P.M., NELSON, B.W., BARBOSA, R.I., KEIZER, E.W.H. Estimates of forest biomass in the Brazilian Amazon: New allometric equations and adjustments to biomass from wood-volume inventories. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v. 256, p. 1853-1867, nov. 2008.

NOLAN, M.; STANTON, K. J.; EVANS, K.; PYM, L.; KAUFMAN, B.; DULEY, E. From the ground up: prioritizing soil at the forefront of ecological restoration. **Restoration Ecology**, Washington, v. 29, n. 8, p. 1-5, jun. 2021.

NORDEN, N.; ANGARIT, H.A.; BORGERS, F.; MARTÍNEZ-RAMOS, M.; CERDA, G.; BREUGEL, M.; LEBRIJA-TREJOS, E.; MEAVE, J.A.; VANDERMEER, A.J.; WILLIAMSON, G. B.; FINEGAN, B.; MESQUITA, R.; CHAZDON, R.L. Successional dynamics in Neotropical forests are as uncertain as they are predictable. **Proceedings of the National Academy of Sciences**, Washington, v. 112, n. 26, p. 8013-8018, jun. 2015.

OLIVEIRA, R. E.; ENGEL, V.L.; LOIOLA, P.P.; MORAES, L.F.D.; VISMARA, E.S. Top 10 indicators for evaluating restoration trajectories in the Brazilian. **Ecological indicators**, Amsterdam, v. 127, p. 107652, mar. 2021.

OLSON, D. H.; ANDERSON, P.D.; FRISSELL, C.A.; WELSH JR. H.H.; BRADFORD, D.F. Biodiversity management approaches for stream–riparian areas: Perspectives for Pacific Northwest headwater forests, microclimates, and amphibians. **Forest ecology and management**, Amsterdam, v. 246, p. 81-107. 2007.

OSTERTAG, R.; MARÍN-SPIOTTA, E.; SILVER, W. L.; SCHULTEN, J. Litterfall and decomposition in relation to soil carbon pools along a secondary forest chronosequence in Puerto Rico. **Ecosystems**, Berlim, v. 11, p. 701–714, 2008.

PEÑA-CLAROS, M.; POORTER, L.; ALARCÓN, A.; BLATE, G.; CHOQUE, U.; FREDERICKSEN, T. S.; JUSTINANO, M. J.; LEAÑO, C.; LICONA, J. C.; PARIONA, W.; PUTZ, F. E.; QUEVEDO, L.; TOLEDO, M. Soil effects on forest structure and diversity in a moist and a dry tropical forest. **Biotropica**, Hoboken, v. 44, n. 3, p. 276-283, mai. 2012.

POWERS, J. S.; MARÍN-SPIOTTA, E. Ecosystem processes and biogeochemical cycles in secondary tropical forest succession. **Annual Review of Ecology, Evolution, and Systematics**, San Mateo, v. 48, p. 497-519, 2017.

QIN, Z., XIAO, X.; WIGNERON, J.-P.; CIAIS, P.; BRANDT, M.; FAN, L.; LI, X.; CROWELL, S.; WU, X.; DOUGHTY, R.; ZHANG, Y.; LIU, F.; SITCH, S.; MOORE III, B. Carbon loss from forest degradation exceeds that from deforestation in the Brazilian Amazon. **Nature Climate Change**, Amsterdam, v. 10, n.2, p. 171–176, 2021.

RAIESI, F.; BEHESHTI, A. Microbiological indicators of soil quality and degradation following conversion of native forests to continuous croplands. *Ecological Indicators*, Amsterdam, v. 50, p. 173-185, 2015.

RAIJ, B.; ANDRADE, J.C.; CANTARELLA, H.; QUAGGIO, J.A. Análise química para avaliação da fertilidade de solos tropicais. Campinas: Instituto Agronômico, 2001, 285p.

REQUENA SUAREZ, D.; ROZENDALL, D.M.A.; SY, V.; PHILLIPS, O.L. et al.. Estimating aboveground net biomass change for tropical and subtropical forests. **Global Change Biology**, Hoboken, v. 25, n. 11, p. 3609-3624, 2019.

ROLIM, G. de S.; CAMARGO, M. B. P. de; LANIA, D. G.; MORAES, J. F. L. de. Classificação climática de Köppen e de Thornthwaite e sua aplicabilidade na determinação de zonas agroclimáticas para o Estado de São Paulo. **Bragantia**, Campinas, v. 66, n. 4, p. 711-720, 2007.

RUIZ-JAEN, M. C.; AIDE, T.M. Restoration success: How is it being Measured? **Restoration Ecology**, Washington, v.13, n.3, p. 569-577, set. 2005.

SCHOLTEN, T., GOEBES, P., KÜHN, P., SEITZ, S., ASSMANN, T., BAUHUS, J., BRUELHEIDE, H., BUSCOT, F., ERFMEIER, E., FISCHER, F., HÄRDITZ, W., HE, J., MA, K., NIKLAUS, P.A., SCHERER-LORENZEN, M., SCHMID, B., SHI, X., SONG, Z., VON OHEIMB,

- G., WIRTH, C., WUBET, T., SCHMIDT, K. On the combined effect of soil fertility and topography on tree growth in subtropical forest ecosystems—a study from SE China. **Journal of Plant Ecology**, Oxford, v. 10, p. 111-127. 2017.
- SILVER, W. L.; HALL, S. J.; GONZÁLES, G. Differential effects of canopy trimming and litter deposition on litterfall and nutrient dynamics in a wet subtropical forest. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v. 332, p. 47-55, nov. 2014.
- SOARES, J. J.; SILVA, D. W.; LIMA, M. I. S. Current state and projection of the probable original vegetation of the São Carlos region of São Paulo state, Brazil. **Brazilian Journal of Biology**, São Carlos, v. 63, p. 527-536, 2003.
- SOONG, J. L., JANSSENS, I. A., GRAU, O., MARGALEF, O., STAHL, C., VAN LANGENHOVE, L., ... & VERBRUGGEN, E. Soil properties explain tree growth and mortality, but not biomass, across phosphorus-depleted tropical forests, **Scientific Reports**, Berlin, v. 10, p. 1–13, 2020.
- SOUSA JUNIOR, J. G.; DEMATTÊ, J. A. M.; ARAÚJO, S. R. Modelos espectrais terrestres e orbitais na determinação de teores de atributos dos solos: potencial e custos. **Bragantia**, Campinas, v. 70, n. 3, p. 610-621, 2011.
- SOUZA, A.L.T.; FONSECA, D.G., LIBÓRIO, R.A.; TANAKA, M.O. Influence of riparian vegetation and forest structure on the water quality of rural low-order streams in SE Brazil, **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v. 298, p. 12 – 18, fev. 2013.
- STEFANO, A.; JACOBSON, M. Soil carbon sequestration in agroforestry systems: a meta-analysis. **Agroforestry Systems**, Berlin, v. 92, p. 285-299, 2018.
- SUGANUMA, M. S.; DURIGAN, G. Indicators of restoration success in riparian tropical forests using multiple reference ecosystems. **Restoration ecology**, Washington, v. 23, n. 3, p. 238 - 251, mai. 2015.
- SYSTAT FOR WINDOWS VERSION 13.0. San Jose, California: Systat Software, Inc., 2012.
- TIPPING, E, SOMERVILLE, C.J., LUSTER, J. The C: N:P:S stoichiometry of soil organic matter. **Biogeochemistry**, Berlin, v.130, p. 117–131, 2016.
- TOCKNER, K.; STANFORD, J.A. Riverine Flood Plains: Present State and Future Trends. **Environmental Conservation**, Cambridge, v. 29, n. 3, p. 308 -330, set. 2002.
- VAILLANT, G., PIERZYNSKI, G., HAM, J., & DEROUCHÉY, J. Nutrient accumulation below cattle feedlot pens in Kansas. **Journal of environmental quality**, Hoboken, v. 38, n. 3, p. 909-918, 2009.
- VALLADARES, F. GIANOLI, E., GÓMEZ, J. M. Ecological limits to plant phenotypic plasticity. **New phytologist**, Hoboken, v. 176, p. 749 – 763, 2007.
- VAN BREUGEL, M., HALL, J.S., CRAVEN, D.J., GREGOIRE, T.G., PARK, A., DENT, D.H., WICHNIE, M.H, MARISCAL, E., DEAGO, J., IBARRA, D., CEDEÑO, N., ASHTON, M. S. Early growth and survival of 49 tropical tree species across sites differing in soil fertility and rainfall in Panama. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v. 261, p. 1580-1589. 2011.

VELDKAMP, E.; SCHMIDT, M.; POWERS, J. S.; CORRE, M. D. Deforestation and reforestation impacts on soils in the tropics. **Nature Reviews Earth & Environment**, Berlim, v.1, n. 11, p. 590-605, 2020.

VELOSO, H.P.; RANGEL FILHO, A.L.R.; LIMA, J.C.A. **Classificação da vegetação brasileira, adaptada a um sistema universal**. Rio de Janeiro: IBGE, Departamento de Recursos Naturais e Estudos Ambientais, 1991. 124 p.

VILLARINO, S. H., STUDDERT, G. A., BALDASSINI, P., CENDOYA, M. G., CIUFFOLI, L., MASTRÁNGELO, M., & PIÑEIRO, G. Deforestation impacts on soil organic carbon stocks in the Semiarid Chaco Region, Argentina. **Science of the total environment**, Amsterdam, v. 575, p. 1056-1065, 2018.

WARDLE, D.A., PELTZER, D.A. Aboveground-Belowground Linkages, Ecosystem Development, and Ecosystem Restoration. *In*: WALKER, L.R.; WALKER, J.; HOBBS, R.J. (ed.). **Linking Restoration and Ecological Succession**. New York: Springer New York, 2007, p. 45 – 68.

WIDYATI, E., NURONIAH, H. S., TATA, H. L., MINDAWATI, N., LISNAWATI, Y., ABDULAH, L., VAN NOORDWIJK, M. Soil degradation due to conversion from natural to plantation forests in Indonesia. **Forests**, Basel, v. 13, n. 11, p. 1913. 2022.

WILLIAMS-LINERA, G.; BONILLA-MOHENO, M.; LÓPEZ-BARRERA, F.; TOLOME, J. Litterfall, vegetation structure and tree composition as indicators of functional recovery in passive and active tropical cloud forest restoration, **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v. 493, 119260, p. 1- 9, ago. 2021.

WU, S., BASHIR, M. A., RAZA, Q. U. A., REHIM, A., GENG, Y.; CAO, L. Application of riparian buffer zone in agricultural non-point source pollution control—A review. **Frontiers in Sustainable Food Systems**, Lousanne, v. 7, p. 985870, 2023.

YAGÜE, M., DOMINGO-OLIVÉ, F., BOSCH-SERRA, À., POCH, R., BOIXADERA, J. Dairy Cattle Manure Effects on Soil Quality: Porosity, Earthworms, Aggregates and Soil Organic Carbon Fractions. **Land Degradation & Development**, Hoboken, v. 27, p. 1753 - 1762. 2016.

YUAN, Z.; WANG, S.; ALI, A.; GAZOL, A., RUIZ-BENITO, P.; WANG, X.; LIN, F.; YE, J.; HAO, Z.; LOREAU, M. Aboveground carbon storage is driven by functional trait composition and stand structural attributes rather than biodiversity in temperate mixed forests recovering from disturbances. **Annals of forest science**, Berlim, v. 75, p. 67, 2018.

ZANNE, A.E.; LOPEZ-GONZALEZ, G.; COOMES, D.A.; ILIC, J.; JANSEN, S.; LEWIS, S.L.; MILLER, R.B.; SWENSON, N.G.; WIEMANN, M.C.; CHAVE, J. **Data from: Towards a worldwide wood economics spectrum**, California: DRYAD, fev, 2009.

ZHANG, M.; O'Connor, P. J.; Zhang, J.; Ye, X. Linking soil nutrient cycling and microbial community with vegetation cover in riparian zone. **Geoderma**, Amsterdam, v. 384, p. 114801, 2021.

ZHANG, Y.; CHEN, H.Y. H. Individual size inequality links forest diversity and above-ground biomass. **Journal of ecology**, Lodon, v. 103, p. 1245 – 1252, 2015. doi: 10.1111/1365-2745.12425

APÊNDICE

Apêndice A – Lista de espécies encontradas na área em restauro e mata remanescente, classificadas em ordem alfabética das famílias botânicas, com suas respectivas ocorrências e densidades de madeira.

Família	Nome	Mata	Restauro	Densidade (g/cm ³) *
Anacardiaceae	<i>Tapirira guianensis</i> Aubl.	x	x	0.51
Annonaceae	<i>Duguetia lanceolata</i> A.St.-Hil.	x	x	0,92
Arecaceae	<i>Acrocomia aculeata</i> (Jacq.) Lodd. ex Mart	x	x	0.53
	<i>Caryota mitis</i> Bercht. & J.Presl.	x		0.76
Burseraceae	<i>Protium heptaphyllum</i> (Aubl.) Marchand	x		0.40
Cannabaceae	<i>Celtis iguanaea</i> (Jacq.) Sarg.	x	x	0.65
Celastraceae	<i>Monteverdia gonoclada</i> Mart.	x		0.77
Euphorbiaceae	<i>Alchornea glandulosa</i> Poepp.	x	x	0.40
	<i>Croton urucurana</i> Baill.	x	x	0.83
	<i>Joannesia princeps</i> Vell.		x	0.52
	<i>Maprounea guianensis</i> Aubl.	x		0.72
Fabaceae	<i>Anadenanthera colubrina</i> var. <i>cebil</i> (Griseb.) Altschul	x	x	0.86
	<i>Centrolobium tomentosum</i> Guillem. ex Benth.		x	0.74
	<i>Copaifera langsdorffii</i> Desf.	x	x	0.74
	<i>Enterolobium contortisiliquum</i> (Vell.) Morong		x	0.54
	<i>Enterolobium timbouva</i> Mart.	x	x	0.49
	<i>Hymenaea courbaril</i> L.		x	0.96
	<i>Platypodium elegans</i> Vogel		x	0.82
	<i>Pterogyne nitens</i> Tul.		x	0.76
Lauraceae	<i>Schizolobium parahyba</i> (Vell.) Blake		x	0.32
	<i>Senna pendula</i> (Humb. & Bonpl.ex Willd.) H.S.Irwin & Barneby		x	0.50
	<i>Nectandra megapotamica</i> (Spreng.) Mez	x	x	0.67
Lecythidaceae	<i>Persea americana</i> Mill.	x		0.44
	<i>Cariniana estrellensis</i> (Raddi) Kuntze	x	x	0.78
Malvaceae	<i>Luehea grandiflora</i> Mart.		x	0.53
	<i>Pseudobombax grandiflorum</i> (Cav.) A.Robyns	x		0.39
Meliaceae	<i>Cedrela fissilis</i> Vell.		x	0,55
	<i>Trichilia catigua</i> A.Juss.	x	x	0.70
Muntingiaceae	<i>Muntingia calabura</i> L.	x		0.42
Myrtaceae	<i>Eugenia uniflora</i> L.	x	x	0.88

(continua)

	<i>Myrcia guianensis</i> (Aubl.) DC.	x		0.54
	<i>Psidium guajava</i> L.	x		0.80
Piperaceae	<i>Piper amalago</i> L.	x		0.51
Rhamnaceae	<i>Rhamnidium elaeocarpum</i> Reissek	x		0.80
Rubiaceae	<i>Amaioua guianensis</i> Aubl.	x	x	0.63
Rutaceae	<i>Zanthoxylum rhoifolium</i> Lam.	x	x	0.68
Saliaceae	<i>Casearia sylvestris</i> Sw.	x		0.52
Sapindaceae	<i>Allophylus edulis</i> (A.St.-Hil. et al.) Hieron. ex Niederl.	x	x	0.67
	<i>Matayba elaeagnoides</i> Radlk.	x	x	0.83
Solanaceae	<i>Cestrum mariquitense</i> Kunth	x	x	0.40
	<i>Solanum mauritianum</i> Scop.	x	x	0.48
Urticaceae	<i>Cecropia pachystachya</i> Trécul	x		0.41
