



ESTRUTURA FUNCIONAL DAS PLANTAS CULTIVADAS AFETA A RELAÇÃO C:N DE BIOMASSA PODADA E SERRAPILHEIRA EM SISTEMAS AGROFLORESTAIS SUCESSIONAIS

Fabiola Mendes Martins^{1}, Diego dos Santos², Fernando Joner¹, Patrícia Menegaz de Farias³, Gustavo Brunetto^{1,4} & Ilyas Siddique¹*

¹Universidade Federal de Santa Catarina, Centro de Ciências Agrárias, Programa de Pós-Graduação em Agroecossistemas, Rodovia Admar Gonzaga, 1346, Itacorubi, CEP: 88034-000, Florianópolis, SC, Brasil.

²Universidade Federal da Fronteira Sul, campus Laranjeiras do Sul, Rodovia BR 158, Km 405, CEP 85301-970, Laranjeiras do Sul, PR, Brasil

³Universidade do Sul de Santa Catarina, Centro de Desenvolvimento Tecnológico Amael Beethoven Villar, Avenida José Acácio Moreira, 787, CEP: 88704-900, Tubarão, SC, Brasil.

⁴Universidade Federal de Santa Maria, Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo, Avenida Roraima, nº 1000, Bairro Camobi, CEP: 97105-900, Santa Maria, RS, Brasil.

E-mails: fbl.mmartins@gmail.com*; diegosantos@uffs.edu.br; fernando.joner@ufsc.br; patricia.farias@unisul.br; brunetto.gustavo@gmail.com; ilyas.s@ufsc.br

Resumo: A identidade funcional (valores dominantes de atributos das plantas) e a diversidade funcional (variação nos valores de atributos) fazem parte da estrutura funcional de uma comunidade de plantas e podem pautar a composição de consórcios de espécies para prover múltiplos serviços agroecossistêmicos. Este estudo teve como objetivo avaliar o efeito da estrutura funcional de consórcios de plantas cultivadas sobre a massa e relação C/N da biomassa podada e na serapilheira acumulada em Sistemas Agroflorestais Sucessionais com baixos insumos em um solo arenoso de baixa fertilidade localizado em Santa Catarina, região subtropical úmido do Brasil. Implantamos um experimento de longa duração em campo em 2016, em blocos completos casualizados, com seis repetições e três tratamentos que avaliaram a estrutura funcional dos consórcios. Quatro atributos funcionais foram coletados nas plantas cultivadas: concentração de N foliar, pH da folha, área foliar específica e conteúdo de matéria seca foliar. Para caracterizar a identidade funcional calculamos as médias dos atributos ponderadas pelas biomassas relativas de cada cultura conhecida como Community Weighted Mean (CWM). A diversidade funcional foi calculada pela entropia quadrática de Rao, também ponderada pela biomassa relativa de cada cultura. Uma análise de componentes principais foi realizada para preservar o máximo de informações. Também, a análise de regressão foi realizada usando modelos lineares mistos para explicar as variáveis resposta (massa de serapilheira acumulada e relações C:N de serapilheira acumulada, caule e folha na biomassa podada). Dois componentes principais explicaram conjuntamente 79% da variação dos dados dos índices que mediam a estrutura funcional das comunidades. O primeiro componente (PC1) foi relacionado forte e negativamente com os índices de diversidade funcional, enquanto o segundo (PC2) foi relacionado forte e positivamente com os índices de identidade funcional (CWM de pH foliar, LNC e SLA). Conforme predito pela hipótese de razão de massa (que sugere que uma função ecossistêmica é influenciada mais fortemente pelas espécies mais dominantes numa comunidade), consórcios de culturas dominados por plantas com folhas grandes e finas (alta área foliar específica), alta concentração de N foliar e alto pH foliar resultaram em comunidades vegetais com baixa relação de C:N nas folhas e caules da biomassa

disponível para poda, e produziram serapilheiras acumuladas com relação C:N baixa. Assim, destacamos que a média de atributos das plantas consorciadas (identidade funcional) pode ser mais importante do que a diversidade funcional no manejo da qualidade da biomassa e serrapilheira em sistemas agroflorestais em solos nutricionalmente pobres.

Palavras-Chaves: adubação verde, agricultura sintrópica, atributos biogeoquímicos, N foliar.

CROP FUNCTIONAL STRUCTURE INFLUENCES THE C:N RATIOS OF PRUNED BIOMASS AND LITTER IN SUCCESSIONAL AGROFORESTRY SYSTEMS: Functional identity (dominant values of plant traits) and functional diversity (variation in trait values) are part of the functional structure of a plant community and may direct species choice in intercropping to promote multiple agroecosystem services. The objective of this study was to evaluate the effect of the functional structure of polycultures on the mass and C/N ratio of pruned crop biomass and litter layer in low-input Successional Agroforestry Systems on low-fertility sandy soil in Santa Catarina, humid subtropical Brazil. We established a long-term field experiment in 2016, in randomized complete blocks with six replications and three treatments that varied the functional structure of polycultures. We collected four traits of all intercropped plants: leaf N concentration (LNC), leaf pH, specific leaf area (SLA) and leaf dry matter content (LDMC). To characterize the functional identity, we calculated the trait mean, weighted by the relative biomass in each intercrop community (CWM). Functional diversity was calculated by Rao's quadratic entropy, also weighted by each crop's relative biomass. We performed principal components analysis and fitted the data using linear mixed models. Two principal components jointly explained 79% of data variation that measured the functional structure of communities. The first component (PC1) was strongly negatively related to the functional diversity indices, while the second (PC2) was strongly positively related to the functional identity indices (CWM of pH, LNC and SLA). As predicted by the mass-ratio hypothesis, intercrops dominated by species with large and thin leaves (high specific leaf areas), high leaf N concentrations and high leaf pH resulted in plant communities with low C:N ratio in leaves and stems of biomass available for pruning and produced litter layers with low C:N ratio. This study suggests that functional identity may be more important than functional diversity to manage biomass and litter quality in agroforestry systems on nutrient-poor soils.

Keywords: green manuring, syntropic agriculture, biogeochemical trait, foliar N.

INTRODUÇÃO

Um dos grandes desafios enfrentados pela humanidade neste século é gerenciar o uso do solo para promover tanto a conservação da biodiversidade quanto a produção de alimentos e outros bens materiais importantes para os seres humanos (Foley *et al.* 2011, Fischer *et al.* 2014). Para gerenciar sistemas de ocupação de solo capazes de atingir esses múltiplos objetivos simultaneamente, os Sistemas Agroflorestais Agroecológicos (SAFs), já bastante utilizados por povos tradicionais, vêm sendo estudados e desenvolvidos para produção de alimentos, madeira, cobertura do solo, forragem e contribuição para a conservação da biodiversidade (Santos *et al.* 2021a, Jose 2009).

Nos Sistemas Agroflorestais Sucessionais (SAFS), por exemplo, o cultivo das espécies é planejado para que ocorra uma mudança na

composição de espécies ao longo do tempo ou que as espécies cultivadas desde a implantação se tornem importantes no sistema em diferentes fases, dependendo da velocidade de crescimento e porte das espécies (Young 2017, Santos *et al.* 2021a, 2021b). Este planejamento tenta mimetizar o desenvolvimento florestal fazendo uso da sucessão ecológica para acelerar alguns processos ecossistêmicos (Jose 2012).

Em SAFS, a serapilheira é constituída não somente de resíduos senescentes, mas também por resíduos provenientes das podas, sendo esta a principal entrada de nutrientes (Nair *et al.* 1999). Com este intuito, algumas espécies de crescimento rápido, chamadas de adubadeiras, podem ser plantadas deliberadamente para serem cortadas e sua biomassa usada no solo para acúmulo de matéria orgânica e acelerar a ciclagem de nutrientes (Siddique *et al.* 2019).

Toda essa diversificação da biomassa gerada pode afetar as relações de carbono e outros nutrientes (Abbas *et al.* 2013). Desta forma, as características morfofisiológicas e biogeoquímicas (chamadas de atributos funcionais) destas espécies são importantes para o planejamento desses consórcios, pois estão relacionados com a velocidade, quantidade e qualidade da biomassa produzida (Wood *et al.* 2015, Martin & Isaac 2018).

Atributos funcionais como conteúdo de matéria seca foliar (*Leaf Dry Matter Content* – LDMC), área foliar específica (*Specific Leaf Area* – SLA), concentração de nitrogênio (N) foliar (*Leaf Nitrogen Concentration* – LNC) e pH foliar são características importantes das folhas vivas relacionadas as suas propriedades estruturais e de qualidade do tecido, que afetam a taxa de crescimento da planta e consequentemente a qualidade da serapilheira (Cortez *et al.* 2007, Cornelissen *et al.* 2011). Esses atributos funcionais interferem tanto no acúmulo de carbono (C) e nitrogênio (N) nos tecidos vegetais, quanto na decomposição da serapilheira e liberação desses nutrientes para o solo (Milcu *et al.* 2014). Por exemplo, o aumento na disponibilidade de nutrientes na serapilheira é influenciado por baixas relações C:N, enquanto a mitigação da erosão do solo pela serapilheira é impulsionada por alta relação C:N (Faucon *et al.* 2017). Ou seja, comunidades formadas por plantas com determinados valores de atributos funcionais podem promover a aquisição ou a conservação de recursos, bem como influenciar a disponibilidade de nutrientes pela velocidade de decomposição da matéria orgânica (Díaz *et al.* 2004). Assim, os valores dominantes dos atributos ('identidade funcional') e a variação desses valores ('diversidade funcional') influenciam nos processos e funções ecossistêmicas (Garnier & Navas, 2012).

Essa estrutura funcional da comunidade (identidade e diversidade funcional) pode ser usada para avaliar os mecanismos ecológicos (hipótese da razão de massa e complementariedade de nichos) que explicam os efeitos da biodiversidade no funcionamento dos ecossistemas. Pela hipótese da razão de massa, a influência das espécies nos processos ecossistêmicos é proporcional a abundância das mesmas (Grime 1998) e pode ser avaliada com a identidade funcional (Tobner *et al.* 2016). Já o efeito

de complementariedade ocorre quando espécies com diferentes valores de atributos ocupam nichos distintos e, portanto, utilizam os recursos disponíveis de forma complementar (Lavorel & Garnier 2002).

Entretanto, faltam resultados na literatura para entender quais relações existentes entre propriedades da serapilheira (massa e relação C:N) e os mecanismos ecológicos por trás do desempenho de policultivos como SAFS. A hipótese deste trabalho é de que SAFS com alta diversidade funcional (planejados com espécies de plantas com atributos funcionais complementares) são mais apropriados para produção de serapilheira capaz de cobrir o solo e fornecer nutrientes para as plantas, quando comparados a SAFS cultivado com espécies cujos atributos funcionais sejam mais semelhantes umas às outras.

METODOLOGIA

Área experimental

Os dados foram coletados em um experimento de longa duração, implantado em 2016, em um Sistema Agroflorestal Agroecológico Sucessional (SAFS). A ideia central do experimento consiste em manter constante o número de espécies (riqueza) e variar a diversidade funcional dos consórcios agroflorestais. O experimento está situado na Fazenda Ressacada, unidade experimental da Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC), em Florianópolis, Brasil (27° 41' 7" S, 48° 32' 28" O). A região possui um clima subtropical úmido (Cfa – classificação climática de Köppen) (Alvares *et al.* 2013). O solo da área foi classificado como Neossolo Quartzarênico Hidromórfico Típico (Embrapa, 2004), pouco intemperizado, incipiente, com baixa fertilidade natural e arenoso.

Antes da instalação do experimento, o local era intensivamente manejado para a produção de arroz em sistema convencional. Uma área de aproximadamente 0,15 ha foi capinada usando a enxada rotativa para implantação do experimento em Novembro de 2016. O delineamento foi em blocos casualizados, com seis blocos, três tratamentos, totalizando 18 parcelas de 9 x 9 m com 0,5 m de bordadura (Figura 1).

Os tratamentos foram definidos a partir das

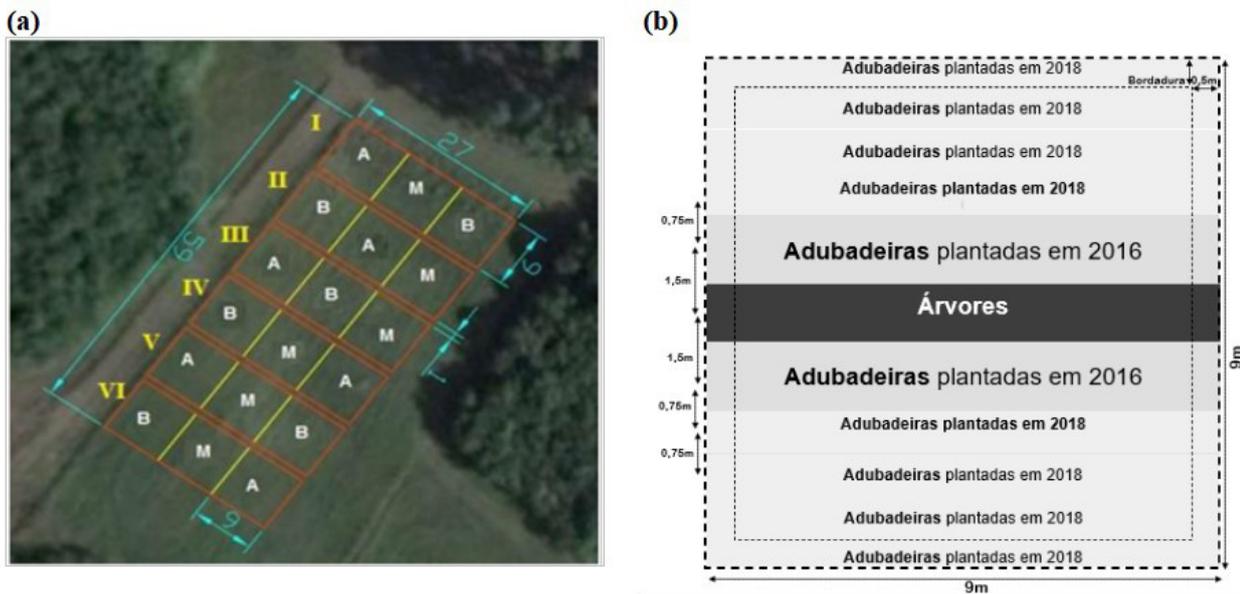


Figura 1. (a) Delineamento experimental com a distribuição e dimensões dos blocos, parcelas e tratamentos. Os algarismos romanos representam os blocos. Em laranja, as parcelas. As letras dentro das parcelas representam os tratamentos B – Baixo N foliar, M – Médio N foliar, A – Alto N foliar (Fonte: arquivo do Laboratório de Ecologia Aplicada, 2016); (b) croqui geral da divisão da parcela para todos os tratamentos (Fonte: Ilyas Siddique e Djalma Roecker Jr., 2018).

Figure 1. (a) Experimental design showing the distribution and dimensions of blocks, plots, and treatments. Roman numerals represent the blocks. The letters inside the plots represent the treatments: B - Low leaf N content (LNC); M - Medium LNC; A - High LNC (Source: Applied Ecology Laboratory archive, 2016); (b) General sketch illustrating the plot division for all treatments (Source: Ilyas Siddique and Djalma Roecker Jr., 2018).

concentrações de nitrogênio foliar (LNC) das espécies consorciadas. Os tratamentos foram denominados de: Baixo N-foliar, composto por seis espécies com baixa concentração de N foliar (LNC <25 mg g⁻¹); Alto N- foliar: mistura de seis espécies com alta concentração de N foliar (LNC >25 mg g⁻¹); Médio N- foliar: uma combinação de três espécies do tratamento Alto e três espécies do tratamento Baixo: cada tratamento recebeu duas espécies adubadeiras que foram implantadas em 2016 e 2018 e quatro espécies arbóreas. Após a implantação foram realizados manejos de adubação, podas, roçadas e desbastes no período de dezembro de 2016 a janeiro de 2020 em todo o experimento.

Cada parcela foi subdividida em faixas de acordo com o hábito de crescimento das plantas e ano de implantação (2016 e 2018). Ao centro de cada parcela, foi implantado uma faixa com árvores e para cada lado foram implantadas as faixas de adubadeiras (2016 e 2018) (Figura 1b). As espécies implantadas nas faixas adubadeiras foram: cana-de-açúcar (*Saccharum officinarum*

L.), capim elefante (*Pennisetum purpureum* Schumach.), feijão-guandu (*Cajanus cajan* (L.) Millsp.) e banana (*Musa paradisiaca* L.). Sendo que, no tratamento Baixo N foliar foram implantadas as espécies cana-de-açúcar e capim elefante. No tratamento Médio N foliar foram implantadas as espécies feijão-guandu e capim elefante. E no tratamento Alto N foliar foram implantadas as espécies feijão-guandu e banana. Fotos e croqui detalhado de cada tratamento estão disponíveis no Apêndice deste trabalho.

Coleta de dados

Biomassa: no período de abril a agosto de 2019 foi realizada a coleta dos tecidos vegetais (caule e folha) em um metro linear (aleatorizado na linha, desconsiderando 0,5 m da bordadura) para cada uma das espécies implantadas nas faixas adubadeiras. Os valores de biomassa de cada espécie foram utilizados como abundâncias nos cálculos dos índices da estrutura funcional. Para análise da relação C:N as amostras de biomassa foram homogêneas para formar uma amostra

para cada parte vegetal (folha e caule) por espécie por parcela. A secagem dos tecidos vegetais foi realizada em estufa com ventilação forçada de ar a 80°C, por 48 horas (Pérez–Harguindeguy *et al.* 2013).

Serapilheira: no período de janeiro a fevereiro de 2020, coletou-se todo material orgânico vegetal depositado no solo na área de 0,5 m x 0,5 m, em dois pontos (aleatorizados) por faixa de adubadeiras. Essas amostras simples foram homogeneizadas para formar uma amostra por parcela, totalizando 36 amostras compostas por ano de implantação da faixa. Para aleatorizar os pontos de coletas desconsiderou-se a borda de 0,5 m de cada parcela. A serapilheira coletada foi seca em estufa com ventilação (ar forçado) a 65° C, até peso constante (Lavorel *et al.* 2010).

Das amostras de serapilheira e biomassa foram retiradas alíquotas para trituração em moinho tipo Willey (malha 0,05 mm). Os conteúdos de carbono orgânico total (COT) e N total (NT)

foram determinados em analisador elementar de combustão seca (FlashEA 1112 Thermo Finnigan).

Determinação da estrutura funcional

Para determinação dos índices da estrutura funcional das parcelas agroflorestais, quatro atributos funcionais relacionados com as propriedades estruturais e qualidade do tecido vegetal foram coletados e medidos conforme protocolos padronizados de Pérez–Harguindeguy *et al.* (2013) (Tabela 1).

Apesar de termos delineado o experimento com tratamentos que variavam em diversidade funcional, os tratamentos (como variáveis preditoras categóricas) não foram usados na análise em si, mas preferimos utilizar variáveis contínuas de identidade funcional (médias ponderadas dos atributos pelas abundâncias) e diversidade funcional.

A identidade funcional foi medida pela

Tabela 1. Descrição dos atributos e métodos de mensuração. Os atributos foram mensurados a partir de plantas sadias em idade reprodutiva coletadas em ambientes bem iluminados, conforme os protocolos padronizados (Pérez–Harguindeguy *et al.* 2013).

Table 1. Traits description and measurement methods. The traits were measured from healthy, reproductive-age plants collected in well-lit environments, following standardized protocols (Pérez-Harguindeguy *et al.*, 2013).

Atributos (unidade de medida)	Réplicas^a	Descrição
Concentração de N Foliar (mg g ⁻¹)	5 (5)	Quantidade total de N por unidade de massa seca de folha. Está correlacionado com a taxa fotossintética da planta e com a qualidade nutricional para consumidores na cadeia alimentar
pH foliar	5 (5)	Medido moendo as folhas verdes e extraíndo o pH com água destilada. Pode ser um proxy para decomposição da serapilheira
Área foliar específica (mm ² mg ⁻¹)	5 (5)	Área de um dos lados da folha fresca, dividida por sua massa seca (à 70°C por 72h). Este atributo está relacionado positivamente com a taxa de crescimento relativo entre as espécies e negativamente com a longevidade das folhas.
Conteúdo de matéria seca (mg g ⁻¹)	5(5)	Massa das folhas secas (à 70°C por 72h), dividida pela massa dessas folhas saturadas em água. Serapilheira derivadas de folhas com alto conteúdo de matéria seca tende a decompor mais lentamente comparado às de baixo conteúdo. Em geral, tem uma correlação inversa com área foliar específica.

^a Número de indivíduos (plantas) amostrados. Valores entre parênteses referem ao número de órgãos mensurados por planta. As plantas foram coletadas dentro da área experimental ou nas suas proximidades no mesmo tipo de condições edafoclimáticas.

média dos valores dos atributos, ponderada pela abundância das espécies que fazem parte da comunidade (CWM – community weighted mean) (Mokany *et al.* 2008) usando o pacote FD (Laliberté *et al.* 2014) no software R (R Core Team 2022). Já a diversidade funcional (que mede a diversidade de valores de atributos funcionais) foi calculada pelo índice de Entropia Quadrática de Rao, que incorpora as abundâncias relativas das espécies (considerando a biomassa das espécies) e mede as diferenças funcionais aos pares entre as espécies (Botta-dukát, 2005). Para o cálculo da diversidade funcional, com valores entre 0 a 1, foi utilizado o pacote “Syncca” no R (Debastiani & Pillar 2012).

No total foram usados nove medidas para avaliar estrutura funcional das comunidades: um valor de Diversidade Funcional (DF) calculada considerando todos os quatro atributos conjuntamente; quatro outros valores de DF calculados a partir de cada um dos quatro atributos separadamente – “DF de pH”, “DF de LNC”, “DF de SLA” e “DF de LDMC”; e quatro valores de CWM (que mede a identidade funcional) sendo um para cada atributo funcional separadamente – “CWM de pH”, “CWM de LNC”, “CWM de SLA” e “CWM de LDMC”.

A abundância relativa foi representada pela proporção de biomassa de cada espécie em relação à faixa de cultivo. Os valores de biomassa em cada faixa foram medidos com amostragem sistemática, sorteando um ponto de coleta (1 m linear) em cada linha de cultivo. Nesse 1 m linear era coletada toda a biomassa para medição do conteúdo de matéria seca, conforme procedimento descrito por Pérez-Harguindeguy *et al.* (2013).

Análise dos dados

Para reduzir esse conjunto de medidas da estrutura funcional em um conjunto substancialmente menor, preservando o máximo de informações possível, realizamos uma Análise de Componentes Principais (PCA), utilizando o pacote “Vegan” no R (Oksanen *et al.* 2022). Para facilitar as interpretações práticas, a partir dessa análise os componentes foram correlacionados com os nove índices numa matriz de correlação de Pearson utilizando o pacote “Corrplot” no R (Wei & Simko 2021).

Para explicar as variáveis respostas (massa de serapilheira acumulada e relações C:N de

serapilheira acumulada, caule e folha na biomassa podada) os componentes principais foram usados como variáveis preditoras em modelos lineares mistos (blocos como efeitos aleatórios), usando o pacote “nlme” no R (Pinheiro *et al.* 2022). Para os gráficos foi utilizado o pacote “ggplot2” no R (Wickham 2016).

RESULTADOS

Dois componentes principais explicaram conjuntamente 79% da variação dos dados dos índices que mediam a estrutura funcional das comunidades (Figura 2a). O primeiro componente (PC1) foi relacionado forte e negativamente com os índices de diversidade funcional, enquanto o segundo (PC2) relacionado forte e positivamente com os índices de identidade funcional (CWM de pH, LNC e SLA, Figura 2b).

Nos modelos lineares, o componente relacionado às identidades funcionais (PC2) foi significativo para explicação de três variáveis respostas: relação C:N da serapilheira, da folha e do caule. Valores mais altos do componente PC2, relacionado às identidades funcionais dos atributos pH, LNC e SLA, estão relacionados com os menores valores das relações C:N analisadas (Figura 3a, 3b e 3d). Para a variável relação C:N da serapilheira o modelo melhor ajustado mostra que a relação observada foi independente do ano de coleta, por isso no gráfico ajustamos apenas uma reta apesar de diferenciarmos as cores para melhor visualização da não interação entre os fatores PC2 e coleta (Figura 3a).

Já o componente relacionado às diversidades funcionais foi significativo apenas para explicar a variação da relação C:N da folha, nos dados coletados em 2016, ou seja, no início da sucessão agroflorestal (Figura 3c). A variável massa de serapilheira não pôde ser explicada por nenhum dos dois componentes. Detalhes numéricos dos modelos ajustados podem ser encontrados na Tabela A1 no Apêndice deste trabalho.

DISCUSSÃO

A partir dos nossos resultados, constatamos que a identidade funcional (dominância de atributos) foi o componente mais importante a ser considerado se o objetivo for manejar a relação

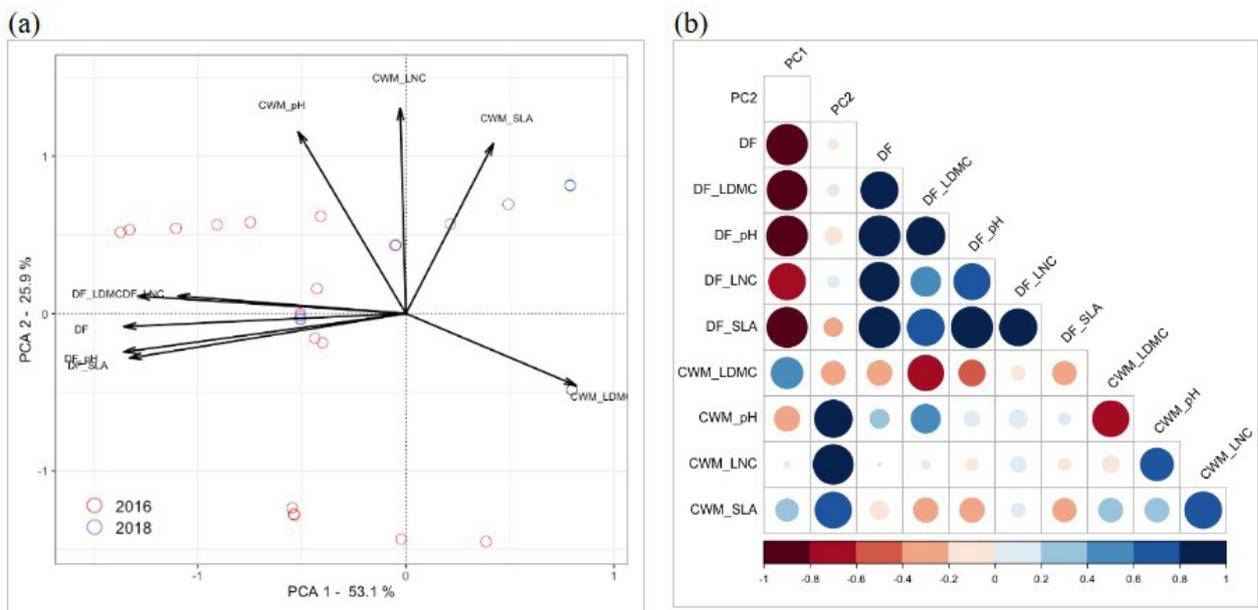


Figura 2. (a) Análise de componentes principais (PCA) com os dois primeiros componentes (PC1 e PC2). (b) Matriz de correlação de Pearson entre os componentes principais (PC1 e PC2) e as componentes da estrutura funcional dos sistemas agroflorestais. Nos dois painéis são apresentadas a diversidade funcional (calculada pelo índice de RAO) usando os quatro atributos conjuntamente (DF) e depois separadamente para cada um deles: pH (DF_pH), conteúdo de nitrogênio foliar (DF_LNC), área foliar específica (DF_SLA) e conteúdo de matéria seca foliar (DF_LDMC). A identidade funcional foi calculada usando a média ponderada pela abundância (CWM) e é apresentada separadamente para cada um dos quatro atributos.

Figure 2. (a) Principal Component Analysis (PCA) with the first two components (PC1 and PC2). (b) Pearson correlation matrix between the principal components (PC1 and PC2) and the components of the functional structure of agroforestry systems. Both panels present functional diversity (calculated by the RAO index) using the four traits (DF) and separately for each of them: pH (DF_pH), leaf nitrogen content (DF_LNC), specific leaf area (DF_SLA), and leaf dry matter content (DF_LDMC). Functional identity was calculated using the community-weighted mean (CWM) and is presented separately for each of the four traits.

C:N de serapilheira e biomassa em sistemas agroflorestais. Assim, comunidades agroflorestais dominadas por plantas de folhas maiores e com menor espessura (maior área foliar específica), com alto conteúdo de N foliar e de pH alto, apresentaram plantas com baixa relação C:N de folhas e caule e proporcionaram serapilheira com relação C:N baixa.

De fato, a hipótese da razão de massa propõe que a influência das espécies nas funções ecossistêmicas é proporcional a abundância das mesmas (Grime 1998). Assim, as características funcionais das espécies mais abundantes afetam os processos ecológicos associados aos serviços ecossistêmicos (Díaz *et al.* 2007, Tobner *et al.* 2016). Outros estudos também apontam que as propriedades do ecossistema foram principalmente impulsionadas pela identidade funcional (Conti & Díaz, 2013, Zuo *et al.* 2016). A hipótese da razão de massa e efeito

de complementariedade não são mutuamente exclusivos, e os dois podem atuar para o funcionamento do ecossistema (Mokany *et al.* 2008), mudando apenas a intensidade de atuação de cada um desses mecanismos ecológicos. Por exemplo, em uma pesquisa comparando os dois mecanismos na produção de biomassa, Cadotte (2017) verificaram que o efeito relacionado a hipótese de razão de massa foi maximizado em parcelas com baixa diversidade funcional e plantas mais altas (atributo funcional “altura vegetativa da planta”). De maneira oposta, o efeito de complementariedade foi maior em locais com alta diversidade funcional, levando em consideração múltiplos atributos, relacionados com a estrutura da planta, reprodução, atributos foliares e de raízes. Mas para qualquer um desses dois, a alta diversidade de espécies provê uma ampla variação de atributos (Garnier & Navas 2012, Loreau 2000).

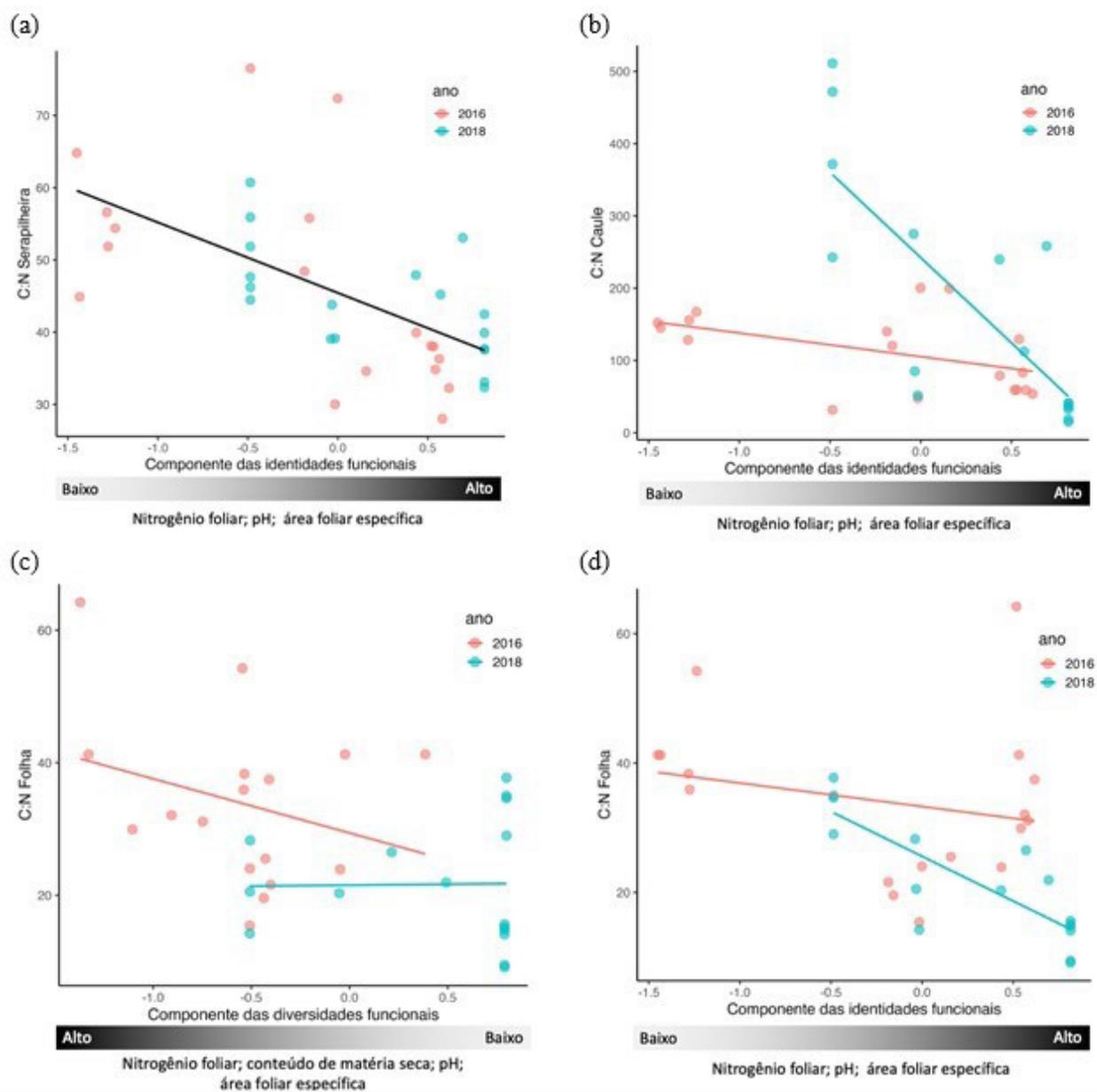


Figura 3 – Modelos lineares mistos ajustados para explicar a variação nas relações C:N da serapilheira (A), do caule (B) e da folha (C e D) das plantas cultivadas em sistemas agroflorestais a partir dos componentes principais 1 e 2 (*PC1, componente das diversidades funcionais e PC2, componente das identidades funcionais*), relacionados, respectivamente, às diversidades e identidades funcionais dos consórcios cultivados, conforme dois períodos de sucessão agroflorestal, ano de 2016 e 2018.

Figure 3. Mixed linear models fitted to explain the variation in litter (A), stem (B), and leaf (C and D) C:N ratios of crop plants in agroforestry systems based on the first and second principal components (*PC1, component of functional diversities, and PC2, component of functional identities*), respectively, related to the functional diversities and identities of the crop mixtures in two periods of agroforestry succession, 2016 and 2018.

Se por um lado, em um ecossistema natural, sob o efeito de seleção (relacionado à hipótese de razão de massa) a variação dos atributos atua somente como uma condição inicial, então o processo de seleção promove dominância por espécies com valores extremos de atributos (Loreau 2000). Por outro, em um agroecossistema,

o componente antrópico pode manejar as espécies de acordo com as prioridades estabelecidas. Desta forma, em um sistema agroflorestal estabelecido com alta diversidade funcional, por exemplo, pode se beneficiar inicialmente do efeito de complementariedade, otimizando o uso dos recursos pelas espécies. Mas posteriormente

pode ser manejada para manter somente espécies com determinadas características, como as de maior área foliar específica e alto conteúdo de N foliar, com o intuito de manter a dominância de espécie que vão proporcionar um serapilheira com baixa relação C:N.

Cortez *et al.* (2007) em seus estudos sobre as relações entre propriedades da serapilheira e características da comunidade de plantas, encontraram que comunidades com baixo conteúdo de nitrogênio foliar forneceram uma serapilheira pobre em N e que se decompõem mais lentamente. Uma alta concentração de N foliar (baixa C:N) está relacionado com altas qualidades nutricionais para consumidores na cadeia alimentar e assim como altos valores de pH, estão associados à maior velocidade de decomposição, pois favorecem a metabolização dos resíduos vegetais pelos invertebrados e microrganismos (Pérez-Harguindeguy *et al.* 2016). Portanto, a disponibilização acelerada de nutrientes para as culturas ou a permanência maior da palhada sobre o solo podem ser pautadas pela escolha de espécies com alta ou baixa concentração de N nos tecidos, respectivamente.

Assim, nossos resultados corroboram Santos *et al.* (2021a) e possibilitam recomendações práticas. Para o manejo por espécies, os atributos funcionais devem ser levados em consideração para planejar e manejar policultivos que visam a multifuncionalidade em agroecossistemas. Atributos foliares como o conteúdo de nitrogênio e área foliar específica são de fácil entendimento e avaliação por agricultores e/ou técnicos, portanto, muito úteis para pautar a escolha de espécies para otimizar a formação e permanência da serapilheira e assim proteger os solos e facilitar o manejo de plantas espontâneas em sistemas de produção agroecológicos. Por exemplo, ao planejarmos um sistema agroflorestal em um solo de baixa fertilidade, torna-se interessante uma rápida decomposição da biomassa para disponibilização rápida de nutrientes às culturas. Desta forma, o indicado é priorizar consórcios de espécies com folhas grandes e finas e alto teor de N foliar, desde que adaptadas às condições ambientais.

AGRADECIMENTOS

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pelo financiamento do experimento através da Chamada Universal de pesquisa Nº 409638/2016-1. Ao PROGRAMA UNIEDU/FUMDES PÓS-GRADUAÇÃO do governo do Estado de Santa Catarina pela concessão de bolsa de estudos. À Larissa A. Augusto, Marinice Teleginski, Djalma Roecker Jr., Renata R. Lucas, Jéssyca B. Borges, Uriel Cordeiro pela condução do experimento de longa duração e à Fazenda Experimental da Ressacada da UFSC pelo apoio. Ao Laboratório de Pesquisa em Biotransformação de Carbono e Nitrogênio (LABCEN) da Universidade Federal de Santa Maria, Rio Grande do Sul, Brasil pelas análises de Carbono e Nitrogênio.

REFERÊNCIAS

- Abbas, M., Ebeling, A., Oelmann, Y., Ptacnik, R., Roscher, C., Weigelt, A., Weisser, W. W., Wilcke, W. & Hillebrand, H. 2013. Biodiversity Effects on Plant Stoichiometry. *PLoS ONE* 8(3): e58179. DOI: 10.1371/journal.pone.0058179
- Alvares, C. A., Alcarde, Sapes, J. L., Sentelhas, P. C., Gonçalves, J. L. M., & Sparovek, G. 2013. Köppen's climate classification map for Brazil. *Meteorologische Zeitschrift*, 22(6), 711–728. DOI: 10.1127/0941–2948/2013/0507
- Botta-dukát, Z. 2005. Rao's quadratic entropy as a measure of functional diversity based on multiple traits. *Journal of Vegetation Science*, 16(5) 533–540. DOI: 10.1111/j.1654–1103.2005.tb02393.x
- Cadotte, M. W. 2017. Functional traits explain ecosystem function through opposing mechanisms. *Ecology Letters*, v. 20, n. 8, p. 989–996
- Conti, G. & Díaz, S. 2013. Plant functional diversity and carbon storage – an empirical test in semi-arid forest ecosystems. *Journal of Ecology*, 101(1) 18–28. DOI: 10.1111/1365–2745.12012
- Cornelissen, J. H. C., Sibma, F., S. P. Van Logtestijn, R. S.P., Broekman, R. A., & Thompson, K. 2011. Leaf pH as a plant trait: Species-driven rather than soil-driven variation. *Functional Ecology*. 25(3) 449–455. DOI: 10.1111/j.1365–2435.2010.01765.x

- Cortez, J., Garnier, E., Perez-Harguindeguy, N., Debussche, M. & Gillon, D. 2007. Plant traits, litter quality and decomposition in a Mediterranean old-field succession. *Plant and Soil*. 296(1)19–34. DOI: 10.1007/s11104-007-9285-6
- Debastiani, V. J. & Pillar, V. D. 2012. Syncca-R tool for analysis of metacommunities based on functional traits and phylogeny of the community components. *Bioinformatics*. 28(15) 2067–2068.
- Díaz, S., Hodgson, J.G., Thompson, K., Cabido, M., Cornelissen, J.H.C., Jalili, A., Montserrat-Martí, G., Grime, J.P., Zarrinkamar, F., Asri, Y., Band, S.R., Basconcelo, S., Castro-Díez, P., Funes, G., Hamzehee, B., Khoshnevi, M., Pérez-Harguindeguy, N., Pérez-Rantomé, M.C., Shirvany, F., Vendramini, F., Yazdani, S., Abbas-Azimi, R., Bogaard, A., Boustani, S., Charles, M., Dehghan, M., Torres-Espuny, L., Falczuk, V., Guerrero-Campo, J., Hynd, A., Jones, G., Kowsary, E., Kazemi-Saeed, F., Maestro-Martínez, M., Romo-Díez, A., Shaw, S., Siavash, B., Villar-Salvador, P., & Zak, M.R. 2004. The plant traits that drive ecosystems: Evidence from three continents. *Journal of Vegetation Science*. 15(3) 295. DOI: 10.1111/j.1654-1103.2004.tb02266.x
- Díaz, S., Lavorel, S., de Bello, F., Que´ tier, F., Grigulis, K. & Robson, T. M. 2007. Incorporating plant functional diversity effects in ecosystem service assessments. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*. 104(52) 20684–20689. DOI: 10.1073/pnas.0704716104
- Embrapa. 2004. Solos do Estado de Santa Catarina. – Rio de Janeiro : Embrapa Solos. Embrapa Solos. Boletim de Pesquisa e Desenvolvimento. 46: p.721
- Faucon, M. P., Houben, D. & Lambers, H. 2017. Plant Functional Traits: Soil and Ecosystem Services. *Trends in Plant Science*. 22(5) 385–394. DOI: 10.1016/j.tplants.2017.01.005
- Fischer, J. Abson, D. J., Butsic, V., Chappell, M. Jahi, Ekroos, J., Hanspach, J., Kuemmerle, T., Smith, H. G. & Wehrden, H. V. 2014. Land Sparing Versus Land Sharing: Moving Forward. *Conservation Letters*. 7(3) 149–157. 2014. DOI: 10.1111/conl.12084
- Foley, J.A., Ramankutty, N., Brauman, K.A., Cassidy, E.S., Gerber, J. S., Johnston, M., Mueller, N. D., O’Connell, C., Ray, D.K., West, P. C., Balzer, C., Bennett, E.M., Carpenter, S.R., Hill, J., Monfreda, C., Polasky, S., Rockstro, J., Sheehan, J., Siebert, S., Tilman, D. & Zaks, D.P.M. 2011. Solutions for a cultivated planet. *Nature*, 478(7369). 337–342. DOI: 10.1038/nature10452
- Garnier, E. & Navas, M. L. 2012. A trait-based approach to comparative functional plant ecology: Concepts, methods and applications for agroecology. A review. [s.l: s.n.]. *32Agron. Sustain. Dev.* 32:365–399. DOI: 10.1007/s13593-011-0036-y
- Grime, J.P. 1998. Benefits of plant diversity to ecosystems] immediate filter and founder effects. *Journal of Ecology* 86. 891–809. DOI: 10.1046/j.1365-2745.1998.00306.x
- Jose, S. 2009. Agroforestry for ecosystem services and environmental benefits: an overview. *Agroforest Syst.* 76, 1–10. DOI: 10.1007/s10457-009-9229-7
- Jose, S. 2012. Agroforestry for conserving and enhancing biodiversity. *Agroforest Syst* 85, 1–8. DOI: 10.1007/s10457-012-9517-5
- Laliberté, E., Legendre, P., & Shipley, B. 2014. FD: measuring functional diversity from multiple traits, and other tools for functional ecology. R package. 1.0–2
- Lavorel, S., Grigulis, K., Lamarque, P., Colace, M.P., Garden, D., Girel, J., Pellet, G. & Douzet, R. 2010. Using plant functional traits to understand the landscape distribution of multiple ecosystem services. 135–147
- Lavorel, S. & Garnier, E. 2002. Predicting changes in community composition and ecosystem functioning from plant traits: revisiting the Holy Grail. *Functional Ecology*. 16, 545–556. DOI: 10.1046/j.1365-2435.2002.00664.x
- Loreau, M. 2000. Biodiversity and ecosystem functioning: Recent theoretical advances. *Oikos*, v. 91, n. 1, p. 3–17. DOI: 10.1034/j.1600-0706.2000.910101.x
- Martin, A. R. & Isaac, M. E. 2018. Functional traits in agroecology: Advancing description and prediction in agroecosystems. *Journal of Applied Ecology*. 55(1). 5–11. DOI: 10.1111/1365-2664.13039
- Milcu, A., Roscher, C., Gessler, A., Bachmann, D., Gockele, A., Guderle, M., Landais, D., Piel, C., Escape, C., Devidal, S., Ravel, O., Buchmann,

- N., Gleixner, G., Hildebrandt, A. & Roy, J., 2014. Functional diversity of leaf nitrogen concentrations drives grassland carbon fluxes. *Ecology Letters*, 17(4), 435–444. DOI: 10.1111/ele.12243
- Mokany, K., Ash, J. & Roxburgh, S. 2008. Functional identity is more important than diversity in influencing ecosystem processes in a temperate native grassland. *Journal of Ecology*, [S. l.]. 96(5), 884–893. DOI: 10.1111/j.1365-2745.2008.01395.x
- Nair, P. K. R., Buresh, R.J., Mugend, D.N. & Latt, C.R. 1999. Nutrient cycling in tropical agroforestry systems: myths and science. In: BUCK, L.E.; LASSOIE, J.P. & FERNANDES, E. C. M. (Ed.). *Agroforestry in sustainable agricultural systems*. CRC Press ed. Washington. p. 31
- Oksanen, J., Simpson, G. L., Blanchet, F.G., Kindt, R., Legendre, P., Minchin, M. R., O'Hara, R.B., Solymos, P., Stevens, M. H., Szoecs, E., Wagner, E., Barbour, M., Bedward, M., Bolker, B., Borcard, D., Carvalho, G., Chirico, M., Caceres, M., Durand, S., Evangelista, Rich FitzJohn, R., Friendly, M., Furneaux, B., Hannigan, G., O. Hill, M., Lahti, L., McGlinn, Ouellette, M. H., Cunha, E. R., Smith, T., Stier, A., Ter Braak, C.F. & Weedon, J. 2022. *vegan: Community Ecology Package*. R package version 2.6–2.
- Pérez–Harguindeguy, N., Díaz, S., Garnier, E., Lavorel, S., Poorter, H., Jaureguiberry, P., Bret–Harte, M. S., Cornwell, W. K., Craine, J. M., Gurvich, D. E., Urcelay, C., Veneklaas, E. J., Reich, P. B., Poorter, L., Wright, I. J., Ray, P., Enrico, L., Pausas, J. G., Vos, A. C., Buchmann, N., Funes, G., Quétier, F., Hodgson, J. G., Thompson, K., Morgan, H. D., Steege, H., van der Heijden, M. G. A., Sack, L., Blonder, B., Poschlod, P., Vaieretti, M. V., Conti, G., Staver, A. C., Aquino, S. & Cornelissen, J. H. C. 2013. New handbook for standardised measurement of plant functional traits worldwide. *Australian Journal of Botany*. 61 (3), 167–234. DOI: 10.1071/BT12225_CO
- Pérez–Harguindeguy, N., Díaz, S., Garnier, E., Lavorel, S., Poorter, H., Jaureguiberry, P., Bret–Harte, M. S., Cornwell, W. K., Craine, J. M., Gurvich, D.E., Urcelay, C., Veneklaas, E. J. Reich, P. B., Poorter, L., Wright, I. J., Ray, P., Enrico, L., Pausas, J. G., Vos, A. C. de., Buchmann, N., Funes, G, Quétier, F., Hodgson, J. G., Thompson, K., Morgan, H. D., Steege, H. ter., Heijden, M. G. A. van der ., Sack, L., Blonder, B., Poschlod, P., Vaieretti, M. V., Conti, G., Staver, A. C., Aquino, S. & Cornelissen, J. H. C. 2016. Corrigendum to: New handbook for standardised measurement of plant functional traits worldwide. *Australian Journal of Botany*, 64(8), 715. DOI: 10.1071/BT12225_CO
- Pinheiro, J., & Bates, D. 2022. R Core Team. *nlme: Linear and Nonlinear Mixed Effects Models*. R package version 3.1–159.
- R Core Team. 2022. *R: A language and environment for statistical computing*. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria.
- Santos, D., Joner, F., Shipley, B., Teleginski, M., Lucas, R. R. & Siddique, Y. 2021a. Crop functional diversity drives multiple ecosystem functions during early agroforestry succession. *Journal of Applied Ecology*, 58(8), 1718–1727. DOI: 10.1111/1365-2664.13930
- Santos, F. M., Terra, G., Piotto, D. & Chaer, G. M. 2021b. Recovering ecosystem functions through the management of regenerating community in agroforestry and plantations with *Khaya* spp. in the Atlantic Forest, Brazil. *Forest Ecology and Management*, 482, 118854. DOI: 10.1016/j.foreco.2020.118854
- Siddique, I., Monteiro, A., Aquino, J. & Teleginski, M. 2019. Sistema de plantio direto de hortaliças em sucessão agroflorestal: recuperação produtiva de diversos benefícios socioeconômicos e ambientais. In: Fayad, J.A. et al. (Eds). *Sistema de plantio direto de hortaliças: método de transição para um novo modo de produção*. Expressão ed. São Paulo: p. 428.
- Tobner, C. M., Paquette, A., Gravel, D., Reich, P. B., Williams, L. J. & Messier, C. 2016. Functional identity is the main driver of diversity effects in young tree communities. *Ecology Letters*, 19(6), p. 638–647. DOI: 10.1111/ele.12600
- Wei, T. & Simko, V. 2021. R package 'corrplot': Visualization of a Correlation Matrix (Version 0.92).
- Wickham, H. 2016. *Ggplot2: Elegant Graphics for Data Analysis*. New York: Springer–Verlag: p.182
- Wood, S. A., Karp, D.S., Clerck, F., Kremen, C., Naeem, S. & Palm, C.A. 2015. Functional traits in agriculture: Agrobiodiversity and ecosystem services. *Trends in Ecology and Evolution*, 30(9), p. 531–539. DOI: 10.1016/j.tree.2015.06.013
- Young, K. J. 2017. Mimicking Nature: A Review

of Successional Agroforestry Systems as an Analogue to Natural Regeneration of Secondary Forest Stands. In: Integrating Landscapes: Agroforestry for Biodiversity. [s.l.] Switzerland:Springer, 179–209. DOI: 10.1007/978-3-319-69371-2_8

Zuo, X., Zhou, X., Lv, P., Zhao, X., Zhang, J., Wang, S., & Yue, X. 2016 Testing associations of plant functional diversity with carbon and nitrogen storage along a restoration gradient of sandy grassland. *Frontiers in Plant Science*, 7, 1–11. DOI: 10.3389/fpls.2016.00189

Table A1. Statistical summary of the linear-mixed models fitted to explain the variation in litter, stem, and leaf C:N ratios of crops in agroforestry systems based on the first and second principal components (PC1 and PC2), respectively, related to the functional diversities and identities of the crop mixture in two periods of agroforestry succession, 2016 and 2018.

Submitted: 9 June 2022

Accepted: 21 June 2023

Published online: 02 August 2023

Associate Editor: Bianca Ott Andrade

MATERIAL SUPPLEMENTAR

Apêndice

Figura A1. Croqui (a) e foto (b) do tratamento Baixo N Foliar. Fonte: Ilyas Siddique e Djalma Roecker Jr. (2018). Foto: Uriel Cordeiro (2019).

Figure A1. Sketch (a) and photo (b) of the Low Leaf N treatment. Source: Ilyas Siddique and Djalma Roecker Jr. (2018). Photo: Uriel Cordeiro (2019).

Figura A2. Croqui (a) e foto (b) do tratamento Médio N Foliar. Fonte: Ilyas Siddique e Djalma Roecker Jr. (2018). Foto: Larissa Aparecida Augusto (2019).

Figure A2. Sketch (a) and photo (b) of the Medium Leaf N treatment. Source: Ilyas Siddique and Djalma Roecker Jr. (2018). Photo: Larissa Aparecida Augusto (2019).

Figura A3. Croqui (a) e foto (b) do tratamento Alto N Foliar. Fonte: Ilyas Siddique e Djalma Roecker Jr. (2018). Foto: Vinicius Cauê (2019).

Figure A3. Sketch (a) and photo (b) of the Low Leaf N treatment. Source: Ilyas Siddique and Djalma Roecker Jr. (2018). Photo: Vinicius Cauê (2019).

Tabela A1. Resumo estatístico dos modelos lineares mistos ajustados para explicar a variação nas relações C:N da serapilheira, do caule e da folha das plantas cultivadas em sistemas agroflorestais a partir dos componentes principais 1 e 2 (PC1 e PC2), relacionados, respectivamente, às diversidades e identidades funcionais dos consórcios cultivados, conforme dois períodos de sucessão agroflorestal, ano de 2016 e 2018.