



UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
CENTRO DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM AGROECOSSISTEMAS

Jéssyca Barroso Borges

**Efeitos da Identidade e Diversidade Funcionais sobre o Acúmulo de
Serrapilheira e a Respiração Basal em um Agroecossistema no Sul do Brasil**

FLORIANÓPOLIS

2019

Jéssyca Barroso Borges

Efeitos da Identidade e Diversidade Funcionais sobre o Acúmulo de Serrapilheira e a Respiração Basal em um Agroecossistema no Sul do Brasil

Dissertação submetido(a) ao Programa de Pós-Graduação em Agroecossistemas da Universidade Federal de Santa Catarina para a obtenção do título de mestrado em agroecossistemas.

Orientador: Prof. Dr. Ilyas Siddique

Coorientador: Prof. Dr. Fernando Joner

Florianópolis

2019

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor,
através do Programa de Geração Automática da Biblioteca Universitária da UFSC.

Borges, Jéssyca

Efeitos da Identidade e Diversidade Funcionais sobre o Acúmulo de Serrapilheira e a Respiração Basal em um Agroecossistema no Sul do Brasil / Jéssyca Borges ; orientador, Ilyas Siddique, coorientador, Fernando Joner, 2019.

98 p.

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Santa Catarina, Centro de Ciências Agrárias, Programa de Pós Graduação em Agroecossistemas, Florianópolis, 2019.

Inclui referências.

1. Agroecossistemas. 2. Sistemas Agroflorestais. 3. Ecologia de atributos. 4. Respiração basal. 5. Acúmulo de serrapilheira. I. Siddique, Ilyas . II. Joner, Fernando. III. Universidade Federal de Santa Catarina. Programa de Pós-Graduação em Agroecossistemas. IV. Título.

Jéssyca Barroso Borges

Efeitos da Identidade e Diversidade Funcionais sobre o Acúmulo de Serrapilheira e a Respiração Basal em um Agroecossistema no Sul do Brasil

O presente trabalho em nível de mestrado foi avaliado e aprovado por banca examinadora composta pelos seguintes membros:

Prof. Titular Interno/ENR/PGA/UFSC Dr. Cledimar Rogério Lourenzi

Universidade Federal de Santa Catarina

Prof. Titular Externo/Pós-Doc Ecologia/UFSC Dr. Eduardo Luís Hettwer Giehl

Universidade Federal de Santa Catarina

Prof. Presidente/Orientador Dr. Ilyas Siddique

Universidade Federal de Santa Catarina

Certificamos que esta é a **versão original e final** do trabalho de conclusão que foi julgado adequado para obtenção do título de mestre em Agroecossistemas.

Prof. Dr. Arcângelo Loss
Coordenador(a) do Programa

Prof. Dr. Ilyas Siddique
Orientador(a)

Florianópolis, 19 de agosto de 2019.

*À incrível manifestação transdimensional da vida na Terra,
À Alquimista da Terra, carinhosamente
Dedico.*

AGRADECIMENTOS

A gratidão inicia-se no cerne de cada ser. É o maior princípio do reconhecimento. Não é moeda de troca, é gentileza, por meio dela nasce o exercício dos valores humanos. Tecer a gratidão é uma tarefa que requer destreza. As vidas se entrelaçam amorosamente com outras vidas nas jornadas de oportunidade, crescimento, aprendizado, amadurecimento, desenvolvimento e autoconhecimento. Saber reconhecer o valor desses caminhos na prática da auto reforma é uma maneira de agradecer às Forças Superiores que nos iluminam. Sou extremamente grata às Divinas(os) Mestras(es) pela força e luz.

Por todos os ensinamentos, apoio e inspiração na jornada da vida, agradeço profundamente à irmã Catherine Eleanor Rose e à Alquimista da Terra que enriquecem o meu existir e fortalecem meu caminhar.

Aos passos acadêmicos trilhados, devo meus eternos agradecimentos aos professores Vlândia Correchel e Leonardo Santos Collier atuantes atualmente no Departamento de Solos da Universidade Federal de Goiás por todo conhecimento oferecido, por acreditar em meu potencial e proporcionar desafios promissores em minha jornada.

Aos professores Fernando Joner e Ilyas Siddique atuantes do Departamento de Fitotecnia da Universidade Federal de Santa Catarina por aceitarem minha participação no presente trabalho e me orientarem na construção do mesmo, sempre dispostos a ajudar a enfrentar todas as dificuldades encontradas no caminho. Agradeço a paciência, dedicação e todo conhecimento ofertado.

Aos companheiros de trabalho da equipe do Laboratório de Ecologia Aplicada (LEAP): Renata Lucas, Álvaro Monteiro e Marinice Teleginski pela coleta e mensuração dos atributos funcionais e ajuda no manejo do experimento, em especial à Marinice, pelo fornecimento dos dados de biomassa das plantas cultivadas; Uriel Cordeiro e Gabriel Medeiros pela ajuda no manejo do SAF experimental e, ao querido Diego Santos por somar nas atividades de manejo, manutenção do experimento, coleta de atributos, tratamento e compartilhamento de dados e troca de saberes que permitiram e fortaleceram o nascimento e a conclusão do presente trabalho.

À estudante de agronomia Carolina e ao professor Rubens por fornecerem o equipamento IRGA, fundamental para as medições do presente trabalho, bem como por todo conhecimento operacional e teórico ofertado à cerca do mesmo.

À amiga Carla Cosmy por me emprestar o computador durante meses para concretizar essa dissertação, já que não possuo um, sem isso a construção do presente trabalho seria extremamente dificultada.

À CAPES pela bolsa de estudos sem a qual não seria possível a realização dessa vivência acadêmica e ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pelo financiamento do experimento através da Chamada Universal de pesquisa Nº 409638/2016-1.

Aos trabalhadores da fazenda Ressaca por todo auxílio logístico e operacional, em especial ao Marcelo Venturi. Aos diversos fornecedores de germoplasma que muito colaboraram com o andamento do experimento.

Por fim, agradeço a todos aqueles que diretamente ou indiretamente apoiaram, colaboraram, ofereceram ideias e motivaram a jornada da pesquisa.

*Carbono,
Está na vida, em mim, em você, no ar, na água, no fogo
Nos corpos orgânicos, na respiração
Estamos rodeados de carbono, por dentro, por fora
Está por todo lado, pequenino funcional
Sutilmente dançando, transforma-se continuamente
Ciclo de energia que ecoa na ciranda do existir
Rítmica essencial do processo vital
Variadas ramificações emergentes
Na magia da retroalimentação
Em toda diversidade, microquimicamente
É fonte ancestral.
Filha do carbono,
Dura... e duro
Versátil, acrescenta
Requinte, beleza,
Sucinto, avante.
Pele, grafite, diamante.*

J. B. Borges (2018)

RESUMO

Na busca de delineamentos de plantio de máxima eficiência no aproveitamento dos processos vitais, a realização de pesquisas que integrem informações provenientes da ecologia funcional aplicadas ao planejamento de sistemas agroflorestais mais eficientes em termos de produção com sustentabilidade e geração de serviços ecossistêmicos revela-se interessante. Nesse sentido o objetivo do presente trabalho foi avaliar como o uso de policultivos com diferentes composições funcionais em Sistemas Agroflorestais (SAFs) influenciam o acúmulo de serrapilheira e a respiração basal. A hipótese é que SAFs cultivados em consórcios com plantas com diferentes hábitos de crescimento de alto e de baixo N foliar (diferentes composições funcionais), propiciam maior produção de biomassa com efeitos no acúmulo de serrapilheira e na respiração basal. O SAF sucessional experimental está localizado na Fazenda Experimental da Ressacada da UFSC, em Florianópolis, SC. Este foi planejado de forma a manter constante a riqueza de espécies com o intuito de testar os efeitos da diversidade funcional, independente dos efeitos de riqueza taxonômica. Foram realizadas duas coletas de serrapilheira (em maio e em setembro de 2017) e uma coleta de respiração basal (em junho de 2018). A serrapilheira foi coletada em quadros de diferentes dimensões de acordo com a ocupação das espécies na área, secada em estufa e pesada, e o efluxo de CO₂ foi medido em campo com auxílio de um analisador de gás infravermelho. Foram medidos os atributos: área foliar, área foliar específica, nitrogênio foliar, pH da folha, altura da planta, densidade do caule e conteúdo de matéria seca da folha, os quais foram integrados com dados de produção de biomassa e cotas microtopográficas e analisados por meio de modelos mistos. Foi detectado efeito da biomassa das plantas cultivadas, do teor de N foliar, do conteúdo de matéria seca da folha, do pH e da altura das plantas na massa acumulada de serrapilheira, e, da densidade do caule e do teor de N foliar na respiração basal. Também foram explicitadas influências do acúmulo de serrapilheira no efluxo de CO₂ do solo. Os resultados permitem inferir que combinar espécies com alto teor N foliar e baixos valores de conteúdo de matéria da folha, pH e altura refletem maior massa acumulada de serrapilheira a curto-prazo. Enquanto combinar espécies de maior densidade do caule e alto N foliar estabelecem condições para maiores taxas de

respiração basal. Essas repercussões são bons indícios para o manejo de processos ecológicos, de forma que muitas são as possibilidades de arranjos funcionais a serem empregados em SAFs, dependendo das condições ambientais vivenciadas e das intenções de manejo. Constatou-se que em um estágio inicial de desenvolvimento, a composição funcional (identidade) do SAF tem maior impacto no acúmulo de serrapilheira e na respiração do solo que a diversidade de atributos presentes, onde o teor de N foliar ganhou destaque, mostrando-se como atributo de maior impacto nos processos ecossistêmicos avaliados.

Palavras- chave: N foliar, atributos funcionais, massa acumulada de serrapilheira, respiração basal.

ABSTRACT

In the search for planting designs of maximum efficiency in the use of vital processes, research that integrates information from functional ecology applied to the planning of agroforestry systems more efficient in terms of production with sustainability and generation of ecosystem services proves to be interesting. In this sense, the objective of the present study was to evaluate how the use of polycultures with different functional compositions in Agroforestry Systems (SAFs) influence litter accumulation and soil respiration. My hypothesis was that SAFs that intercrop high and low leaf N plants (high functional diversity), will provide greater biomass production with effects on litter accumulation and soil respiration. The experimental SAF is located at Ressacada Experimental Farm of UFSC, in Florianópolis, SC, subtropical Southern Brazil. In order to test the effects of functional diversity independent of taxonomic diversity, species richness was maintained constant across all treatments. The litter layer was sampled at the end of summer (in May) and at the end of winter (September) of 2017 and a CO₂ efflux was measured in situ in early winter (June 2018). The litter was collected in a quadrat of different sizes corresponding to the area occupied by each crop species. Litter samples were dried in a drying oven and weighed, and in situ CO₂ efflux was measured in the field with the aid of a portable infrared gas analyzer (IRGA). The crop functional traits measured were: leaf area, specific leaf area, leaf nitrogen, leaf pH, plant height, stem density and dry matter content of the leaf, which were integrated with biomass production data and microtopographic altitude and analyzed using mixed effect models. I detected effects of biomass of cultivated plants, community-weighted mean leaf N content, leaf dry matter content, leaf pH and maximum plant height on the accumulated litter layer mass, stem density and leaf N concentration on soil basal respiration. Influences of litter accumulation on the efflux of CO₂ from the soil were also significant. The results allow to infer that combining species with high leaf N content and low values of leaf matter content, pH and height reflect greater accumulated litter layer mass in the short term. While combining species of higher stem density and high leaf N establish conditions for higher rates of soil basal respiration. These effects are good indications for the management of ecological processes, so that the possibilities of functional arrangements to be used in SAFs are many, depending on the environmental conditions experienced and the intentions of

management. I found that in an initial stage of development, the functional composition (functional identity) of the SAF has a greater impact on litter accumulation and soil respiration than trait diversity, where leaf N content was highlighted, showing as a trait of greater impact on the ecosystem processes analyzed here.

Key-words: leaf N concentration, crop functional traits, accumulated litter mass, basal respiration, soil cover.

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	15
2. REFERENCIAL TEÓRICO.....	18
2.1. DIVERSIDADE: O MOTOR DOS SISTEMAS VIVOS.....	18
2.1.1. Diversidade e sustentabilidade	18
2.1.2. Biodiversidade: diferenças co-criadoras	21
2.2. DIVERSIDADE FUNCIONAL.....	22
2.2.1. Atributos funcionais	23
2.3. MÉTRICAS: QUANTIFICANDO AS DIFERENÇAS.....	27
2.3.1. Aplicações	31
2.4. SISTEMAS AGROFLORESTAIS (SAFS).....	31
2.5. SERRAPILHEIRA: O MOTOR DOS SAFS.....	34
2.6. O SOLO.....	35
2.6.1. Solo: sustentação da vida	35
2.6.2 Compartimentos de carbono na Terra	36
2.6.3. Fluxo de carbono e respiração do solo	37
2.7. BIODIVERSIDADE E MULTIFUNCIONALIDADE: ECOLOGIA APLICADA.....	41
3. OBJETIVOS.....	43
3.1. GERAL.....	43
3.2. ESPECÍFICOS.....	43
4. HIPÓTESE.....	44
5. METODOLOGIA.....	44
5.1. CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO.....	44
5.2. DELINEAMENTO DO EXPERIMENTO.....	45
5.3. COLETA DE DADOS E PROCEDIMENTOS DE ANÁLISE.....	48
5.4. QUANTIFICAÇÃO DA IDENTIDADE E DIVERSIDADE FUNCIONAIS.....	52
5.5. CONSIDERAÇÕES IMPORTANTES.....	53
5.6. ANÁLISES ESTATÍSTICAS.....	55
5.6.1. Modelos mistos testados	56
6. RESULTADOS.....	58
6.1. MASSA DE SERRAPILHEIRA ACUMULADA.....	59
6.1.1. Efeito dos tratamentos e hábitos de crescimento	61
6.1.2. Efeito dos atributos funcionais	62
6.1.3. Efeitos da diversidade funcional	65
6.2. RESPIRAÇÃO BASAL.....	66
6.2.1. Efeito dos hábitos de crescimento e tratamentos	68

6.2.2. Efeito dos atributos funcionais	69
6.2.3. Efeitos da diversidade funcional	70
7. DISCUSSÃO	71
7.1 EFEITO DOS TRATAMENTOS.....	72
7.2. EFEITO DOS HÁBITOS DE CRESCIMENTO	74
7.3. EFEITOS DA COMPOSIÇÃO FUNCIONAL	76
7.4. EFEITOS DA DIVERSIDADE FUNCIONAL.....	78
7.5. EFEITO DA MASSA ACUMULADA DE SERRAPILHEIRA NA RESPIRAÇÃO DO SOLO.....	78
8. CONCLUSÃO.....	79
9. CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	80

EFEITOS DA IDENTIDADE E DIVERSIDADE FUNCIONAIS SOBRE O ACÚMULO DE SERRAPILHEIRA E A RESPIRAÇÃO BASAL EM UM AGROECOSSISTEMA NO SUL DO BRASIL

1. INTRODUÇÃO

Atualmente a maior vulnerabilidade da sociedade humana diante dos riscos ambientais impõe a necessidade de ir além do estabelecimento de cenários e meios de mitigação, tornando-se necessário buscar a sustentabilidade em seu sentido mais amplo. O momento requer a construção de resiliências, a partir de esforços de adaptação proativa aos ritmos do clima e as condições do meio ecológico. É preciso estimular o uso de inovações verdes e sociais no desenvolvimento de estratégias adaptativas mais harmoniosas para o convívio com os ecossistemas, em todos os campos da atividade humana, sejam elas sociais, econômicas, culturais, políticas ou tecnológicas.

No âmbito ecológico, nota-se a crescente demanda por informações capazes de fundamentar sistemas produtivos mais sustentáveis, já que a produção convencional de alimentos e matéria-prima vem, cada vez mais, se mostrando ecologicamente ineficiente com sérias consequências destrutivas ao ambiente e à vida que o habita, como a fragmentação florestal, perda de diversidade, comprometimento dos ciclos da água e do carbono, desencadeamento de processos erosivos com conseqüente assoreamento de rios e nascentes, empobrecimento genético, compactação dos solos, queimadas, contaminação por agrotóxicos das águas, dos alimentos e de seus consumidores, dentre outros impactos que elucidam os limites ecológicos da exploração desordenada dos recursos naturais alertados por vários setores da sociedade (Medeiros, 1998).

A busca pela soberania alimentar, autonomia e eficiência na produção baseada em processos ecológicos demanda práticas sinérgicas que incrementem a resiliência dos sistemas produtivos e fortaleçam suas multifuncionalidades, envolvem o entendimento da complexidade da capacidade de auto adaptação dos sistemas vivos e suas correlações (Levin, 1998). Nesse sentido, o estudo dos sistemas produtivos sob a concepção dos agroecossistemas – ecossistemas “domesticados”, reorganizados por humanos para o propósito da agricultura (Worster, 1990) – traz inovações na pesquisa científica e propicia uma gama de perspectivas quanto ao

uso racional e sustentável dos recursos naturais. Tal concepção aponta para a necessidade de compreensão da estrutura e funcionamento dos ecossistemas a fim de alcançar uma produção de alimentos e matérias-primas mais compatível com demandas presentes e futuras (Conway, 1986), respeitando os processos ecológicos e a vida gerada por eles e que também os gera.

O bom funcionamento dos agroecossistemas para o eficiente sustento da população humana impõe cuidado no planejamento de sistemas integrados, de modo a desenhá-los junto a estudos de composições florísticas que possibilitem a geração de informações impulsionadoras da formação de sistemas capazes de cumprir mais funções e serviços ecossistêmicos (Sanserson *et al.* 2013). Além disso, o planejamento da produtividade tem grande importância na garantia da segurança alimentar da população global (Foley *et al.*, 2011).

Os diversos tipos de Sistemas Agroflorestais (SAFs) vêm ganhando espaço como estratégia capaz de conciliar produção e conservação ambiental (Neto *et al.*, 2016; Nair, 1993). Muitas são as definições adotadas para os SAFs, as quais evoluíram de um conceito nitidamente agrícola para conceitos que cada vez mais incorporaram fatores ambientais, sociais e econômicos (Barisoux, 2017). Basicamente, trata-se do uso de conceitos e teorias ecológicas na integração de diferentes espécies tanto no espaço quanto no tempo, incluindo componentes cultivados perenes e/ou anuais e lenhosos coexistindo nas mesmas unidades de manejo (Vandermeer & Perfecto, 2007). Para D'Agostini *et al.* (2007) “*Sistemas Agroflorestais* é um sistema de muitas ideias-componentes sobre como produzir com uma mesma preocupação: diminuir a degradação do meio para poder produzir por muito mais tempo. Também se pode dizer que Sistemas Agroflorestais é um sistema de ideias para se produzir um pouco menos em quantidade, mas produzir melhor em regularidade”. Isso se dá pelo respeito à biodiversidade com combinações estratégicas de seus componentes baseadas em constantes observações. A ecologia funcional é uma ferramenta eficaz que permite compreender tais combinações para o planejamento e manejo de SAFs eficientes.

Essa forma de produção preza pela qualidade e saúde dos solos, principalmente se tratando dos SAFs agroecológicos, caracterizados pela reprodução de padrões vistos na natureza, uso de muitas espécies, baixa dependência de insumos externos e geração de serviços ecossistêmicos (Miller, 2009). A principal fonte de alimento da fauna e microbiota edáficas, principalmente

em solos jovens e arenosos, é a serapilheira. Sua produção representa o primeiro estágio de transferência de nutrientes e energia para o solo (Carpanezzi, 1997), a qual, além de desempenhar um papel essencial no crescimento e desenvolvimento das plantas (Garay *et al.*, 2001), permite a existência de uma grande variedade de nichos para mesofauna e microbiota edáfica (Santos, 1989). Ainda segundo Santos (1989), a serapilheira acumulada exerce funções de isolamento térmico e de retenção de água atenuando efeitos erosivos. As folhas da serapilheira são responsáveis pelo retorno da maior quantidade de nutrientes ao solo, contribuição a qual se deve muito mais às quantidades de folhas depositadas do que aos teores dos elementos nelas presentes. Os teores de N e P, por exemplo, são superiores na fração miscelânea que, entretanto, representa uma porção pequena da serapilheira (7 a 25% do peso) (Wisniewski *et al.*, 1997).

No sistema agroflorestal agroecológico a produção é baseada em processos ecossistêmicos associados à observação dos ciclos biogeoquímicos, como os ciclos do carbono, nitrogênio e fósforo, o que, potencialmente, permite a redução no uso de insumos industriais. O objetivo é aproveitar e cooperar de forma inteligente os processos vitais, como a combinação complementar de diferentes estratégias adaptativas (diferentes ecologias funcionais vegetais), buscando sempre o enriquecimento da microbiologia do solo (Steenbock & Vezzani, 2013). Logo, a compreensão dos processos ecológicos envolvidos nos SAFs e sua dinâmica é de extrema importância e a visão da ecologia funcional pode ser de grande auxílio. Vincular essas informações à performance da vida no solo, o meio que sustenta a vida terrestre, e na produção da serrapilheira, que o alimenta, contribui para arquitetar sistemas de produção mais eficazes nos âmbitos ecológico e produtivo.

Nesse sentido a ecologia baseada em atributos (ecologia funcional) vem se mostrando como uma intérprete eficiente a nível de sistemas (metapopulações, comunidades, ecossistemas etc). Por meio desse olhar, o papel da riqueza de espécies não é avaliado isoladamente pois são consideradas as relações entre as funções dos organismos e os processos ambientais, oferecendo maior abrangência que as abordagens tradicionais não só na biologia da conservação, como também em planejamentos produtivos e estudos preditivos (Cadotte *et al.*, 2011; Reich, 2014). Pela visão da ecologia funcional as diferenças e semelhanças entre os organismos são estimadas diretamente a partir de características funcionais relacionadas com os processos ecossistêmicos em questão, onde a diversidade de

traços funcionais que influenciam os processos da comunidade é mensurada independentemente da filogenia dos organismos. Lacunas nas investigações acerca do funcionamento dos ecossistemas podem ser supridas por essa ferramenta, contando com métricas mais robustas quando comparadas às medidas tradicionais de diversidade comumente utilizadas no planejamento de sistemas produtivos (Cadotte *et al.*, 2011; Reich, 2014).

A realização de pesquisas que integrem essas informações revela-se interessante na busca de delineamentos de plantio de máxima eficiência no aproveitamento dos processos vitais para alcançar uma boa produtividade com sustentabilidade e geração de serviços ecossistêmicos.

Por fim, mais que contribuir para arquitetar sistemas de produção com desenhos de consórcios e regras de manejo baseados na ecologia funcional, a abordagem do presente trabalho trata de repensar a postura dos humanos frente ao ambiente que habita e apontar conceitos fundamentais e propostas metodológicas que possibilitem a elaboração de SAFs mais sustentáveis. “O produto final necessário a uma agricultura ecológica é um ser humano consciente, com atitudes de coexistência e não de exploração para com a natureza” (Altieri, 1983).

No âmbito científico, como uma contribuição na construção desse conhecimento, busca-se apresentar algumas evidências do efeito da diversidade funcional de plantas cultivadas na massa de serapilheira acumulada atrelada à respiração do solo em um SAF sucessional.

2. REFERENCIAL TEÓRICO

2.1. DIVERSIDADE: O MOTOR DOS SISTEMAS VIVOS

2.1.1. Diversidade e sustentabilidade

No Relatório Brundtland, publicado no documento intitulado Nosso Futuro Comum, em 1987, a noção de sustentabilidade estava associada ao desenvolvimento e pouco atenta a co-evolução humana com a biodiversidade. Entre os principais conceitos organizados no Relatório, o de Desenvolvimento Sustentável era entendido como um processo que “satisfaz as necessidades presentes, sem comprometer a capacidade das gerações futuras de suprir suas próprias necessidades”. Pouco entendimento se tinha sobre outras dimensões necessárias

para a sustentabilidade, muito além da noção de desenvolvimento, envolvendo as sociedades humanas e a evolução da vida.

A busca pela sustentabilidade retrata a preocupação com os problemas ambientais e o estabelecimento de relações harmoniosas entre os povos com o ambiente, ressaltando a necessidade de se garantir qualidade de vida às futuras gerações. Conforme o Relatório Brundtland (1987), a busca pela sustentabilidade apoia-se nos pilares econômico, social, ambiental e cultural, devendo ser economicamente viável, socialmente justo, culturalmente aceito e com garantia da integridade e preservação ambiental, com menor impacto possível, não prejudicando o equilíbrio, a homeostase e a resiliência dos ecossistemas. Porém, o que fazer para alcançar a sustentabilidade? O que pode delinear a sustentabilidade?

Para tornar a sustentabilidade efetiva é necessário assimilar essa ideia como um processo contínuo de aperfeiçoamento, que se auto-organiza, similar ao que ocorre nos ecossistemas e na natureza. Para Fritjof Capra (2002), sustentável não se refere apenas ao tipo de interação humana com o mundo que preserva ou conserva o meio ambiente para não comprometer os recursos naturais das gerações futuras, ou que visa unicamente manutenção prolongada de entes ou processos econômicos, sociais, culturais, políticos ou institucionais.

O processo de busca pela sustentabilidade torna-se harmônico se resultante de um padrão de organização complexo, indissociável, de cinco características intrínsecas aos ecossistemas (Capra, 2002): (1) Interdependência: todos os membros de uma comunidade ecológica possuem interdependência, estão interligados numa vasta e intrincada rede de relações, a teia da vida; (2) Reciclagem: os laços de realimentação garantem a reciclagem dos ecossistemas, são as vias ao longo das quais, matéria e energia ordenadas são continuamente recicladas; (3) Parceria: num ecossistema existem múltiplas parcerias, os intercâmbios cíclicos de energia e de recursos são sustentados por uma cooperação generalizada; (4) Flexibilidade: múltiplos laços de realimentação conferem flexibilidade ao ecossistema, que tendem a leva-lo de volta ao equilíbrio sempre que houver um desvio; e (5) Diversidade: é a diversidade de um ecossistema que o torna flexível, pois contém muitas espécies com funções ecológicas sobrepostas que podem, parcialmente, substituir umas às outras.

A diversidade e suas relações têm se mostrado como indicadores promissoras da sustentabilidade em diversos âmbitos (Gell-mann, 1996; Prigogine,

1996; Viana, 2008), como no funcionamento de eco e agroecossistemas (Smith & Smith, 2009; Götsch, 1996 e 1997) e nas relações sociais humanas e com o ambiente (D'Agostini & Cunha, 2007). Sheldrake (1991) dialoga acerca da importância do olhar sistêmico no entendimento e na vivência da sustentabilidade, com destaque para o respeito à biodiversidade e sua auto-organização, colocando a ecologia como um modo de ser, e não apenas fazer, com compreensão e respeito à diversidade e sinergia. Leff (2003), Little (2006), Muniz (2009) e Porto-Gonçalves (2012) discutem a respeito da ação necessária para vivenciar esse modo de ser por meio da prática da ecologia política.

Assim, do ponto de vista do respeito a todas as formas de vida (diversidade), a sustentabilidade é um valor que retrata nossa responsabilidade social e individual por todas as criaturas vivas, envolvendo princípios de ética e aspectos culturais (Oliveira & Viana, 2009). Nesse sentido, a Agroecologia (Gliessman, 2008) e a Permacultura (Mollison & Holmgren, 1983; Holmgren, 2013) se mostram como estratégias adaptativas eficazes na vivência sustentável das comunidades humanas frente às consequências não pretendidas de diversas atividades com raízes evidenciadas nas revoluções industriais: produção de alimentos, matérias-primas, energia, tecnologias, uso da água e relações sociais.

É a diversidade que move os sistemas vivos pois é ela que possibilita a correlações de interdependência, parceria, reciclagem, e flexibilidade de seus componentes, processos necessários para manter seu funcionamento com sustentabilidade. Sistema é o conjunto, juntura, reunião de elementos em inter-relações, cuja organização tem significado para quem distingue. Na termodinâmica são definidos como quantidades macroscópicas de matéria-energia nas quais ocorrem fenômenos com significado, ou seja, transformações de interesse humano (D'Agostini, 2007). Neles a presença de diferenças é condição para a dinâmica das relações existentes, possibilitando o bom funcionamento do sistema natureza operado pela biodiversidade. Conhecer o significado das relações possibilita melhor aproveitamento dos processos ecológicos com atuação humana positiva no manejo do ambiente.

2.1.2. Biodiversidade: diferenças co-criadoras

O termo biodiversidade possui grande amplitude e representa a diversidade de vida na Terra. É definida pela Convenção sobre a Diversidade Biológica como “a variabilidade entre os seres vivos de todas as origens, inter alia, a terrestre, a marinha e outros ecossistemas aquáticos e os complexos ecológicos dos quais fazem parte: isso inclui a diversidade no interior das espécies, entre as espécies e entre espécies e ecossistemas” (Artigo 2). Responsável pela estabilidade dos ecossistemas, pelos processos naturais e produtos fornecidos por eles e pelas espécies que modificam a biosfera. Composta por todos os seres vivos do planeta englobando desde vírus microscópicos até os maiores animais, a espécie humana também é parte integrante da biodiversidade da Terra. Envolve comunidades e relacionamentos. Todos os seres vivos entrelaçam-se numa teia de relações caracterizadas por cooperação, competição, predação, simbiose ou parasitismo que co-criam a dinâmica de seus nichos. Esse sistema interligado e delicadamente equilibrado fornece alimento, abrigo, medicamentos, combustíveis, regulação de energia, reprodução, entre tantos outros benefícios (serviços ecossistêmicos), onde cada membro da comunidade tem um papel essencial para manter essa rede em equilíbrio. Assim, espécies, processos, sistemas e ecossistemas criam coletivamente as bases da vida da Terra.

Antes mesmo de a ecologia existir como ciência, os naturalistas já estavam interessados nos padrões da distribuição de espécies nas comunidades naturais. Por exemplo, o gradiente latitudinal de riqueza é considerado “o padrão ecológico mais antigo” (Hawkins 2001), já percebido por Humboldt (1808), que escreveu: “Quanto mais perto chegamos dos trópicos, maior o aumento na variedade das estruturas, na beleza das formas e na mistura das cores, assim como na juventude perpétua e no vigor da vida orgânica”. Essas primeiras ideias sobre a distribuição das espécies, descritas no século XIX, formaram o embrião da Ecologia como uma ciência única.

Assim, percebe-se que o entendimento da biodiversidade abrange muitas dimensões, portanto, atualmente, esta pode ser didaticamente classificada como taxonômica, filogenética e funcional (Isbell *et al.* 2017). Ela é quem dita o funcionamento dos ecossistemas (Wood *et al.*, 2015), por isso, compreender relações intrínsecas a essa dinâmica é o papel central da ecologia (Hillebrand &

Matthiessen, 2009; Hooper *et al.*, 2005). A categoria taxonômica diz respeito à diversidade de espécies, a filogenética trata da diversidade de linhagens e a funcional considera a diversidade de funções desempenhadas pelos organismos presentes em um ecossistema.

2.2. DIVERSIDADE FUNCIONAL

Existe um crescente número de evidências que aponta a diversidade funcional como a dimensão da biodiversidade mais diretamente relacionada ao funcionamento dos ecossistemas (Hillebrand & Matthiessen, 2009; Cadotte *et al.*, 2011; Reich, 2014), onde comunidades compostas por espécies funcionalmente diferentes teriam melhor funcionamento em comparação com aquelas em que predomina a semelhança. Porém, ainda não se pode delinear ótimos agroecossistemas multifuncionais (Faucon *et al.*, 2017) com predição de combinações interespecíficas capazes de maximizar funções ecossistêmicas por meio do efeito de complementariedade (Cadotte, 2017). Balvanera *et al.* (2014) apresentam a eficiência da ecologia funcional na geração de informações a respeito da cadeia causal de ligações entre mudanças na diversidade e serviços ecossistêmicos.

A diversidade funcional está intrinsecamente relacionada aos efeitos de interações sinérgicas ou antagônicas entre os indivíduos. Os mecanismos que estudam essas relações sustentam-se na distribuição de espécies e suas abundâncias em um espaço de nichos (Dias *et al.*, 2013). Com objetivo de investigar de forma mais minuciosa esses mecanismos, a diversidade funcional é habitualmente dividida em riqueza funcional, equabilidade funcional e divergência funcional (Mason *et al.*, 2005; Villéger *et al.*, 2008). De forma individual ou combinada, esses elementos podem ser calculados por meio de índices que descrevem quanto do espaço de nicho é ocupado pelas espécies (riqueza funcional) e como esse espaço é ocupado levando a abundância das espécies em consideração (equalidade e divergência funcionais). A riqueza funcional mede o volume de espaço multidimensional criado traçando os valores dos diversos atributos para todos os membros da comunidade, logo, reflete a quantidade (riqueza) de atributos funcionais presentes; a equabilidade funcional mede a regularidade da distribuição da abundância dentro desse volume; e, por fim, a divergência funcional mede como as espécies divergem do centro de gravidade dentro desse volume, ou seja, a variação das funções e a posição de seus grupos

de atributos no espaço (Schleuter et al., 2010). De posse dessas observações quantitativas é possível adquirir noções de utilização de recursos pelos vegetais e, por conseguinte, noções de vulnerabilidade e produtividade de um ecossistema.

É importante frisar que a redundância funcional, ou seja, a presença de espécies funcionalmente idênticas também é importante para manter a estabilidade nos ecossistemas. Ainda que esta não seja diversidade funcional, é parte da diversidade biológica e, portanto, também ajuda na proteção do ecossistema contra perturbações (Joner & Pillar, 2012).

2.2.1. Atributos funcionais

Quaisquer características morfológicas, fisiológicas ou fenológicas, mensuráveis em nível de indivíduo e que tenham efeito no seu crescimento, reprodução e sobrevivência, e que por sua vez estão relacionadas ao nível de adaptabilidade do mesmo podem ser chamadas de atributos funcionais (Violle *et al.*, 2007). Para uma melhor compreensão da percepção funcional na dinâmica biodiversa dos ecossistemas a escolha dos atributos funcionais exige especial atenção. Perez-Harguindeguy et al. (2013) padronizaram protocolos aplicáveis, em amplas situações e contextos geográficos, de medidas de atributos funcionais para plantas vasculares, elucidando seus significados práticos no funcionamento dos ecossistemas e suas metodologias de coleta desde a seleção de espécies e indivíduos à de atributos qualitativos e quantitativos. O presente trabalho se baseou nesse manual construído por esses autores para efetuar a ecologia de atributos.

Os atributos podem ser qualitativos, como hábitos de crescimento, forma de vida, história de vida e vida útil máxima da planta, clonalidade, entre outros, ou quantitativos, como altura da planta, área foliar, pH, conteúdo de matéria seca, teor de nutrientes, densidade do caule, massa de sementes, resistência ao sal, taxa fotossintética, condutividade do xilema, inflamabilidade e etc. Cada atributo possui seu significado prático, ou seja, reflete alguma propriedade do ecossistema. Por exemplo, a altura das plantas está associada à forma de crescimento, posição da espécie no gradiente vertical de luz da vegetação, vigor competitivo, tamanho reprodutivo, fecundidade, vida útil potencial, capacidade de estabelecimento após eventos de perturbação e etc (Perez et al. 2013). De acordo com esses mesmos

autores, a Tabela 1 apresenta os significados práticos gerais dos atributos utilizados no presente estudo.

Tabela 1 – Atributos funcionais considerados no presente estudo e seus significados práticos.

Atributo funcional	Significado prático
Área foliar (LA)	Capacidade hidráulica (com efeitos relacionados à taxa fotossintética) e resistência mecânica da folha.
Área foliar específica (LAE)	Gradientes de produtividade (relacionado ao potencial de crescimento relativo entre as espécies).
Densidade do caule (Dc)	Estabilidade, defesa, arquitetura, hidráulica, ganho de carbono e potencial de crescimento.
Conteúdo de matéria seca da folha (LDMC)	Noções de vida útil das folhas, velocidade de decomposição, resistência a riscos físicos (herbivoria, granizo, vento); relações de inflamabilidade; e alguns aspectos da água na folha.
Teor de N foliar (Nf)	Correlacionado à taxa fotossintética máxima; qualidade nutricional dos consumidores em redes alimentares.
pH foliar (pH)	Digestibilidade e palatabilidade dos herbívoros.
Altura da planta (H)	Estratégias ecológicas da planta; forma de crescimento; posição da espécie no gradiente de luz vertical da vegetação; vigor competitivo; tamanho reprodutivo; fecundidade de plantas inteiras; vida útil potencial; e capacidade de reestabelecimento após perturbações (fogo, tempestades, geadas, lavoura etc).

Adaptado de Perez et al. (2013).

De acordo com Perez et al. (2013), a área foliar está associada à variação climática, geologia, altitude e latitude, onde estresses por calor, frio, hídrico, nutricional e de alta radiação tendem para seleção de folhas relativamente pequenas. Dentro das zonas climáticas, a variação da área foliar das plantas também é influenciada por fatores alométricos (tamanho da planta, tamanho do

galho, anatomia e arquitetura, número de folhas, número de botões laterais produzidos etc) e pela estratégia ecológica utilizada em relação a estresses e distúrbios nutricionais ambientais, além de processos filogenéticos. Logo, avaliando esse atributo é possível conhecer sobre o transporte hídrico e resistência mecânica da planta.

A área foliar específica tem sido bastante utilizada em análises de crescimento por correlacionar-se positivamente com a taxa de crescimento relativo, taxa fotossintética e teor de nitrogênio foliar. Está negativamente relacionada à longevidade foliar e ao investimento de carbono em compostos secundários quantitativamente importantes como tanino e lignina. Geralmente, locais com riqueza de recursos ambientais seja de forma permanente ou temporária (como por exemplo, um deserto após um evento chuvoso) tendem, em média, a ter maior área foliar específica que os ambientes pobres em recursos (Perez et al., 2013). Assim, gradientes de produtividade podem ser previstos a partir de sua medição.

O conteúdo de matéria seca da folha está associado com a densidade média dos tecidos foliares, e tende a estar inversamente relacionado à área foliar específica. Correlaciona-se negativamente com a taxa de crescimento relativa das plantas e positivamente com a vida útil das folhas, ou seja, quanto maior o conteúdo de matéria seca da folha mais resistente está a riscos físicos, como ação da herbivoria e de ventos, e mais lenta é a sua decomposição.

O ritmo de crescimento das plantas está intrinsecamente ligado à densidade do caule. Baixos valores de densidade do caule (vasos grandes) estão associados a um custo barato de construção volumétrica e grande capacidade hidráulica, e, portanto, ao rápido crescimento vegetal. Por outro lado, a alta densidade do caule relaciona-se a uma maior sobrevivência por questões biomecânicas, de segurança hidráulica, resistência contra patógenos, herbívoros ou danos físicos, tendo ainda um importante papel global no armazenamento de carbono.

O teor de nitrogênio foliar está intimamente correlacionado com a taxa fotossintética máxima e com a área foliar específica de forma positiva. Quanto maior o teor de N foliar, maior qualidade nutricional aos consumidores nas redes alimentares.

O pH foliar pode diferir muito entre espécies que crescem em um mesmo solo, logo, essa variação é presumidamente genética. Integra efeitos de muitos compostos e processos que afetam a capacidade da folha de trocar íons H^+ , porém

alguns destes são particularmente determinantes, por exemplo, quanto maior a concentração de cátions metálicos (cálcio, magnésio, potássio, etc), maior o pH, e quanto maior a concentração de ácidos orgânicos e metabólitos secundários ricos em C (como por exemplo, taninos), menor é o pH. Logo, este correlaciona-se negativamente com a concentração de C e com a relação C/N, e positivamente com área foliar específica e digestibilidade, fator importante para a palatabilidade dos agentes decompositores.

A altura da planta, por fim, reflete sua estratégia ecológica, sua forma de crescimento, sua posição no gradiente vertical de luz da comunidade, seu vigor competitivo, sua vida útil potencial e sua capacidade de reestabelecimento após perturbações (fogo, tempestades, geadas, lavoura etc).

É importante lembrar que a escolha dos atributos a serem avaliados é fortemente dependente das perguntas em questão na investigação do funcionamento dos ecossistemas, das características ecológicas e escala da área de estudo e de circunstâncias práticas. Assim, o primeiro e mais importante critério para decidir quais características visar são os processos de interesse. Trata-se de crescimento, reprodução e/ou dispersão de plantas sobre a paisagem? Envolve a sobrevivência das plantas em resposta a recursos ou distúrbios? É sobre o feedback da vegetação para atmosfera e o clima? Contempla estado juvenil e persistência de adultos? Envolve polinizadores, dispersores e/ou herbívoros? O processo de destino ocorre acima ou abaixo do solo? O foco são diferenças grosseiras entre continentes ou diferenças sutis entre indivíduos de populações e/ou locais ligeiramente diferentes? Os serviços ecossistêmicos específicos são avaliados ou previstos? De acordo com Perez et al. (2013) todos esses e outros tipos de perguntas têm um impacto direto na seleção dos atributos, onde considerações logísticas e financeiras são igualmente relevantes.

Embora não haja limites para o número de características relevantes em diferentes contextos de pesquisa, um pequeno número de atributos foi considerado quase universalmente, por estarem no centro do ciclo de vida da planta (Grime et al., 1997; Westoby, 1998). São estes: tamanho da planta (geralmente expresso em altura), tamanho das sementes (geralmente expresso em massa de sementes) e a estrutura do tecido foliar (frequentemente expresso como área foliar específica e/ou conteúdo de matéria seca foliar). Existem algumas “listas principais” de características de plantas que são consideradas importantes para o uso de recursos

vegetais, regeneração, dispersão e resposta a perturbações generalizadas, como por exemplo, os trabalhos de Hodgson et al. 1999, McIntyre et al. 1999, Weiher et al. 1999, Lavorel & Garnier 2002 e Knevel et al. 2003. Essa discussão está muito além do escopo do presente trabalho, o qual apresenta apenas uma superficial introdução.

2.3. MÉTRICAS: QUANTIFICANDO AS DIFERENÇAS

Uma maneira simples de quantificar a diversidade de uma comunidade resume-se em contar o número de espécies presentes. Esse número de espécies pode ser expresso em função da área ocupada (densidade de espécies) ou em função do número de indivíduos (riqueza de espécies) (Krebs, 1999). Ao estimar a diversidade dessa forma, espécies raras e comuns são igualmente consideradas, ou seja, ambas possuem o mesmo peso na estimativa da diversidade quantificada pela densidade ou pela riqueza de espécies. Para evitar esse inconveniente, há a opção de incorporar a contribuição relativa de cada espécie na quantificação, usando os índices de diversidade. Muitos destes foram e estão sendo propostos como os de Shannon, Simpson, Pielou, Jentsch entre outros (Magurran, 2004). O cálculo da contribuição relativa de cada espécie pode ser obtido a partir da métrica dos indivíduos, como a biomassa, a área basal ou a altura. Esses índices combinam a riqueza de espécies e sua equabilidade, ou seja, o modo como os indivíduos se distribuem pelas espécies. De acordo com Ricotta (2003), ainda que cada índice tenha suas singularidades e cada um pondere as espécies raras e abundantes de maneiras diferentes, altas riquezas e altas equabilidades estão correlacionadas com altas diversidades.

O cálculo usual dessa contribuição relativa, ou seja, pela abundância das espécies, ignora quaisquer outras diferentes interespecíficas. Portanto, um indivíduo de copaíba (*Copaifera langsdorffi*) que pode chegar a 50 m de altura e pesar mais de 300 toneladas, tem o mesmo peso no cálculo da diversidade que um arbusto com poucos metros de altura e de poucos quilos. Assim, dentro de uma dada espécie, assume-se que os indivíduos são equivalentes não importando se têm alturas ou biomassas diferentes, se crescem em locais de maior ou menor disponibilidade de luz, etc. Essa premissa erroneamente assumida ao usar esses índices muitas vezes é ignorada pelos pesquisadores. Nesse sentido, é indispensável reconhecer a

importância de cada método e definir ponderadamente quando usar um ou outro em casos particulares. Nota-se que as medidas tradicionais de diversidade não são capazes de fornecer boas respostas e previsões, logo, medidas que incorporem informações sobre as espécies ou sobre os indivíduos se mostram mais eficientes (Ciancruso, 2009).

Diante da potencial relação entre a diversidade funcional e o funcionamento e manutenção dos processos das comunidades (Petchey & Gaston, 2006; Balvanera et al., 2014) é essencial esclarecer precisamente o conceito de diversidade funcional. Segundo Tilman (2001), trata-se do “valor e variação das espécies e de suas características que influenciam o funcionamento das comunidades”. Assim, medir a diversidade funcional significa medir a diversidade de características funcionais, componentes dos fenótipos dos organismos que influenciam os processos na comunidade. Por exemplo, suponhamos duas comunidades vegetais (A e B) com o mesmo número de espécies. Se todas as espécies em A tiverem dispersão de sementes por atuação de mamíferos, enquanto que as espécies em B forem dispersas por mamíferos, aves, formigas, répteis e pelo vento, apesar de ambas portarem o mesmo número de espécies, B será mais diversa por apresentar espécies funcionalmente diferentes em relação à síndrome de dispersão.

A literatura a respeito das características funcionais vem ganhando espaço, especialmente para as plantas, tal como linhas de pesquisa aplicadas a testes e poderes preditivos dessas características em relação a efeitos no funcionamento das comunidades e a processos biológicos (Cornelissen et al., 2003; Violle et al., 2007). Para mais informações, Laureto et al. (2015) trazem em seu trabalho investigações sobre a história e aplicabilidade da diversidade funcional nos estudos de sistemas ecológicos.

Nesse olhar, as diferenças entre os organismos são estimadas diretamente a partir de características funcionais relacionadas com as hipóteses em estudo. A diversidade de traços funcionais que influenciam os processos da comunidade é mensurada independentemente da filogenia dos organismos. Várias medidas de diversidade funcional vêm aparecendo na literatura, diferindo entre si na informação contida e na forma de quantificação da diversidade (Ricotta, 2005; Petchey & Gaston, 2006).

A forma mais antiga e mais comum de se medir a diversidade funcional é dada pelo número de grupos funcionais (ou tipos funcionais) presentes em uma

comunidade (Tilman et al., 1997; Díaz & Cabido, 2001), em outras palavras, a riqueza de grupos funcionais (FGR). De acordo com essa abordagem, as espécies são agrupadas conforme algum método de classificação, de forma que, aquelas presentes dentro do grupo sejam mais similares entre si que com espécies de grupos diferentes.

Mesmo que muito utilizada, a FGR possui algumas limitações importantes. Primeiramente, as decisões sobre o nível de diferenciação entre organismos funcionalmente significativas são arbitrárias, remetendo à questão: quão similares devem ser os organismos para serem considerados membros de um mesmo grupo funcional? Os critérios para responder essa pergunta são subjetivos, porém existem métodos analíticos capazes de reduzir bastante essa subjetividade (Pillar & Sosinski, 2003). Outra limitação é que ao usarmos essa abordagem assumimos que os membros de um mesmo grupo são funcionalmente idênticos, em outras palavras, as espécies dentro dos grupos são completamente redundantes e que os membros de grupos distintos são igualmente diferentes, isto é, complementares. Ambos pressupostos raramente são verdadeiros. Logo, a classificação de organismos em grupos funcionais demanda maior número de decisões quando comparada todas as medidas de diversidade funcional atualmente disponíveis (Petchey & Gaston, 2006) e demanda bastante cautela. Trabalhos como os de Díaz & Cabido (2001), Mason et al. (2003) e Petchey & Gaston (2002 e 2006) demonstram que as medidas contínuas são vantajosas em relação às categóricas, logo, é preferível para quantificação da diversidade funcional.

As métricas de diversidade funcional disponíveis atualmente podem envolver medidas que permitem o uso de apenas uma característica funcional (Mason et al., 2003) e/ou medidas multivariadas, as quais permitem o uso de várias características simultaneamente. No caso das multivariadas, podem ser baseadas na distância de pares de espécies (Ricotta, 2005), no “volume” que as espécies de uma comunidade ocupam em um espaço multivariado (Cronwell et al., 2006) ou nos fundamentos da análise de agrupamento (Petchey & Gaston, 2002). As medidas multivariadas certamente são mais promissoras, e entre elas está a entropia quadrática de Rao.

O índice multivariado da Entropia Quadrática de Rao (RaoQ) é o mais amplamente utilizado e possivelmente um dos mais robustos para quantificação da diversidade funcional (Schleuter et al. 2010; Botta-Dukát, 2005; Pillar et al., 2013). A RaoQ representa uma forma generalizada do índice clássico de diversidade de

Simpson e se baseia na abundância específica e nas diferenças funcionais entre pares de espécies em uma assembleia, ou seja, incorpora as abundâncias relativas das espécies e uma medida das diferenças funcionais das mesmas. Trata-se da dissimilaridade média entre as espécies ocorrentes (Botta-Dukát, 2005, Laliberté & Legendre, 2010). De acordo com Gusmao et al. (2016) esta tem se mostrado uma excelente abordagem informativa para analisar a estrutura funcional das comunidades. Este é matematicamente definido por:

$$RaoQ = \sum_{i=1}^s \sum_{j=1}^s d_{ij} p_i p_j$$

Onde, d_{ij} é a dissimilaridade, na faixa de 0 a 1, entre as espécies i e j com base em conjunto específico de atributos funcionais.

Para os dados de atributos, a função padrão incorporada no pacote “FD” do software *R Statistics* (R Core Team, 2018) calcula a raiz quadrada do complemento do índice de dissimilaridade de Gower para ter uma matriz de dissimilaridade com propriedades métricas euclidianas. Portanto, adicionando novas espécies ao conjunto de dados, a diversidade funcional que utiliza esse índice pode permanecer constante, porém não será reduzida (Debastiani & Pillar, 2012; Pillar et al., 2013). O índice de Gower varia de 0 a 1 e os atributos podem ser dados numéricos ou categóricos. Maior quantidade de espécies envolvidas, distribuição mais equitativa das abundâncias das espécies e maiores diferenças entre os atributos são fatores que elevam o índice de Rao.

Outra forma de perceber a ecologia funcional dos ecossistemas se dá pela quantificação da composição (identidade) funcional, que, embora não represente a diversidade funcional, é uma forma de entender como o espaço funcional está preenchido. Esta calcula qual a estratégia média da comunidade por sua média ponderada (Community Weighted Means – CWM), baseada na combinação de atributos funcionais (Ricotta & Moretti, 2011). Comunidades funcionalmente parecidas ficam mais próximas no espaço multivariado de atributos. Essa métrica permite identificar quais atributos funcionais apresentam maior efeito nos processos ecossistêmicos em questão.

2.3.1. Aplicações

Como visto, a identidade e a diversidade funcional são conceitos da ecologia funcional que conectam organismos e comunidades por meio de mecanismos como complementaridade no uso de recursos e facilitação (Petchey & Gaston, 2006), portanto, possibilitam o esclarecimento dos processos que determinam o funcionamento dos ecossistemas. A partir dessa abordagem é possível, por exemplo, avaliar com maior precisão a extinção de espécies na manutenção das características das comunidades (Petchey & Gaston, 2006) e testar processos determinantes na organização das mesmas, como filtros ambientais e competição (Weiher & Keddy, 1995). Ainda, Ernst et al. (2006) mostrou que a diversidade funcional é mais interessante na avaliação e monitoramento de impactos ambientais que a riqueza de espécies (diversidade taxonômica).

A independência da identificação taxonômica dos organismos é um ponto interessante da ecologia funcional, principalmente para regiões onde o conhecimento florístico é ainda deficiente, como por exemplo, nos trópicos (Duckworth et al., 2000). Esse olhar na ecologia permite o planejamento de sistemas de produção agroflorestais sucessionais com maior eficiência em termos de multifuncionalidade, minimizando restrições econômicas e de manejo (Wood et al., 2015; Finney & Kaye, 2017).

O CWM e o coeficiente de Rao têm sido amplamente adotados nas pesquisas ecológicas para resumir diferentes aspectos da composição característica da comunidade, como exemplos o trabalhos de Lavorel et al. (2008) e Vandewalle et al. (2010). Logo, estas métricas se mostram como ferramentas interessantes na leitura dos ecossistemas e muito úteis no planejamento e manejo de sistemas agroflorestais e, portanto, foram utilizadas no presente estudo.

2.4. SISTEMAS AGROFLORESTAIS (SAFS)

Os sistemas agroflorestais (SAFs) são uma combinação integrada de árvores, arbustos, cultivos agrícolas e/ou animais em uma mesma área, seja de maneira simultânea ou sequencial, que buscam a otimização da agregação de valores socioeconômicos, culturais e ambientais, e, portanto, uma estratégia promissora no uso e manejo dos recursos naturais com sustentabilidade. O conceito de SAF é

bastante amplo, possibilitando que um leque variado de sistemas agrícolas possam ser classificados como agroflorestais (Ferreira & Dal Soglio, 2017). Os SAFs conduzidos sob uma lógica agroecológica transcendem quaisquer modelos prontos e sugerem a sustentabilidade a partir de conceitos fundamentais, aproveitando os conhecimentos locais e desenhando sistemas adaptados para um potencial natural do lugar (Gotsch, 1995).

SAFs nos quais aplica-se o conhecimento acerca de biologia de espécies atrelada à sucessão ecológica, são os chamados SAFs sucessionais, onde os processos sucessionais que recriam condições vistas em florestas são potencializados, de forma que os sistemas produtivos possam imitar a estrutura e funcionamento de sistemas naturais (Monerat, 2007). Os ecossistemas nativos são independentes de energia fóssil, funcionam com energia solar, são autossustentáveis e não demandam tecnologias caras e poluentes utilizadas na industrialização da agricultura desde a Revolução Verde. Assim, aprender com os ecossistemas naturais e elaborar abordagens alternativas à agricultura convencional, com a redução do uso de insumos externos e um bom aproveitamento dos processos ecológicos, é uma prática cada vez mais necessária e interessante, principalmente em locais onde os recursos naturais e monetários são escassos (Ewel, 1999).

Existem atualmente três diferentes percepções a respeito dos SAFs no Brasil: (i) Os SAFs agronômicos (ou SAFs 'consórcio'), nos quais há um baixo incremento de diversidade nos cultivos convencionais e ainda mantem-se restritos à priorização exclusiva da produtividade agronômica, ou seja, focados em serviços de provisão (por exemplo: eucalipto e café consorciados). (ii) Os SAFs agroecológicos, onde outros tipos de serviços ecossistêmicos também são valorizados, contam com a aplicação do conhecimento ecológico no incremento da diversidade na ocupação dos estratos horizontais e verticais, trabalhando a conservação pelo uso, assim como os SAFs sucessionais. (iii) SAFs para recuperação de áreas degradadas e de reserva natural, com uma visão preservacionista, nos quais há a promoção de alimentos junto à regulação e controle do manejo de espécies nativas (Ferreira & Dal Soglio, 2017).

Nos SAFs agroecológicos, também chamados de agroflorestas, são levadas em consideração as dimensões ecológicas, cultural, social, econômica, política e ética. Estes sempre foram e continuam sendo desenvolvidos por muitos povos

indígenas em todo o mundo, cujos princípios estão intrinsecamente enraizados nas culturas milenares que foram se adaptando ao meio em que viviam. Há 4 500 anos já vinham sendo manejadas espécies comestíveis e madeireiras em policultivos anuais pelos povos habitantes da Amazônia oriental (Maezumi et al., 2018). O resgate cultural do conhecimento local, fruto de séculos de convívio com o ecossistema, é de extrema importância para elaboração de sistemas de produção mais sustentáveis (Altieri, 1983; Firebaugh, 1990). Diálogos de saberes são extremamente relevantes para a geração de políticas públicas, de pesquisas e de extensão voltadas ao desenvolvimento de SAFs baseados nas necessidades dos diferentes grupos de trabalho com agrofloresta (Parra et. al., 2017).

Atualmente, a compreensão e operação de agroflorestas eficientes aliam o conhecimento científico e local sob perspectivas interdisciplinares (Ehlers, 1996), atrelando a tecnologia ao conhecimento da vida e sua dinâmica, não necessariamente dependente de insumos externos elaborados, associando a produção de alimentos e matérias-primas à conservação dos recursos naturais. “Agrofloresta é uma palavra nova para práticas antigas onde plantas lenhosas crescem com cultivos agrícolas e/ou animais na mesma unidade de área” (Nyhoff, 1982). Apesar da definição do conceito de agrofloresta mais divulgado, elaborado pelo ICRAF que diz que: “SAFs são combinações do elemento arbóreo com herbáceas e/ou animais organizados em espaço e/ou tempo” contemplar a maioria dos SAFs, os sistemas complexos (biodiversos) pouco se assemelham aos mais tecnificados elaborados com conhecimento técnico puramente agrônomo. O salto de qualidade entre os ‘SAFs consórcios’ e os SAFs biodiversos se encontra justamente na transformação de paradigma ao lidar com a natureza para elaborar propostas de sistemas agroflorestais.

Em consequência do seu potencial de conservação da biodiversidade e manutenção de serviços ecossistêmicos, as agroflorestas têm ocupado um espaço importante no debate sobre sistemas produtivos que aliam produção e conservação (Joner, 2017). Devido à aprendizagem coletiva com troca de saberes e experiências, à difusão do conhecimento teórico-prático para adequações as novas circunstâncias da agricultura ecológica e suas demandas e à força dos movimentos sociais nos projetos agroflorestais, o número de adeptos agrofloresteiros se mostra cada vez mais crescente (Siddique et al., 2017).

2.5. SERRAPILHEIRA: O MOTOR DOS SAFS

No manejo eficaz dos SAFs é imprescindível compreender a dinâmica da diversidade e a vida do solo. O material de origem vegetal (folhas mortas, galhos, troncos, flores, frutos e sementes) e animal (restos de animais e fezes) depositado na superfície do solo, que, ao decompor, o supre juntamente às raízes com nutrientes e com matéria orgânica constitui a denominada serrapilheira (Martins, 2001). O acúmulo de serrapilheira, ou seja, do material precipitado do solo pela biota, exerce importante função por ser a mais significativa forma de transferência de nutrientes da vegetação para o solo, já que grande parte dos nutrientes dentro do ecossistema está presente na parte aérea da vegetação (Martins & Rodrigues, 1999). Claramente, uma cobertura vegetal densa produz maior quantidade de serrapilheira (Silva et al., 2007). Seu estoque é regulado pela quantidade de material que cai e pela sua decomposição na superfície do solo (Moreira & Siqueira, 2006). Logo, constitui uma importante fonte de carbono orgânico e nutrientes para o solo, além de assegurar maior estabilidade da temperatura por produzir sombra e reter a umidade, criando condições microclimáticas que influenciam a germinação de sementes e o estabelecimento de plântulas (Moraes et al., 1998; Osaki, 2008).

Os organismos mortos, por meio de uma interação complexa de atividades físicas e biológicas são decompostos em partículas cada vez menores até chegarem a pequenas moléculas como o dióxido de carbono, água e componentes minerais (Valentine, 2005). As folhas são as estruturas mais facilmente decompostas e predominantes na serrapilheira (Araújo et al., 2011).

A serrapilheira e as raízes finas no solo são as suas duas principais fontes de matéria orgânica, uma vez formada no solo, a decomposição desta acontece mais lentamente, ainda assim, é uma das maiores fontes de CO₂ no solo. O carbono que não é liberado para atmosfera é incorporado ao húmus do solo, ou solubilizado na água de percolação (Raich & Nadelhoffer, 1989). Assim, a decomposição da serrapilheira, produto da atividade saprofítica heterotrófica dos organismos, pode fornecer informações indiretas sobre a quantidade de carbono liberada em determinado tempo.

Vários fatores bióticos e abióticos afetam a produção de serrapilheira, como o tipo de vegetação, a altitude, a latitude, precipitação, temperatura, regime de

luminosidade, relevo, estágio sucessional, disponibilidade hídrica e características do solo (Figueiredo Filho et al., 2003), bem como sua decomposição, a qual também é responsável pelo efluxo de CO₂ (Raich & Shlesinger, 1992) a partir da respiração dos organismos atuantes e resulta na ciclagem de nutrientes. Muitas são as pesquisas sobre produção de serapilheira atrelada à dinâmica do solo, entre as quais os trabalhos de Cunha et al. (2018), Da Silva et al. (2017), De Freitas et al. (2016), Chaves et al. (2016), De Freitas et al. (2016), Manhaes e Francelino (2012), Topanotti et al. (2012), Da Silva et al. (2012), Radomski & Ribaski (2012), Aguiar et al. (2011), De Lima et al. (2010) e muitos outros que evidenciam relações intrínsecas à essa convivência cíclica e mutualística.

2.6. O SOLO

2.6.1. Solo: sustentação da vida

O solo é a base vital de toda a vida do globo (Primavesi, 2014), é um componente do agroecossistema que se mostra vivo, complexo, dinâmico e em transformação constante (Gliessman, 2008). É uma coleção de corpos naturais, um meio multifásico, formado por materiais orgânicos e inorgânicos, onde a solução aquosa e o ar estão entremeio aos materiais sólidos, ocupando os espaços porosos. Ao contrário dos sólidos minerais e orgânicos, a solução aquosa e o ar podem ter grandes variações em espaço de tempo relativamente pequeno (Lepsch, 2002). O ar do solo, composto principalmente de N₂ (cerca de 80%), O₂, vapor de água, CO₂ e outros gases, pode variar em termos de composição e concentração dependendo da presença de matéria orgânica, da atividade microbiana, da concentração de raízes, da aeração do solo e das reações químicas presentes (Lepsch, 2002). O ar do solo está continuamente sujeito a renovação pelas trocas com o ar da atmosfera, garantido o arejamento para os processos vitais da biota edáfica (Dias, 2006).

Esse meio multifásico abriga uma variedade de pequenos animais, por exemplo, formigas, cupins, minhocas, colêmbolas etc; e de microorganismos, como bactérias, fungos, actinomicetos e algas (Restrepo, 2007). Sabe-se que a qualidade físico-química dos solos depende da ação desses agentes pedoturbadores que atuam na ciclagem de nutrientes e melhoria física do ambiente. Como mostra Restrepo (2007), para entender como produzir sem prejudicar as qualidades físico-químicas e biológica dos solos, é necessário entender como um solo saudável se

comporta. Dessa forma torna-se possível projetar nos sistemas de produção vegetal condições ideais para o bom funcionamento dos mesmos, propiciando habitats satisfatórios nos âmbitos biológicos e físico-químicos em busca de alcançar populações desejáveis de microorganismos, os quais são extremamente numerosos em solos férteis.

No sistema solo-planta, os processos reguladores das transformações, dos fluxos e da dinâmica dos elementos químicos são interdependentes e bem regulados pelo estoque e frações de carbono (C) e pelas transformações da matéria orgânica. Devido a isso o declínio nos estoques e na qualidade da matéria orgânica afeta a qualidade do solo, aumenta a ocorrência de erosão e compactação, altera o suprimento de água e nutrientes e reduz a atividade biológica. De todos os atributos do solo, o teor de matéria orgânica se relaciona positivamente com as características funcionais determinantes de sua qualidade, e assim, com sua manutenção obtém-se produtividade com sustentabilidade nos ecossistemas terrestres (Siqueira et al., 2008).

2.6.2 Compartimentos de carbono na Terra

O dióxido de carbono é um gás que está presente no ar atmosférico na proporção de 0,03% do seu volume total. O carbono, na forma de CO₂, movimentase a partir de processos naturais como a respiração, a fotossíntese e a dissolução, entre a atmosfera e os continentes. Esse movimento gera um ciclo, denominado ciclo do carbono.

O carbono na forma de gás carbônico atmosférico entra na biomassa terrestre via fotossíntese (produtividade primária bruta), e metade desse valor é liberado como CO₂ pela respiração das plantas. O carbono restante é armazenado na biomassa vegetal (produtividade primária líquida) e entra no solo via senescência ou exsudação. Ao mesmo tempo, a respiração heterotrófica retorna uma quantidade equivalente à produtividade primária líquida para atmosfera fechando o ciclo (Ferreira, 2013).

O solo, a atmosfera, a hidrosfera, a superfície biológica e a biomassa terrestre constituem os cinco principais reservatórios de carbono na Terra (Press et al., 2006; Machado, 2005; Batjes, 1998). O ecossistema terrestre acumula carbono de diversas maneiras, como nos microorganismos, folhas vivas, respiração das

raízes, madeira e decomposição da matéria orgânica (Houghton, 1994). A reserva de carbono presente no solo, estimada em 1.500 Gt de C, é a maior nos ecossistemas terrestres. Equivalente a quase três vezes a quantidade de carbono presente na biomassa terrestre e duas vezes a quantidade estocada na atmosfera (Press et al., 2006; Schlesinger, 1997).

As condições edafoclimáticas locais, características do relevo, da drenagem e o tipo de manejo do solo adotado, entre outras variáveis, influenciam o potencial de fixação e estocagem de C no solo. Para exemplo, Frazão et al. (2010) apontam grandes diferenças no estoque de C em um Neossolo Quartzarênico entre áreas distintas de uso agrícola e de vegetação nativa no Cerrado mato-grossense, indicando deficiências nos sistemas produtivos quanto ao aporte de resíduos, manutenção e incremento da matéria orgânica do solo.

2.6.3. Fluxo de carbono e respiração do solo

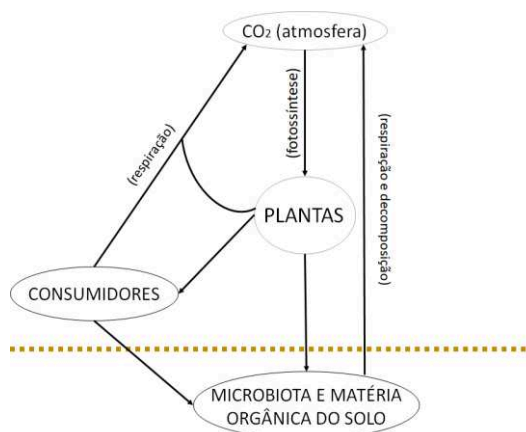
No solo o CO₂ é produzido pela respiração das raízes, microorganismos, fauna do solo e pela oxidação química dos compostos de carbono (Lundegardh, 1927). Esses fenômenos bioquímicos são conhecidos como respiração do solo ou respiração basal (RB). Trata-se de um dos maiores e mais importantes processos de liberação do carbono em um ecossistema terrestre, contribuindo com cerca de 50% do carbono que compõe a respiração do ecossistema (Wagai et al., 1998; Roberts, 2000).

A matéria orgânica do solo (MOS) armazena a maioria do carbono contido nos sistemas terrestres do planeta, com aproximadamente 1.576 Pg de C (1 Pg = 10¹⁵ g), distribuídos em 12,8 bilhões de hectares de solos continentais (Edwards, 1975). Destes, a maior parte é encontrada nos solos com florestas, que contribuem com cerca de 787 Pg de C (Dixon et al., 1994). Ecossistemas onde a respiração total excede a assimilação pelos produtores primários são considerados fontes de carbono para a atmosfera. Entretanto, em ecossistemas onde a produção de matéria orgânica supera a atividade dos decompositores ocorre um acúmulo de material orgânico no solo e o ecossistema é considerado um depósito de carbono ou sequestrador de CO₂ atmosférico (Silva, 2006).

Resíduos de animais e plantas em diferentes fases de decomposição formam a MOS, a qual é mediada por microorganismos, em sua maioria bactérias e fungos,

os quais controlam a disponibilidade de nutrientes e liberação ou acúmulo de C no solo. Decomposição, erosão e lixiviação são outros fatores inerentes ao balanço de entrada e saída de carbono no solo (Six et al., 2006). Durante a decomposição da MOS, os microorganismos utilizam o C demandado para síntese de biomassa e o restante é perdido por respiração na forma de CO_2 . Assim, essa microbiota libera C ao solo como produto de seu metabolismo e também com a sua morte. Apesar de contribuírem bastante na RB, é a respiração das raízes a responsável pela maior parte da respiração total, correspondendo de 30% a 80% (Sotta, 1998). De acordo com Moitinho (2013), a troca de gases entre o solo e a atmosfera, ou seja, o fluxo de carbono, são mediados por difusão (movimento do gás de uma zona de maior concentração para uma zona de menor concentração) e fluxo de massa (ocasionado pelo movimento conjunto do ar do interior dos solos misturado ao gás, em resposta a um gradiente de pressão que varia em função da textura, estrutura e teor de umidade do solo). Dessa forma, o balanço de C no solo é dependente da relação entre as adições de C fotossintetizado pela planta (parte aérea e raízes) e as perdas de C para atmosfera resultantes da oxidação microbiana do C orgânico à CO_2 (Zanata, 2008). Para melhor entendimento a Figura 1 ilustra o ciclo do C nos ecossistemas terrestres.

Figura 1 – Ciclo biogeoquímico do carbono em ecossistemas terrestres esquematizado. Adaptado de Gonçalves (2012).



Fonte: elaborada pela autora (BORGES, 2019).

As plantas e os organismos aeróbios exigem certos níveis de oxigênio da atmosfera do solo consumindo O_2 e liberando CO_2 . Por isso, a atmosfera do solo, em geral, possui concentração menor de O_2 e maior de CO_2 , em comparação com a

atmosfera acima do solo. Esses processos de troca de gases entre a atmosfera superior e a atmosfera do solo (aeração), muitas vezes, podem ser limitantes às culturas agrícolas e florestais. Isso não é verdade com raras exceções, como é o caso do arroz, que se desenvolve adequadamente em ambiente anaeróbico (Timm & Reichardt, 2012).

O processo de respiração e do fluxo do CO_2 no solo depende grandemente de fatores ambientais como temperatura e umidade, os quais afetam o transporte dos gases no solo e entre o solo e a atmosfera, devido a fração de poros do solo preenchidos com ar ou com água (Sotta, 1998; Dias, 2006). Muitos estudos demonstram a importância da temperatura no efluxo de CO_2 do solo (Schlesinger, 1997; Singh & Gupta, 1997; Shleser, 1982), especialmente em ecossistemas onde a temperatura define a atividade biológica do sistema, como aqueles presentes em climas temperados e boreais. Por outro lado, nos trópicos a umidade se mostra um dos fatores mais importantes de influência no ritmo da atividade biológica (Mahli, 1997).

Em escala global, a taxa de respiração do solo tem correlação significativa com a medida anual de temperatura do ar e com a medida anual de precipitação e principalmente com a interação dessas duas variáveis (Dias, 2006). Estudos citados por Coelho (2005) têm mostrado que a taxa de respiração do solo pela atividade microbiológica aumenta exponencialmente com a temperatura, porém, na ocorrência de temperaturas muito elevadas as enzimas mediadoras dos processos no solo podem ser desativadas ou mortas, reduzindo a respiração basal (Moncrief, 2001). Zanchi et al. (2003) constataram que ocorre um grande aumento na emissão de CO_2 do solo logo após um evento chuvoso, pelo fato de que quando a água é drenada para o solo força a saída do CO_2 presente nos poros. Após algumas horas de chuva, há uma quebra brusca no fluxo, pois a água forma uma camada de proteção da superfície edáfica, evitando a emissão de CO_2 para atmosfera. Essa emissão é crescente à medida que os poros ficam livres com a evaporação da água e drenagem para o lençol freático, isso ocorre junto ao restabelecimento das condições aeróbicas que favorecem a dinâmica dos microorganismos.

O efluxo de CO_2 da superfície do solo é o sistema mais amplamente utilizado como estimativa da taxa de respiração edáfica. No entanto, a respiração do solo e o efluxo de CO_2 não são sinônimos. A respiração do solo é a oxidação da MOS e inclui a respiração das raízes (autotrófica) e dos organismos do solo (heterotrófica). Já o

efluxo de CO₂ é a liberação do CO₂ para a atmosfera e, portanto, depende da produção de CO₂ no solo e do processo físico de fluxo de gás para fora do solo (Moreira & Siqueira, 2006). É imprescindível frisar que os fluxos de carbono podem ser na forma de CO₂, CH₄ e outros compostos voláteis, sendo o CO₂ o mais importante em termos de massa (Salimon, 2003).

Assim, a respiração basal (RB) é um indicador da atividade biológica no solo amplamente utilizado, uma vez que reflete os processos de catabolismo dos organismos aeróbios e, portanto, a decomposição da matéria orgânica e a disponibilização e imobilização de nutrientes no solo. Esta reflete a produção de gás carbônico (CO₂) no solo produto da atividade respiratória de microorganismos, protozoários, nematoides, insetos, anelídeos e raízes do solo. É um indicador sensível, revela rapidamente alterações nas condições ambientais que possam afetar a atividade microbiana (De-Polli & Pimentel, 2005). De modo geral, considera-se que altos valores de RB indicam uma maior atividade metabólica dos microrganismos, já que o fluxo de CO₂ correlaciona-se com a intensidade dos processos catabólicos. Por outro lado, altos valores de RB também podem indicar a perda de matéria orgânica do solo, principalmente em situações onde o balanço de carbono é negativo (Parkin *et al.*, 1996). Assim, a RB é importante para avaliação da qualidade do solo por refletir a atividade da microbiota edáfica responsável pela degradação de compostos orgânicos (Lopes, 2001) junto à respiração das raízes. Tratam-se de medidas extremamente variáveis no espaço e no tempo devido à heterogeneidade do ecossistema e da dinâmica dos fatores que controlam os fluxos de CO₂.

De acordo com Dias (2006), há diversas maneiras de se medir o fluxo de CO₂ do solo, com diferenças na exatidão, na resolução espacial e temporal, e aplicabilidade, entre elas, armadilhas de álcalis, covariância de vórtices turbulentos e câmaras fechadas que absorvem CO₂ por infravermelho (IRGAs). O caminho mais direto de medida da respiração que ocorre entre o solo e a camada de serrapilheira é o uso de câmaras, com analisadores de gás infravermelho (IRGA), colocadas sobre o solo. Esta oferece a vantagem de rápida medição dos fluxos (tempo inferior a 5 minutos) e de que os numerosos pontos de dados de concentração de CO₂ podem ser registrados rapidamente, rendendo um monitoramento contínuo e pouco trabalhoso (Dias, 2006). Existem diferentes formas e dimensões de câmaras, sendo as de formato cilíndrico e tamanho variado as mais comumente utilizadas. Seu

funcionamento pode se dar de forma estática ou dinâmica em função da circulação interna de ar promovida por ventiladores e da existência de um fluxo conhecido de ar passando através das câmaras (Freijer & Bouten, 1991). A escolha do método a ser utilizado depende principalmente da disponibilidade de recursos e equipamentos.

2.7. BIODIVERSIDADE E MULTIFUNCIONALIDADE: ECOLOGIA APLICADA

A multifuncionalidade é uma visão contemporânea a respeito do papel dos processos produtivos além da produção econômica, englobando atribuições como a promoção da segurança alimentar, manutenção do tecido social e cultural, preservação ambiental (Bonnal et al., 2013) e da biodiversidade (Marsden et al., 2008). No escopo ambiental, diz respeito a presença de biodiversidade funcional que contribui significativamente para a obtenção simultânea de múltiplas funções ecossistêmicas (Finney et al., 2016).

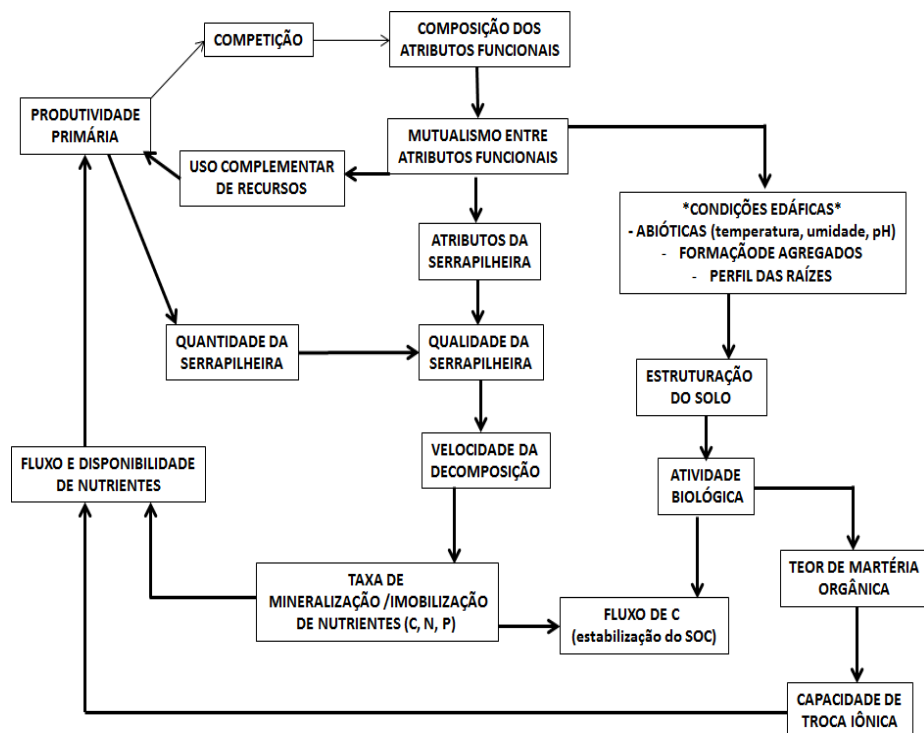
Assim, nota-se que a multifuncionalidade da biodiversidade está intimamente relacionada à manutenção dos processos que possibilitam a vida na Terra como a conhecemos. Compreender a relação das diferenças e semelhanças funcionais e o funcionamento dos ecossistemas permite aplicar a ecologia nos sistemas de produção de forma a torna-los mais eficientes em termos de produção e geração de serviços ecossistêmicos com melhor aproveitamento dos processos ecológicos associada à redução do uso de insumos externos.

Plantas com diferentes estratégias adaptativas, ou seja, diferentes atributos funcionais, interferem de maneira distinta no ritmo de crescimento dos indivíduos, no acúmulo de serapilheira, na mineralização da matéria orgânica, na retenção de nutrientes no ecossistema, na competição e cooperação entre os indivíduos e etc. Espécies com diferentes medidas de atributos são mais propensas a ocupar nichos distintos e, portanto, utilizar os recursos disponíveis no ambiente (água, luz, nutrientes) de forma complementar, quando comparadas com espécies que são semelhantes umas às outras, que por sua vez, competem por tais recursos (Lavorel & Garnier, 2002), interferindo fortemente nos processos associados ao funcionamento dos ciclos biogeoquímicos.

A composição dos atributos funcionais - identidade funcional - refletida pelos valores médios para cada atributo ponderado pela sua abundância relativa dentro da comunidade (Garnier *et al.*, 2004), assim como a variação dos atributos funcionais

das espécies vegetais - diversidade funcional (Tilman, 2001) - , relacionada à resposta da produção de serrapilheira, atividade biológica do solo, disponibilidade de nutrientes (Figura 2) e outros processos, se mostra fundamental no planejamento e gestão eficientes dos agroecossistemas. Como visto, conhecer os atributos funcionais e sua dinâmica pode explicar tanto como as plantas afetam o ambiente - atributos de efeito -, quanto como diferentes fatores do ambiente distinguem espécies vegetais que possuem determinadas medidas de atributos - atributos de resposta (Lavorel & Garnier, 2002). A compreensão da relação dos atributos com os processos biogeoquímicos permite um manejo efetivo dos processos biológicos nas atividades de conservação ambiental e de produção agrícola, fortalecendo a geração de serviços ecossistêmicos (Faucon et al., 2017; Shipley, 2016; Garnier & Navas, 2012).

Figura 2 - Fluxograma causal representando a influência da diversidade funcional vegetal em aspectos de produção de serrapilheira, atividade biológica e disponibilidade de nutrientes. A sigla SOC representa o carbono.



Fonte: elaborada pela autora (BORGES, 2019).

Na teia de relações presente na Figura 2 observa-se que a combinação de atributos funcionais diferentes ou semelhantes expressa relações de competição ou

uso complementar dos recursos, afetando diretamente a produtividade primária, a produção de serrapilheira e, conseqüentemente, as condições edáficas. A eficiência da atividade biológica na velocidade de decomposição da serrapilheira está intrinsecamente relacionada à sua quantidade e qualidade com efeito na taxa de mineralização/imobilização de nutrientes, por sua vez, na disponibilidade dos mesmos na solução do solo (Cunha et al., 2018; Da Silva et al., 2017; De Freitas et al., 2016). A temperatura, umidade e pH do solo, assim como a formação de agregados são afetados pela cobertura vegetal viva e morta e por suas peculiaridades, e, juntamente às relações da serrapilheira, reflete efeitos mútuos com a atividade biológica na microbiota. Esses processos têm forte influência no fluxo de carbono e teor de matéria orgânica, por sua vez na capacidade de troca catiônica afetando a nutrição vegetal, ou seja, a produtividade primária. Assim nota-se que a composição funcional e suas diferentes combinações existentes em uma comunidade vegetal tem forte influência nos processos ecossistêmicos ali decorrentes.

3. OBJETIVOS

3.1. GERAL

Avaliar a resposta da massa acumulada de serrapilheira e da respiração basal à identidade e a diversidade funcionais de plantas cultivadas em um SAF.

3.2. ESPECÍFICOS

- Identificar quais atributos funcionais estão mais associados às variáveis a serem mensuradas nos elementos serrapilheira (massa seca acumulada) e solo (respiração basal).

- Avaliar se há diferença na massa de serrapilheira acumulada e na respiração basal entre os tratamentos com diferentes níveis de diversidade funcional.

- Averiguar se diferenças nos extratos (hábitos de crescimento) produzem diferenças na massa de serrapilheira acumulada e se essas, por sua vez, refletem na respiração basal.

4. HIPÓTESE

Sistemas agroflorestais cultivados em consórcios com plantas com diferentes hábitos de crescimento de alto e de baixo N foliar (diferentes composições funcionais), propiciam maior produção de biomassa com efeitos no acúmulo de serrapilheira e na respiração basal.

5. METODOLOGIA

5.1. CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO

O experimento alvo da pesquisa foi implantado em novembro de 2016 e está localizado na unidade experimental do Centro de Ciências Agrárias da Universidade Federal de Santa Catarina, Fazenda Ressacada, em Florianópolis, SC, às coordenadas 27° 41' 7" S e 48°32' 38,81". O clima da sub-região, segundo a classificação climática de Köppen, é subtropical constantemente úmido, sem estação seca e com verão quente. De acordo com os dados obtidos de 2008 a 2016 na estação meteorológica do Aeroporto Internacional de Florianópolis (Hercílio Luz), a temperatura média anual situa-se em torno de $21 \pm 4^\circ\text{C}$, com precipitação média anual de 1415 ± 435 mm.

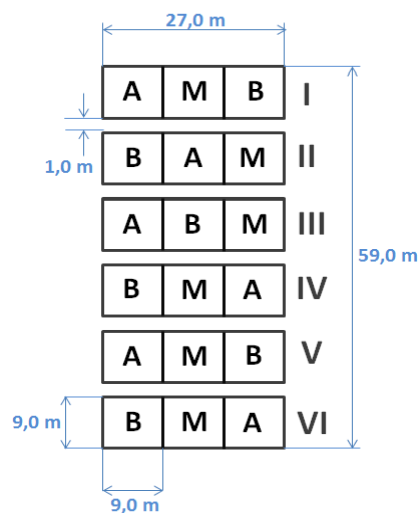
O solo da área foi classificado como Neossolo Quartzarênico Hidromórfico Típico (Sistema Brasileiro de Classificação dos Solos – EMBRAPA, 2006), um solo jovem, pouco intemperizado, incipiente, tendo como material de origem minerais félsicos com alto teor de silício e alumínio em sua composição, portanto, de baixa fertilidade natural e arenoso, com predominância de macroporos, apresentando facilidade na infiltração da água e baixa capacidade de retenção da mesma, sendo assim mal drenado e, ainda, próximo ao lençol freático. Trata-se de um solo pobre, logo sua fertilidade é fortalecida pela existência da serrapilheira.

A área que abriga o experimento é plana e possui 1.611,45 m². Anteriormente era utilizada para cultivo de arroz convencional. Em outubro de 2016, antes da instalação do experimento, foi realizado manejo com enxada rotativa para efetuar o controle das plantas espontâneas.

5.2. DELINEAMENTO DO EXPERIMENTO

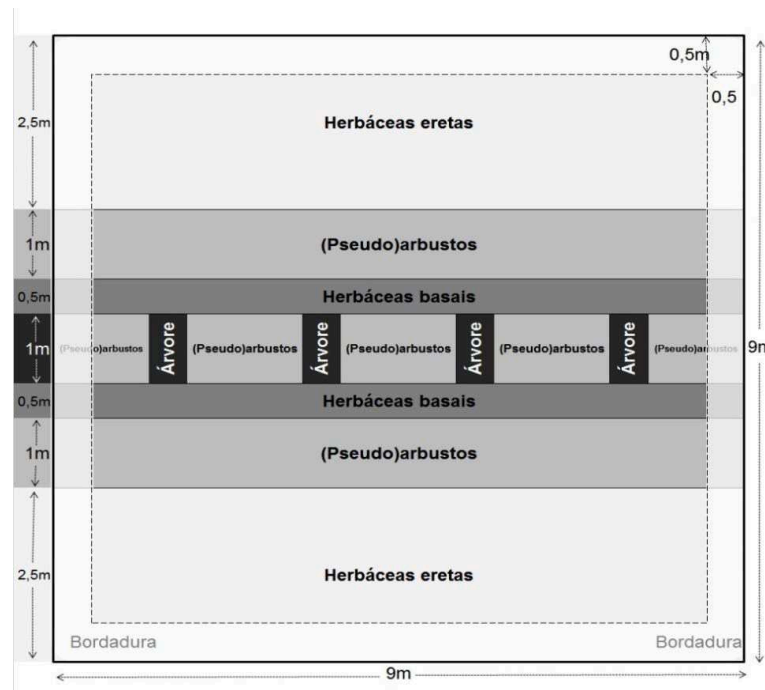
O delineamento experimental se apresenta em Blocos Completos Casualizados (RCBD), sendo estes seis, abrigando três tratamentos presentes em parcelas de 9 x 9 metros com 0,5 metros de bordadura (64 m² de área útil) como ilustra a Figura 3. Com intuito de avaliar os efeitos da diversidade funcional, independente dos efeitos da riqueza de espécies, esta última foi mantida constante no planejamento do agroecossistema. Logo, cada tratamento possui em sua composição oito espécies de plantas com diferentes hábitos de crescimento: árvores, herbáceas basais, arbustos e herbáceas eretas. Em cada parcela, foi realizado o plantio dos indivíduos em aleias dispostas de acordo com a forma de crescimento, das extremidades para o centro, respectivamente para herbáceas eretas, arbustos, herbáceas basais e árvores (Figura 4). Devido à complexidade do sistema, há grande variação temporal nas necessidades de manejo, com isso, a disposição espacial adotada tem a finalidade de facilitar operacionalmente a condução do SAF.

Figura 3 – Esquema representativo da disposição espacial e dimensões das parcelas, blocos – apresentados em numerais romanos – e dos tratamentos experimentais distribuídos na área de estudo. As letras presentes dentro das parcelas representam os tratamentos de alto (A), médio (M), e baixo (B) N-foliar.



Fonte: elaborada pela autora (BORGES, 2019).

Figura 4 – Distribuição e dimensões das aleias de acordo com os hábitos de crescimento das espécies vegetais cultivadas na parcela experimental.



Fonte: equipe do Laboratório de Ecologia Aplicada (CCA-UFSC), 2017.

O atributo funcional escolhido para caracterizar os tratamentos é o teor de nitrogênio foliar (N-foliar). O tratamento 1 possui baixa diversidade funcional, ou seja, é composto por 8 espécies semelhantes com alta concentração de N-foliar (>2,5%). O tratamento 2, também de baixa diversidade funcional, possui 8 espécies semelhantes porém com baixa concentração de N-foliar (<2,5%). O tratamento 3 também possui 8 espécies, porém com diferentes níveis de atributos funcionais, ou seja, alta diversidade funcional, consorciando quatro espécies de plantas com alto teor de N-foliar e quatro espécies com baixa concentração de N-foliar (Tabela 1). Ao todo, mesmo com a rotação de culturas, estão sempre presentes 16 espécies no sistema. Para realização do plantio foi considerada a densidade ótima para cada cultura com a intenção de produzir o máximo de biomassa possível sem que haja limitações por propágulos.

O SAF em questão é sucessional, ou seja, há sucessão de espécies ao longo do tempo refletindo em diferentes dinâmicas de manejo. A rotação de culturas acontece para as herbáceas eretas como pode ser visto na Tabela 2. A escolha das espécies presentes na área é baseada principalmente no ritmo e hábito de

crescimento, na dinâmica de poda, nas concentrações de N-foliar e na tolerância ao excesso hídrico.

Tabela 2 – Espécies utilizadas na composição dos tratamentos e seus respectivos hábitos de crescimento e teor de N-foliar.

Espécies	Hábitos de crescimento	% N-foliar	Tratamentos
- Araçá (<i>Psidium cattleianum</i>)	Árvores	Baixo	B
- Castanheira-da-praia (<i>Pachira glabra</i>)		Baixo	B e M
- Ingá (<i>Inga sp</i>)		Alto	A e M
- Grandiúva (<i>Trema micrantha</i>)		Alto	A
Cana (<i>Saccharum sp</i>)	(Pseudo) Arbustos	Baixo	B
Capim-elefante (<i>Pennisetum purpureum</i>)		Baixo	B e M
Guandu (<i>Cajanus cajan</i>)		Alto	A e M
Banana (<i>Musa sp.</i>)		Alto	A
Capim-limão (<i>Cymbopogon citratus</i> (Stapf))	Herbáceas Basais	Baixo	B
Espinafre-neozelandês (<i>Tetragonia tetragonioides</i>)		Baixo	B e M
Amendoim forrageiro (<i>Arachis pintoi</i>)		Alto	A e M
Batata doce (<i>Ipomoea batatas</i>)		Alto	A
Sorgo (<i>Sorghum bicolor</i> L. Moench)	Herbáceas Eretas	Baixo	B
Milho (<i>Zea mays</i>)		Baixo	B e M
Feijão de porco (<i>Canavalia ensiformis</i> (L.) DC)		Alto	A e M
Crotalária (<i>Crotalaria juncea</i>)		Alto	A
Sorgo (<i>Sorghum bicolor</i> L. Moench)		Baixo	B
Aveia (<i>Avena strigosa</i>)		Baixo	B e M
Ervilhaca (<i>Vicia cracca</i>)		Alto	A e M
Nabo (<i>Brassica rapa</i> L.)		Alto	A
Capim sudão (<i>Sorghum sudanense</i>)		Baixo	B
Capim Tanzânia (<i>Panicum maximum</i>)		Baixo	B e M
Crotalária (<i>Crotalaria juncea</i>)		Alto	A e M
Ararutão (<i>Canna edulis</i>)		Alto	A

*Tratamentos: A- todas as espécies presentes possuem alto N-foliar; B – apenas espécies com baixo N-foliar; M – espécies de alto e baixo N-foliar consorciadas.

5.3. COLETA DE DADOS E PROCEDIMENTOS DE ANÁLISE

Os sete atributos funcionais que juntos captam a essência da função e forma das plantas, refletindo assim suas diferentes estratégias adaptativas, foram determinados com base em protocolos padronizados (Pérez-Harguindeguy *et al.*, 2013; Tedesco *et al.*, 1995), são eles: área foliar (mm^2); área foliar específica ($\text{mm}^2.\text{mg}^{-1}$); conteúdo de matéria seca da folha (mg.g^{-1}); altura da planta adulta (m); densidade específica do caule (g.cm^{-3}); pH foliar e teor de N foliar (%). Todas as espécies cultivadas no experimento tiveram esses atributos determinados coletivamente pela equipe do Laboratório de Ecologia Aplicada (LEAP), da Universidade Federal de Santa Catarina.

Os elementos do sistema que refletem os processos biogeoquímicos a serem avaliados no presente estudo e englobam as variáveis a serem estudadas são: massa seca da serapilheira e respiração basal (Tabela 3). Os dados foram coletados nas parcelas de forma estratificada de acordo com os diferentes hábitos de crescimento.

Tabela 3 – Variáveis a serem relacionadas à ecologia funcional e forma de amostragem.

Elementos do sistema	Variáveis (unidades)	Amostragem (nº unidades dentro da parcela)*
SERRAPILHEIRA	Massa seca acumulada (kg m^{-2})	Quadros conforme a ocupação estratificada das espécies na área
ATIVIDADE BIOLÓGICA	Respiração basal ($\text{g CO}_2 \text{ m}^2 \text{ h}^{-1}$)	Número de pontos de coleta conforme a ocupação estratificada das espécies na área

*O número de amostras coletadas varia de acordo com os hábitos de crescimento das plantas cultivadas, compondo amostras estratificadas.

Para coleta da serapilheira foram utilizados quadros com diferentes dimensões de acordo com as formas de crescimento e a densidade de plantio das mesmas (quadro de 0,5 m x 0,5 m para as herbáceas eretas; quadro de 0,375m x 0,375 m para os arbustos; quadro de 0,25 x 0,25 m para as herbáceas basais), sendo uma amostra por hábito e por parcela representando linha e entrelinha. No caso das herbáceas eretas obteve-se uma amostra por espécie, já que estas

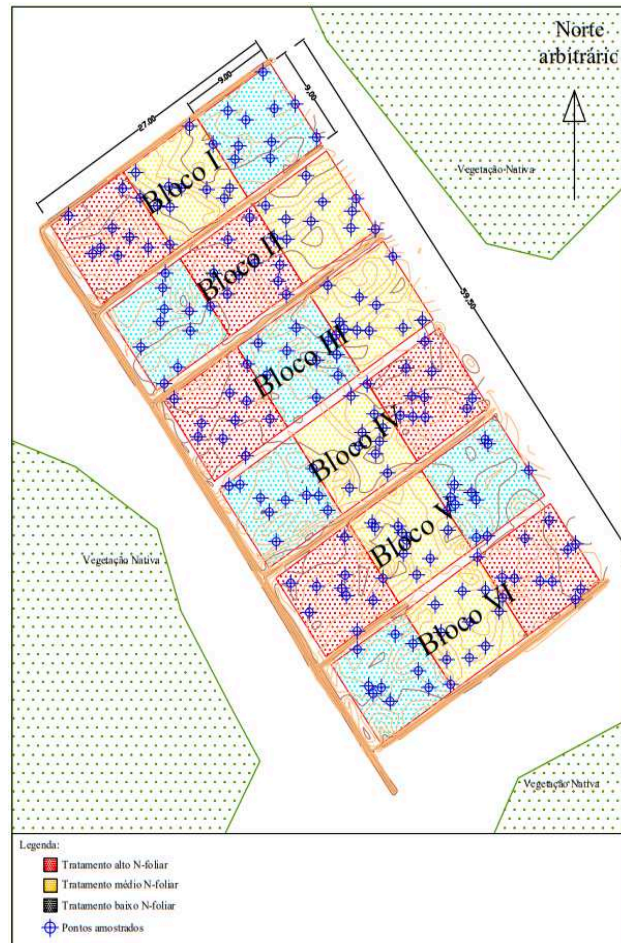
encontram-se dispostas em linhas puras. As árvores, por estarem muito juvenis, não foram contempladas nessa avaliação, assim, ao todo obteve-se 54 amostras considerando todos esses três hábitos de crescimento. A massa de serrapilheira acumulada foi dada em kg m^{-2} , a qual foi determinada após secagem na estufa a 60°C até a obtenção de massa constante (Lavorel *et al.*, 2008).

Para avaliação da respiração basal foram escolhidos aleatoriamente pontos de medição de forma estratificada de acordo com as formas de crescimento e a densidade de plantio das espécies cultivadas, sendo 4 pontos por tratamento no extrato ocupado pelas herbáceas eretas e 2 pontos por tratamento por hábito nos demais extratos, totalizando 10 pontos por parcela, totalizando 180 medições em todo o experimento (nessa investigação as árvores foram inclusas). Foi realizada uma caracterização microtopográfica da área em questão a fim relacionar seus resultados com os obtidos nas avaliações edáficas possibilitando uma melhor captura dos efeitos da diversidade funcional na dinâmica do solo, como ilustra a Figura 5. As cotas de elevação foram obtidas por interpolação de um levantamento microtopográfico realizado previamente (por Álvaro Monteiro, LEAP –TCC, 2018).

A determinação da respiração basal foi realizada por meio do analisador de gás infravermelho instalado em campo, (IRGA) LI-64000 (LI-COR, Lincoln, NE, USA), um sistema portátil que mede o efluxo dos gases por ondas de infravermelho, usando as taxas de incremento da concentração de CO_2 na superfície do solo (Haynes & Gownner, 1995), como pode ser visto na Figura 6A. A evolução do CO_2 como medição da respiração, representa então uma medida da decomposição total. Vários fatores como temperatura, umidade, profundidade do solo, aeração e tipo de populações microbianas determinam o fluxo de CO_2 , e, portanto, a atividade microbiana. Logo, como elucidado por Parkin *et al.* (1996), a informação obtida por meio da respiração basal deve ser e será interpretada junto à outros parâmetros que auxiliem o entendimento dos processos que acontecem no solo.

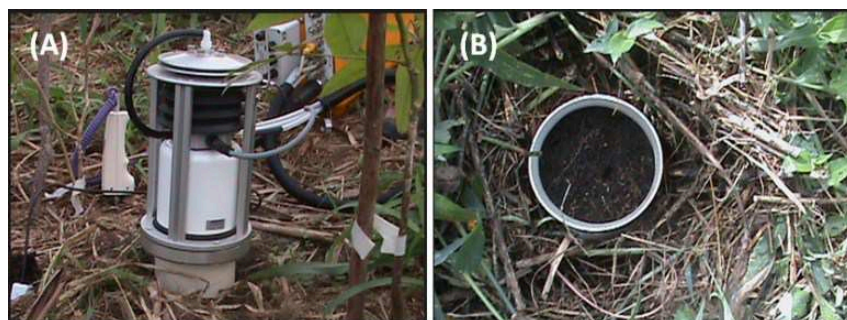
Sabe-se que taxas respiratórias do solo são extremamente sensíveis a alterações em sua superfície, logo, para a mensuração da RB os colarinhos suporte para o equipamento (Figura 6B) foram colocados no solo delicadamente, com o mínimo de movimentação possível, e permaneceram intocados por 2 horas, período considerado suficiente para uma estabilização das perturbações produto de sua inserção, para então terem início as leituras do efluxo de CO_2 .

Figura 5 – Pontos de coleta da respiração basal plotados sobre o levantamento microtopográfico da área experimental.



Fonte: Monteiro (2018).

Figura 6 – Equipamento de medida do efluxo dos gases do solo em campo. (A) Analisador infra-vermelho (IRGA) instalado junto aos sensores de temperatura e umidade do solo. (B) Colarinho suporte para instalação do IRGA.



Os dados para serrapilheira foram extrapolados das diferentes áreas dos quadros de coleta para kg m^{-2} . O cálculo da massa seca de serrapilheira acumulada (MS) total para os tratamentos, considerando todas as repetições, foi calculada de acordo com a ocupação estratificada dos hábitos na parcela, lembrando que as arbóreas foram desconsideradas nessa avaliação por estarem muito juvenis. Para cada hábito separadamente, obteve-se:

$$\text{Serap}_{\text{Hábitos}} (\text{kg MS m}^{-2}) = \text{MS total (kg MS)} / \text{área do quadro}$$

Onde:

Área do quadro HE: $0,25\text{m}^2$;

Área do quadro ARB: $0,141\text{m}^2$;

Área do quadro HB: $0,0625\text{m}^2$

Para cada parcela, obteve-se a média ponderada:

$$\begin{aligned} \text{Serap}_{\text{Parcela}} (\text{kg MS m}^{-2}) = & \\ & [(\text{Serap}_{\text{HE}} * \text{FA}_{\text{HE}} * \#F_{\text{HE}}) \\ & + (\text{Serap}_{\text{ARB}} * \text{FA}_{\text{ARB}} * \#F_{\text{ARB}}) \\ & + (\text{Serap}_{\text{HB}} * \text{FA}_{\text{HB}} * \#F_{\text{HB}})] / 81 \text{ m}^2 \end{aligned}$$

Onde:

FA_{HE} (m^2/faixa) = área atribuída à faixa de HE representada pelo quadro de coleta, ou seja, comprimento da parcela (9 m) * largura da faixa conforme croqui de implantação (nesse caso 2,5 m). Logo, $9 * 2,5 = 22,5 \text{ m}^2$ para cada lado da parcela.

FA_{ARB} = área atribuída à faixa de ARB representada pelo quadro de coleta, ou seja, comprimento (9 m) * largura da faixa conforme croqui de implantação (nesse caso 1 m). Logo, 9 m^2 para cada lado da parcela.

FA_{HB} = área atribuída à faixa de HB representada pelo quadro de coleta, ou seja, comprimento (9 m) * largura da faixa conforme croqui de implantação (nesse caso 0,5 m). Logo, $4,5 \text{ m}^2$ para cada lado da parcela.

$\#F$ ($\text{N}^\circ/\text{parcela}$) = número de faixas por hábito por parcela: $\#F_{\text{HE}} = 2$; $\#F_{\text{ARB}} = 2$;

$\#F_{\text{HB}} = 2$.

Para quantificação da RB, as leituras obtidas pelo IRGA passaram por pequenas correções de acordo as leituras em branco realizadas com o equipamento momentos antes do início das medições. Os pontos de coleta foram distribuídos entre os diferentes hábitos de crescimento considerando sua ocupação estratificada na parcela, com isso, a partir das leituras aferidas obteve-se a média aritmética de RB ($\text{g CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ h}^{-1}$) para cada hábito de crescimento e para a parcela como um todo.

5.4. QUANTIFICAÇÃO DA IDENTIDADE E DIVERSIDADE FUNCIONAIS

No cálculo da identidade e diversidade funcionais as abundâncias relativas das espécies cultivadas dentro da comunidade foram baseadas em suas biomassas acumuladas.

As biomassas acumuladas foram coletadas e quantificadas pela equipe do LEAP. Para tal foram realizadas coletas de duas amostras de cada espécie por parcela, quando os primeiros sinais de suas fases reprodutivas apareceram, ou seja, quando os primeiros botões florais foram avistados. Houve aleatorização nas linhas de plantio de acordo com a disposição dos diferentes estratos presentes em cada tratamento. Para as herbáceas basais e eretas o ponto aleatorizado foi marcado com um gabarito (quadro de PVC) de 0,5 m x 0,5 m e coletada toda biomassa existente nessa área. Para os arbustos o gabarito utilizado foi de 1 m, e coletada toda biomassa disposta nessa delimitação linear. As arbóreas, ainda muito juvenis, tiveram sua biomassa estimada com auxílio de uma equação alométrica estudada por Brown et al. (1989), onde:

$$\text{Biomassa} = f * s * \text{Ab} * h$$

Onde:

f = fator de forma (foi assumido um valor de 0,7);

s = diâmetro da base

Ab = área basal;

h = altura da planta.

Assim, de posse dos dados referentes aos sete atributos funcionais avaliados nas espécies cultivadas e de suas biomassas acumuladas, as identidades funcionais das mesmas foram quantificadas por meio da média ponderada da comunidade (CWM: *community weighted mean*) – índice obtido tomando o valor médio para um

determinado atributo ponderado pela sua abundância relativa dentro da comunidade (Garnier *et al.*, 2004) - de cada atributo, com auxílio do pacote “FD” do *software* R Statistics (R Core Team, 2016; Laliberte & Legendre, 2010). As diversidades funcionais dos diferentes tratamentos foram calculadas por meio desse mesmo pacote.

Como visto anteriormente, muitos pesquisadores apostam nesse índice como um bom representante das diferenças funcionais, além disso, os outros índices que utilizam o hipervolume para calcular a diversidade demandam ao menos três espécies para ter resultados, já o índice RaoQ gera resultados com duas espécies. Como os consórcios presentes em cada hábito de crescimento no SAF experimental contam com duas espécies, fez-se uso do índice de Rao (RaoQ) para representação da diversidade funcional.

5.5. CONSIDERAÇÕES IMPORTANTES

Houve uma diferença temporal entre as coletas de dados para mensuração da quantidade de serrapilheira e da respiração basal. As coletas de serrapilheira se deram em dois momentos, um em maio de 2017 (momento T1) e outro em setembro do mesmo ano (momento T2), e a avaliação da respiração basal em campo ocorreu em junho de 2018. Como se trata de um SAF sucessional, a composição de espécies cultivadas presentes na época de cada coleta era diferente. Logo, para determinar os valores de CWM e os índices de diversidade funcional foram utilizados atributos das espécies relativas a cada momento. Portanto tem-se a quantificação da identidade e diversidade funcionais para a primeira e segunda coleta de serrapilheira e para respiração basal, separadamente, como pode ser melhor observado na Tabela 4, onde os espaços hachurados em cinza indicam presença da espécie nos cálculos de CWM e RaoQ referentes às respectivas coletas. Observa-se que o espinafre foi desconsiderado pois não houve sucesso em seu estabelecimento nas condições do SAF experimental.

O SAF passou por muitas atividades de manejo até as coletas de dados que representam os processos ecossistêmicos avaliados. Na Figura 7 tem-se uma linha do tempo contendo as informações de manejo relevantes para a discussão do presente estudo. Nela observa-se que a coleta de serrapilheira no momento T1 foi realizada pouco antes da roçada das HE, e que no momento T2 o SAF já havia

passado por essa rotação da HE, as quais posteriormente sofreram nova roçada para nova rotação. Todos os resíduos de podas e roçadas foram depositados nas respectivas parcelas.

Tabela 4 – Espécies consideradas nos cálculos da identidade e diversidade funcionais nos diferentes momentos de coleta de dados (cinza: presente; branco: ausente).

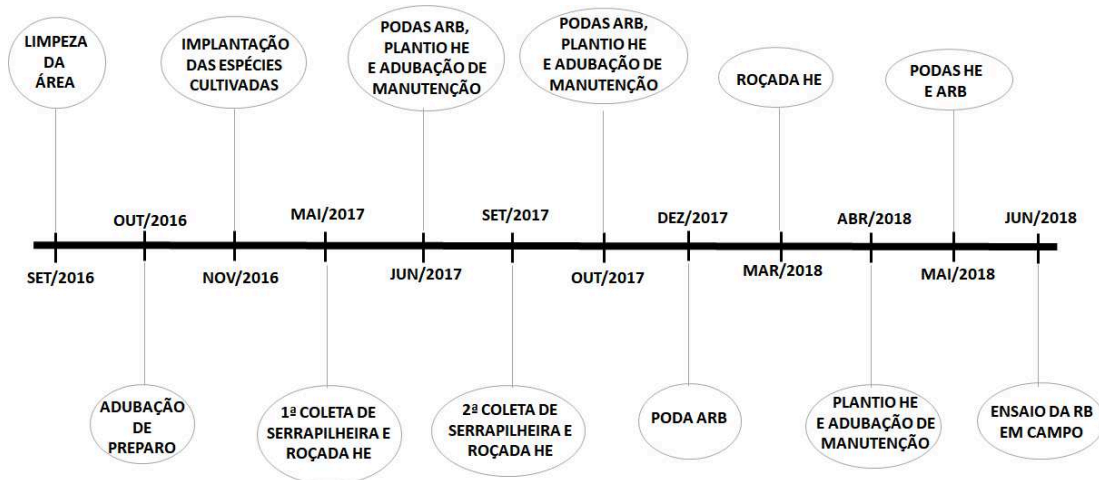
Espécies	Nome comum	Sigla	MS (T1)	MS (T2)	RB
<i>Arachis pintoii</i>	Amendoim forrageiro	ARApin			
<i>Avena strigosa</i>	Aveia preta	AVEstr			
<i>Cajanus cajan</i>	Feijão guandu	CAJcaj			
<i>Canavalia ensiformis</i>	Feijão de porco	CANens			
<i>Cymbopogon citratu f</i>	Capim limão	CYMcit			
<i>Inga marginata</i>	Ingá	INGsp			
<i>Ipomoea batatas</i>	Batata doce	IPObat			
<i>Musa spp.</i>	Banana	MUSsp			
<i>Pachira glabra</i>	Castanheira da praia	PACgla			
<i>Pennisetum purpureum</i>	Capim elefante	PENpur			
<i>Psidium cattleianum</i>	Araçá	PSlcat			
<i>Raphanus raphanistrum</i>	Nabo forrageiro	RAPrap			
<i>Saccharum officinarum</i>	Cana-de-açúcar	SACoff			
<i>Sorghum bicolor</i>	Sorgo	SORbic			
<i>Tetragonia tetragonioides</i>	Espinafre	TETtet			

Continuação da **Tabela 4** – Espécies consideradas nos cálculos da identidade e diversidade funcionais nos diferentes momentos de coleta de dados (cinza: presente; branco: ausente).

<i>Trema micrantha</i>	Grandiúva	TREmic			
<i>Vicia sativa</i>	Ervilhaca	VICsat			
<i>Crotalaria spectabilis</i>	Crotalária	Cspect.			
<i>Zea mays</i>	Milho	Zea			
<i>Sorghum sudanense</i>	Capim sudão	Ssud			
<i>Crotalaria juncea</i>	Crotalária	Cjunc			
<i>Panicum maximum</i>	Capim Tanzânia	Tanz			
<i>Canna edulis</i>	Ararutão	Cedul			

Onde, MS (T1): primeira coleta de serrapilheira; MS (T2): segunda coleta de serrapilheira; e RB: espécies presentes até a rotação de inverno das HE mais recente em relação ao momento da coleta.

Figura 7 – Linha do tempo contendo as principais atividades de manejo realizadas no SAF experimental relevantes na discussão do presente estudo.



5.6. ANÁLISES ESTATÍSTICAS

Para testar a hipótese levantada, foram realizadas análises de dependência, como variância e regressão, entre os procedimentos biogeoquímicos que interferem no agroecossistema e efeitos das preditoras, a partir de modelos lineares de efeitos mistos (Linear Mixed-Effects Models – LME), os quais possibilitam realizar a

predição de efeitos fixos, na presença de efeitos aleatórios (Camarinha Filho, 2003). Os efeitos aleatórios presentes são decorrentes do delineamento experimental que aninha parcelas (P) em blocos (BL), fato considerado na construção dos modelos com uso do *random* (random=BL/P). A detecção dos efeitos significativos se deu por meio de análises de variância (ANOVAs) nas quais foi utilizada a soma de quadrados Tipo III, indicada para testes de hipóteses sobre médias não ponderadas (Nakano, 2004), ou seja, a soma de quadrados da regressão foi particionada em componentes marginais com um grau de liberdade, de forma que a ordem das variáveis preditoras não interfere no resultado final. Para comparação de médias foi utilizado o teste de Tukey com significância de 0,05. Todas as quantificações descritivas e testes multivariados foram realizados com auxílio do *software R Statistics* (R Core Team, 2016). No presente estudo o diagnóstico de heterocedasticidade foi feito a partir da observação de gráficos que relacionam valores ajustados e resíduos do modelo. Foi detectado certo nível de colinearidade e heterocedasticidade entre os dados, e utilizou-se do comando 'weights(varPower)' que reduz esse padrão.

5.6.1. Modelos mistos testados

As variáveis respostas, preditoras e as covariáveis que auxiliaram na identificação dos efeitos de causalidade a serem investigados estão dispostas na Tabela 5. Na avaliação da RB a MS aparece também como uma variável preditora. Para avaliação de cada variável resposta (RB e MS) três principais perguntas foram consideradas: (1) qual o efeito dos tratamentos e hábitos de crescimento? (2) quais atributos funcionais apresentam efeito e qual a direção do efeito? (3) qual o efeito da diversidade funcional?

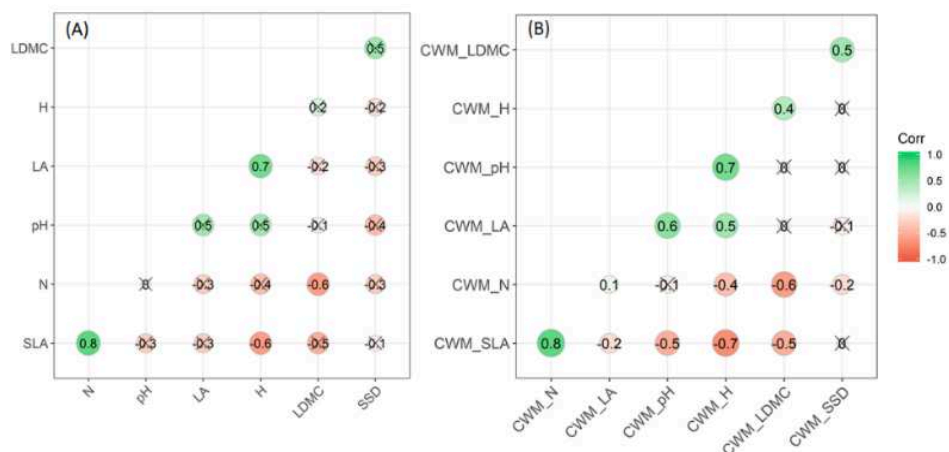
É importante ressaltar que a resposta a essas perguntas envolve medidas que refletem processos fisiológicos complexos, logo, as variáveis preditoras presentes nos modelos testados que representam a composição funcional são interdependentes, se mostrando assim correlacionadas (Figura 8), onde as correlações de maior notoriedade envolvem área foliar específica, pH, altura, conteúdo de matéria seca da folha, teor de N foliar e densidade do caule. Portanto, para avaliação de seus efeitos em MS e RB, foram testados individualmente nos

modelos junto às covariáveis utilizadas e considerando os efeitos aleatórios das parcelas (P) e blocos (BL) presentes no delineamento experimental.

Tabela 5 – Variáveis presentes nos modelos estatísticos testados e suas siglas representativas.

Classificação das variáveis	Variáveis	Siglas
RESPOSTA	Massa de serrapilheira acumulada	MS
	Respiração basal	RB
PREDITORAS	Tratamentos	TRAT
	Hábitos de crescimento	HÁB
	Identidade funcional (CWM)	CWM_X
	Índice de diversidade funcional	RaoQ
COVARIÁVEIS	Biomassa das plantas cultivadas	BIOM
	Cotas microtopográficas	COTA

Figura 8 – Correlogramas entre atributos funcionais brutos (A) e índices de identidade funcional (B) mostrando os coeficientes de correlação de Pearson. Os coeficientes marcados em X não foram significantes ($p < 0,05$). CWM: média ponderada da comunidade; N: nitrogênio foliar; LA: área foliar; H: altura da planta; LDMC: conteúdo de matéria seca da folha; SSD: densidade específica do caule.



Assim, na avaliação do efeito dos hábitos de crescimento, dos tratamentos, e da diversidade funcional (perguntas 1 e 3), foram testados os seguintes modelos:

$$\text{MS ou RB} \sim \text{BIOM} + \text{TRAT} + \text{HÁB} + \text{COTA}, \text{ random} = \text{BL/P}$$

$$\text{MS ou RB} \sim \text{BIOM} + \text{RaoQ} + \text{HÁB} + \text{COTA}, \text{ random} = \text{BL/P}$$

Na especulação de quais atributos funcionais apresentam efeito nas propriedades ecossistêmicas avaliadas (pergunta 2) fez-se uso dos valores de CWM para cada atributo (identidade funcional). Nessa etapa cada CWM referente a cada atributo funcional (X) foi alocado em um modelo individual junto às covariáveis. O efeito da serrapilheira na respiração basal também foi testado individualmente. Para melhor entendimento:

$$\text{MS ou RB} \sim \text{BIOM} + \text{CWM}_X + \text{COTA}, \text{ random} = \text{BL/P}$$

$$\text{RB} \sim \text{BIOM} + \text{MS (em T2)} + \text{COTA}, \text{ random} = \text{BL/P}$$

Para todos os modelos, fez-se uso de 'stepwise', ou seja, foram realizadas ANOVAs sequencialmente onde os elementos preditores menos significativos, de maior valor de p, foram sendo retirados um a um até que restasse somente aqueles que demonstraram efeito significativo.

6. RESULTADOS

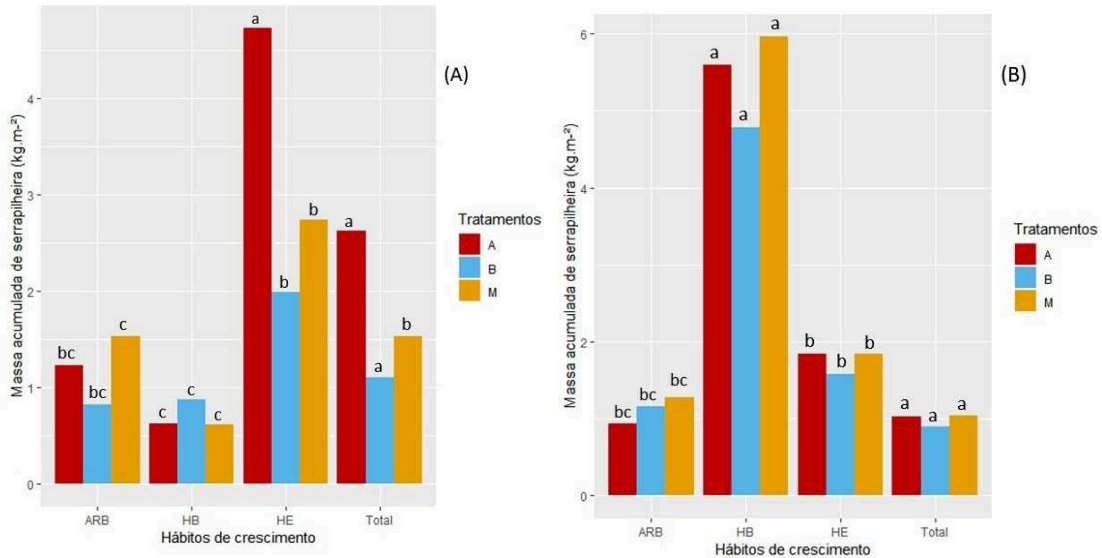
Estão presentes nesse tópico somente os modelos finais e resultados do método 'step wise' realizado, ou seja, aqueles em que todas as variáveis preditoras revelaram-se significativas após sucessivas ANOVAs. Os atributos funcionais área foliar e área foliar específica não se mostraram estatisticamente importantes nos processos ecológicos avaliados, portanto não estão presentes nos resultados. Considerando a diferença temporal nas coletas, como visto anteriormente, os resultados foram exibidos separadamente embasando uma posterior discussão conjunta. A microtopografia não revelou significância estatística em nenhum modelo testado e assim também não está presente nos resultados.

6.1. MASSA DE SERRAPILHEIRA ACUMULADA

Em toda a área experimental o acúmulo de serrapilheira quantificado variou de $0,62 \text{ kg m}^{-2}$ à $5,96 \text{ kg m}^{-2}$. A massa acumulada de serrapilheira (MS) presente nos tratamentos e a contribuição de cada hábito de crescimento que compõe as parcelas do experimento, lembrando que as árvores não foram consideradas na avaliação da serrapilheira, está representada na Figura 9, para T1 (Fig. 9A) e T2 (Fig. 9B). Observa-se que no primeiro momento de coleta (T1) a maior representatividade foi no tratamento de alto N foliar, com $2,73 \text{ kg m}^{-2}$ de MS, quase o dobro do apurado no tratamento de médio N foliar que contou com $1,53 \text{ kg m}^{-2}$. O tratamento de baixo N foliar apresentou $1,11 \text{ kg m}^{-2}$ de serrapilheira aglomerada, sendo o de menor expressão. Nesse cenário as herbáceas eretas foram as maiores concentradoras de serrapilheira, onde no tratamento alto se obteve $4,72 \text{ kg m}^{-2}$ de MS, 21% a mais que o tratamento médio ($2,74 \text{ kg m}^{-2}$) e 29% a mais que o baixo ($1,99 \text{ kg m}^{-2}$). O menor acúmulo de serrapilheira apresentou-se nas faixas das herbáceas basais, onde os tratamentos expressam valores próximos, sendo $0,62 \text{ kg m}^{-2}$ de MS nos tratamentos alto e médio, contra $0,87 \text{ kg m}^{-2}$ no baixo.

No segundo momento de coleta (T2), a massa acumulada de serrapilheira foi semelhante nos diferentes tratamentos, onde o de médio N foliar exibiu $1,04 \text{ kg m}^{-2}$ de MS, seguido do alto com $1,03 \text{ kg m}^{-2}$, e do baixo com $0,89 \text{ kg m}^{-2}$. Nesse contexto, as herbáceas basais se mostraram as maiores colaboradoras para o acúmulo de serrapilheira, com destaque para o tratamento médio que conteve $5,96 \text{ kg m}^{-2}$ de MS, seguido do tratamento alto com $5,60 \text{ kg m}^{-2}$ de MS, e, novamente o tratamento de baixo N foliar expressou menor acúmulo de serrapilheira ($4,79 \text{ kg m}^{-2}$). Nesse momento de coleta, entre os hábitos de crescimento avaliados, o arbustivo se apresentou como menor contribuinte para MS, onde os tratamentos tiveram valores próximos entre si, sendo $0,93 \text{ kg m}^{-2}$ no tratamento alto, $1,17 \text{ kg m}^{-2}$ no baixo e $1,27 \text{ kg m}^{-2}$ no médio.

Figura 9 – Médias de MS por hábito referente aos tratamentos. (A) No momento T1. (B) No momento T2. Onde: ARB = arbustos; HB = herbáceas basais; HE = herbáceas eretas; Total = média ponderada de MS da parcela.



A estatística descritiva das variáveis envolvidas no momento T1 está disposta na Tabela 1a e no momento T2, na Tabela 2a, presentes no anexo I. Constata-se que entre os valores de CWMs dos atributos funcionais a área foliar (LA), o conteúdo de matéria seca da folha (LDMC) e a área foliar específica (LAE) apresentaram maior variância, contribuindo para heterocedasticidade captada nos modelos, a qual foi minimizada com uso do comando 'weights(varPower)', visando modelar não apenas as médias, mas também a variação.

O grau de dispersão dos dados de massa acumulada de serrapilheira nos respectivos hábitos de crescimento e tratamentos estão dispostos nas Figuras 10 e 11, onde se nota que, entre blocos, os dados de MS não portaram grande variação nos diferentes tratamentos, variação a qual se mostrou bastante aparente entre os hábitos de crescimento, em que as herbáceas eretas apresentaram maior média de MS em T1, e as herbáceas basais em T2.

Figura 10 – Diagrama de caixa representando a dispersão dos dados de massa de serrapilheira acumulada nos respectivos hábitos de crescimento (A) em T1 e (B) em T2.

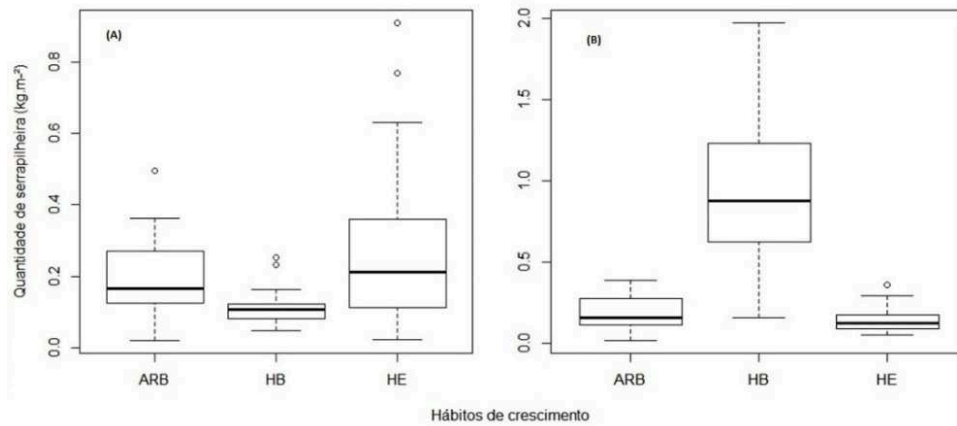
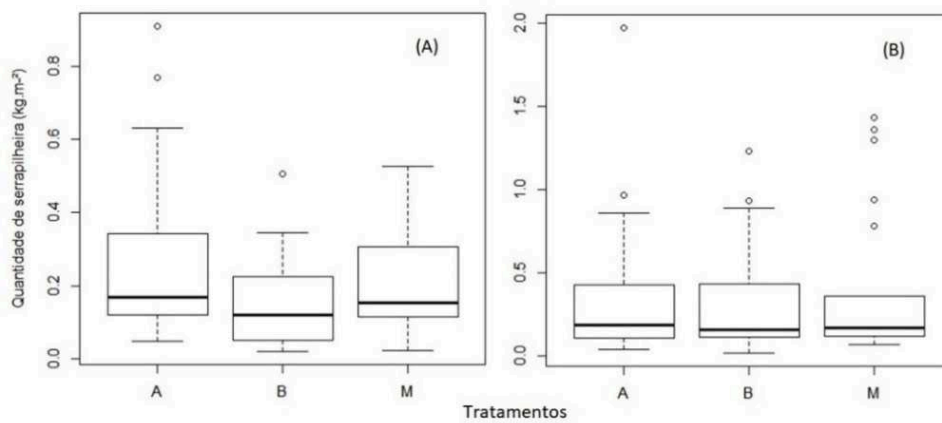


Figura 11 – Diagrama de extremos e quartis representando a dispersão dos dados de massa de serrapilheira acumulada nos respectivos tratamentos, (A) em T1 e (B) em T2.



6.1.1. Efeito dos tratamentos e hábitos de crescimento

Como visto nos métodos (tópico 5.6), após sucessivas ANOVAs chegou-se a modelos finais contendo somente preditoras significativas. A Tabela 6 contém o modelo final e seus respectivos resultados quanto ao efeito dos hábitos de crescimento e tratamentos sobre o acúmulo de serrapilheira nos dois momentos de coleta, maiores detalhes estão descritos nas Tabelas 4a e 5a no anexo II. Em T1, foi

percebido efeito dos tratamentos no acúmulo de serrapilheira, com diferenças mais marcantes entre aqueles que contém somente alto N foliar e os de baixo N foliar. Os hábitos de crescimento também explicitaram efeito em MS, onde as herbáceas eretas e basais pronunciaram diferenças mais notáveis. Já em T2 somente os hábitos de crescimento expressaram efeito significativo na quantidade de serrapilheira acumulada, com principais diferenças entre herbáceas basais, arbustos e herbáceas eretas.

Tabela 6 – Resultados simplificados da avaliação do efeito dos hábitos de crescimento e tratamentos na massa acumulada de serrapilheira.

Época de coleta	Modelo	Preditoras	p-valores
		Tratamentos	0,0364*
T1 (maio, 2017)	MS ~ Tratamentos + hábitos de crescimento	B – A	0,0065 **t
		Hábitos	0,0023**
		HE – HB	0,0007 ***t
T2 (setembro, 2017)	MS ~ Hábitos de crescimento	Hábitos	<,0001***
		HE – HB	<0,001 ***t
		HB - ARB	<0,001 ***t

Onde, MS: massa acumulada de serrapilheira; B: baixo N foliar; A: alto N foliar; HE: herbáceas eretas; HB: herbáceas basais; ARB: arbustos; t: teste de Tukey.

6.1.2. Efeito dos atributos funcionais

Os modelos testados na investigação do efeito da composição funcional do SAF sobre a massa acumulada de serrapilheira, seus valores de AIC e principais resultados estão dispostos na Tabela 7, as Tabelas 6a e 7a, presentes no anexo III, contém maiores detalhes. Verifica-se que a biomassa das plantas cultivadas, o conteúdo de matéria seca de suas folhas, o teor de N foliar, o pH foliar e a altura das plantas mostraram-se importantes. Dentre os atributos avaliados, a área foliar, área foliar específica e a densidade do caule não se mostraram estatisticamente

significativos e, portanto, não aparecem nos resultados. A Figura 12 ilustra a direção dos efeitos dessas preditoras em MS em T1 e a Figura 13 em T2, onde nota-se correlação positiva para biomassa das cultivadas e teor de N foliar, e negativa para as demais variáveis.

Tabela 7 - Resultados simplificados da avaliação do efeito da composição funcional na massa acumulada de serrapilheira.

MODELO	AIC	Valor de p das variáveis preditoras				
		BIOM	CWM_LDMC	CWM_Nf	CWM_pH	CWM_H
MS ~ BIOM	43,93284	0,0038*	-	-	-	-
MS ~ LDMC	31,61895	-	0,0312*	-	-	-
MS ~ BIOM + Nf	41,79066	0,001**	-	0,0172*	-	-
MS ~ BIOM+ pH	64,56106	0,0100*	-	-	0,0231*	-
MS ~ H	31,91712	-	-	-		<,0001***

Onde, MS: massa acumulada de serrapilheira; BIOM: biomassa das plantas cultivadas; CWM: média ponderada da comunidade; LDMC: conteúdo de matéria seca da folha; Nf: teor de N foliar; H: altura.

Figura 12 – Ajustes entre as variáveis com efeitos significativos e a massa acumulada de serrapilheira provenientes da primeira coleta. (A) Relação entre MS e a biomassa acumulada das plantas cultivadas em T1. (B) Relação entre MS e o conteúdo de matéria seca das folhas em T1. (C) Relação entre MS e o teor de N foliar em T1.

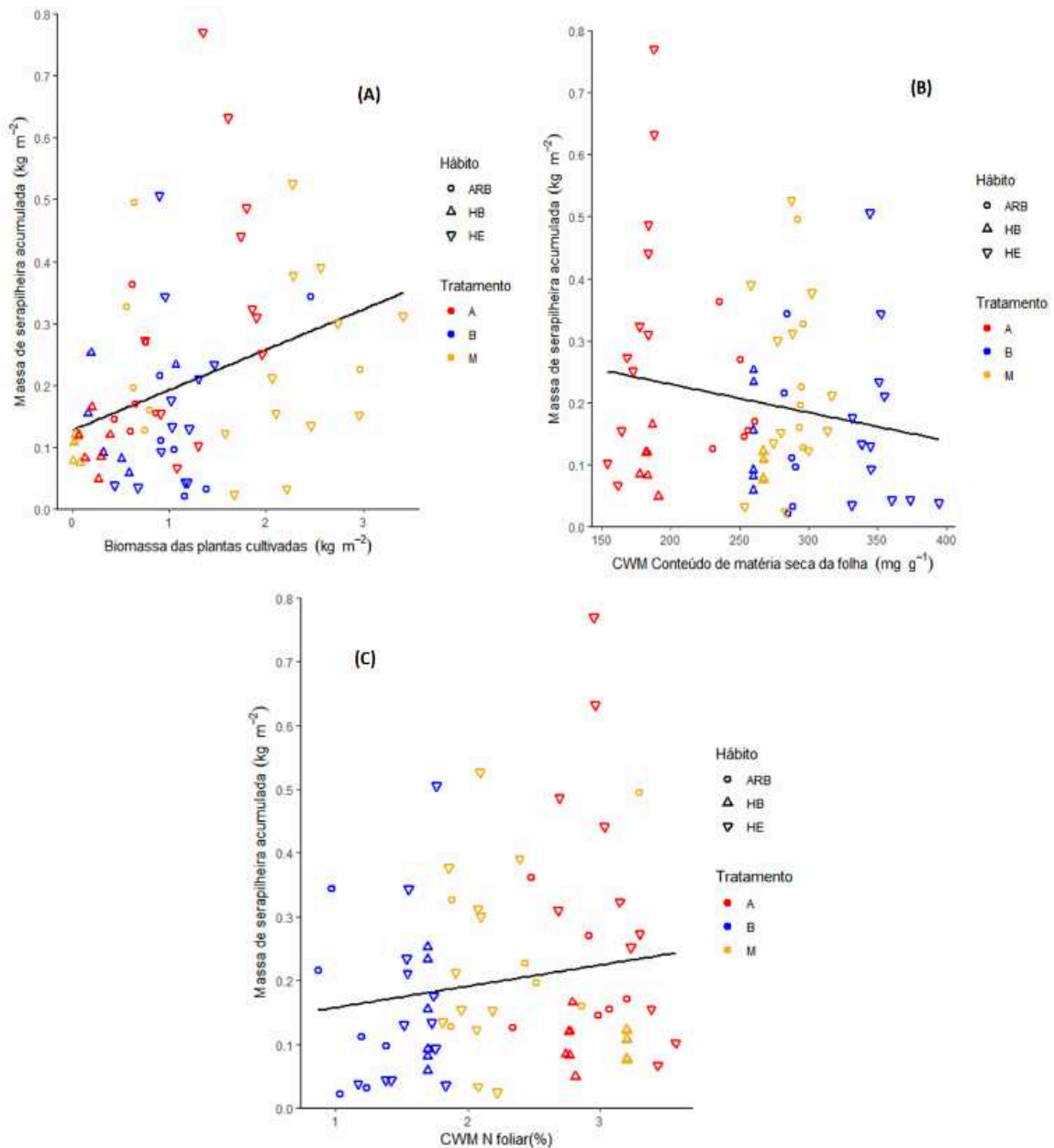
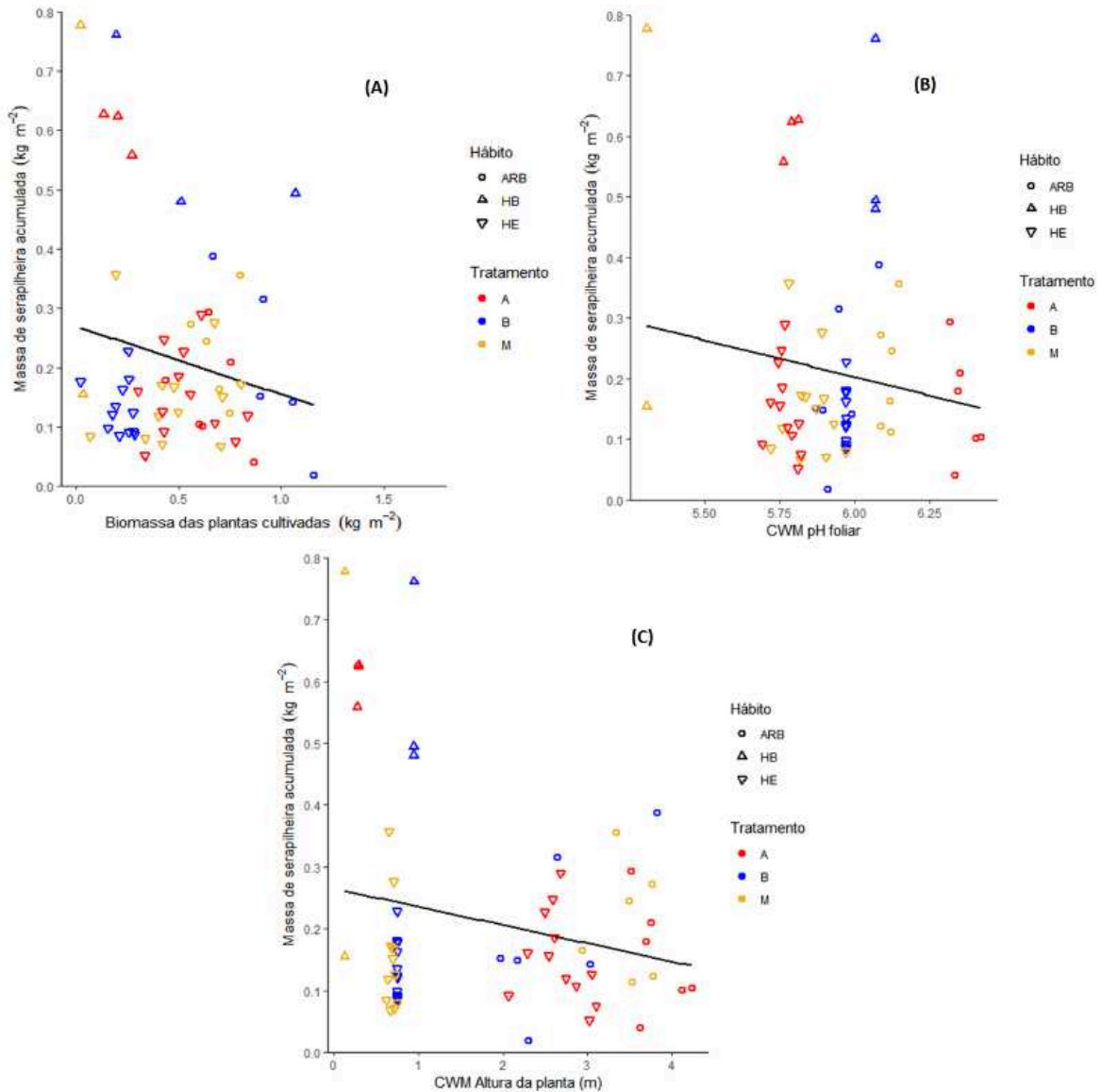


Figura 13 – Ajustes entre as variáveis com efeitos significativos e a massa acumulada de serrapilheira provenientes da segunda coleta. (A) Relação entre MS e a biomassa acumulada das plantas cultivadas em T2. (B) Relação entre MS e o pH foliar em T2. (C) Relação entre MS e a altura das plantas cultivadas em T2.



6.1.3. Efeitos da diversidade funcional

Considerando as faixas dos diferentes hábitos do interior das parcelas como unidades amostrais, tem-se apenas duas espécies para quantificação da diversidade funcional, a qual não mostrou impacto na massa acumulada de serrapilheira. Ao

considerar unidade amostral a parcela como um todo, tendo-se 16 espécies participantes da quantificação da diversidade funcional, também não foi detectado efeito desta na massa acumulada de serrapilheira dos tratamentos. Nessa mesma abordagem foi testado efeito da riqueza funcional (FRic) presente nas parcelas, a qual também não explicitou efeito em MS. Esses resultados estão sintetizados na Tabela 8.

Tabela 8 - Resultados simplificados da avaliação do efeito da diversidade funcional na massa acumulada de serrapilheira.

COLETA	MODELOS	AIC	p-valor
T1	MS ~ RaoQHÁBITOS	- 46,3363	0,0820
	MS ~ RaoQPARCELAS	-5,0724	0,0579
	MS ~ FRic	-9,3846	0,0909
T2	MS ~ RaoQHÁBITOS	- 46,3363	0,0820
	MS ~ RaoQPARCELAS	9,9687	0,4473
	MS ~ FRic	4,2294	0,2318

Onde: RaoQ=índice de Rao; FRic= riqueza funcional; MS= massa acumulada de serrapilheira; T1= primeira coleta; e T2=segunda coleta.

6.2. RESPIRAÇÃO BASAL

Em todo o SAF, as médias de CO₂ emitido pelo solo variaram de 2,44 g CO₂ m⁻² h⁻¹ a 4,89 g CO₂ m⁻² h⁻¹. As taxas de efluxo de CO₂ dos tratamentos e a contribuição de cada hábito de crescimento estão representadas na Figura 14, lembrando que na avaliação da respiração basal (RB) as arbóreas foram contempladas. Nota-se que os tratamentos tiveram médias de RB próximas, com 3,54 g CO₂ m⁻² h⁻¹ no tratamento de alto N foliar, 3,53 g CO₂ m⁻² h⁻¹ no tratamento de baixo N foliar e 3,03 g CO₂ m⁻² h⁻¹ no tratamento médio. As maiores taxas de efluxo de CO₂ foram avistadas na faixa das árvores, onde o valor mais acentuado esteve no tratamento médio (4,89 g CO₂ m⁻² h⁻¹), seguido do tratamento alto com 3,92 g CO₂ m⁻² h⁻¹ e do tratamento baixo com 3,63 g CO₂ m⁻² h⁻¹. As menores taxas de respiração edáfica foram encontradas nas herbáceas basais, nas quais os

tratamentos alto e médio revelaram-se similares com $2,82 \text{ g CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ h}^{-1}$ e $2,84 \text{ g CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ h}^{-1}$ respectivamente, seguidos do tratamento baixo que contou com $2,44 \text{ g CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ h}^{-1}$.

A estatística descritiva para as variáveis envolvidas nos modelos testados na avaliação da resposta da respiração basal à composição funcional das plantas cultivadas está disposta na Tabela 3a, no anexo I. Assim como visto para a MS, identifica-se que entre os valores de CWMs dos atributos funcionais a área foliar (LA), o conteúdo de matéria seca da folha (LDMC) e a área foliar específica (LAE) possuem maior variância. O grau de dispersão dos dados de RB nos respectivos hábitos e tratamentos estão dispostos na Figura 15. Nota-se que as herbáceas basais e as árvores portam as maiores médias de CO_2 emitido pela respiração do solo, onde as primeiras apresentaram maior variabilidade.

Figura 14 - Médias de RB por hábito referente aos tratamentos.. Onde: ARB = arbustos; HB = herbáceas basais; HE = herbáceas eretas; ARV = árvores. Total = média de toda parcela.

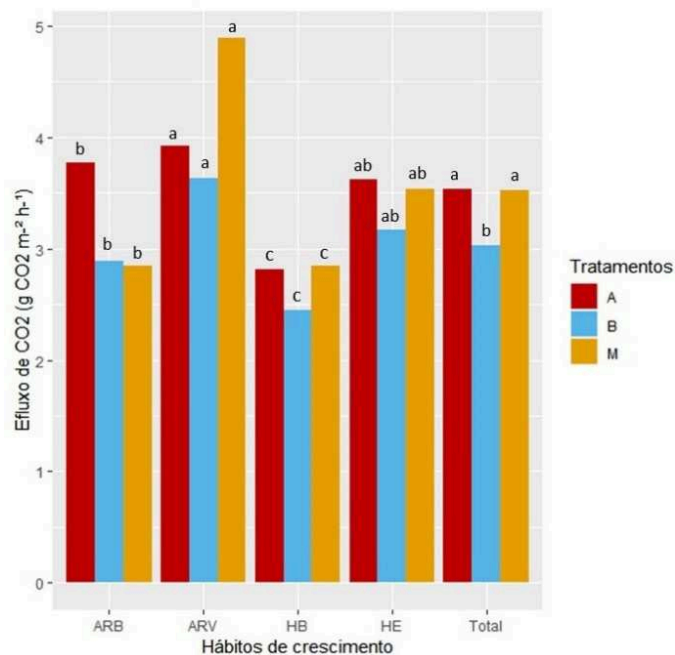
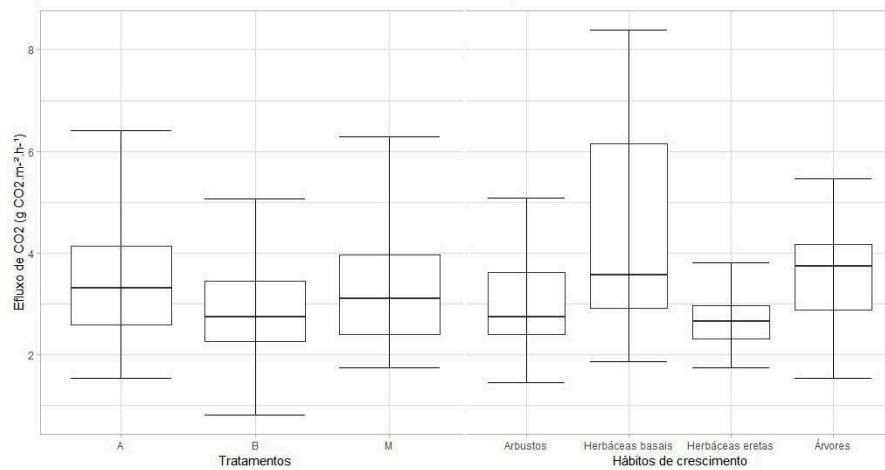


Figura 15 - Diagrama de caixa representando a dispersão dos dados de respiração basal nos respectivos tratamentos e hábitos de crescimento.



6.2.1. Efeito dos hábitos de crescimento e tratamentos

A Tabela 9 contém os modelos finais e seus resultados principais quanto ao efeito dos hábitos de crescimento e tratamentos sobre a RB, onde ambos se mostraram relevantes. Mais detalhes podem ser vistos na tabela 10a exibida no anexo IV. As diferenças mais marcantes foram diagnosticadas entre os tratamentos de alto N foliar e baixo N foliar, semelhante ao ocorrido na investigação acerca da massa acumulada de serrapilheira. As distinções envolvem todos os hábitos de crescimento, sendo mais expressivas entre as herbáceas eretas, basais e árvores.

Tabela 9 - Resultados simplificados da avaliação do efeito dos hábitos de crescimento e tratamentos na respiração basal.

MODELO	Preditoras	p-valores
	Tratamentos	0,0416*
Efluxo de CO ₂ ~ Tratamentos + Hábitos de crescimento	B – A	0,0112 *t
	Hábitos	0,0003**
	ARV – ARB	0,0301 *t
	HB – ARV	0,0026 **t
	HE – HB	0,0021 **t

Onde, B: baixo N foliar; A: alto N foliar; ARV: árvores; ARB: arbustos; HB: herbáceas basais; HE: herbáceas eretas; t: teste de Tukey.

6.2.2. Efeito dos atributos funcionais

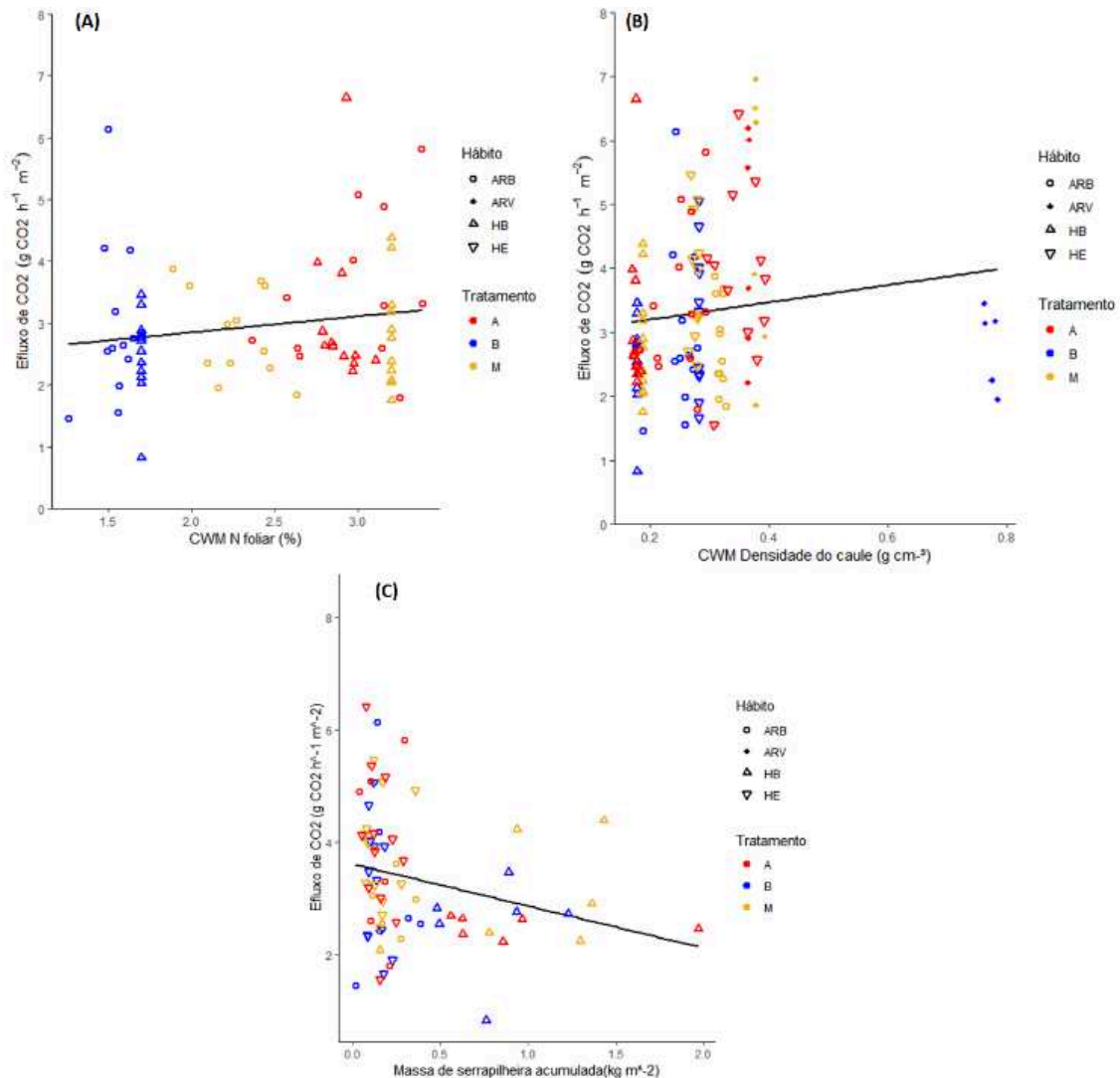
A Tabela 10 contém os modelos utilizados nos testes de efeito da composição funcional do SAF sobre o efluxo de CO₂ do solo, seus valores de AIC e resultados, mais detalhes podem ser vistos na Tabela 11a disposta no anexo IV. Foi constatado que a massa acumulada de serrapilheira, a densidade do caule e o teor de N foliar revelaram-se características consideráveis na dinâmica da respiração edáfica. Os demais atributos medidos não mostraram importância estatística e por isso não aparecem nos resultados. A Figura 16 ilustra a direção em que os atributos afetam esse processo ecossistêmico, evidenciando que quanto maior a densidade do caule e o teor de N foliar, maior será a atividade biótica do solo em termos de respiração. A relação entre o acúmulo de serrapilheira e a respiração do solo se mostrou negativa, ou seja, quanto mais massa acumulada de serrapilheira, menor o efluxo de CO₂ do solo.

Tabela 10 - Resultados simplificados da avaliação do efeito da composição funcional na respiração basal.

MODELO	AIC	p-valor dos atributos funcionais		
		CWM_SSD	CWM_Nf	MS
Efluxo de CO ₂ ~ CWM_SSD	418,7075	7e ^{-4***}	-	-
Efluxo de CO ₂ ~ CWM_Nf	217,0517	-	0,0385*	-
Efluxo de CO ₂ ~ MS	236,3826	-	-	0,0318*

Onde, CWM: média ponderada da comunidade; SSD: densidade específica do caule; Nf: teor de N foliar; MS: massa acumulada de serrapilheira.

Figura 16 – Ajustes do efluxo de CO₂ com os CWMs que apresentaram efeito significativo na respiração basal. (A) CWM N foliar (%). (B) Massa acumulada de serrapilheira (kg m⁻²). (C) Densidade do caule (g cm⁻³).



6.2.3. Efeitos da diversidade funcional

Tal qual visto nos resultados referentes à serrapilheira, para respiração do solo a diversidade funcional também não expressou influência detectável pelos métodos estatísticos utilizados, nem considerando como unidades amostrais as faixas ocupadas pelos diferentes hábitos de crescimento no interior das parcelas, e nem tratando a parcela como um todo como unidade amostral. Nessa mesma abordagem foi testado efeito da riqueza funcional (FRic) presente nas parcelas, a

qual também não explicitou efeito em RB. Esses resultados estão sintetizados na Tabela 11.

Tabela 11 - Resultados simplificados da avaliação do efeito da diversidade funcional na respiração basal.

MODELOS	AIC	p-valor
Efluxo de CO ₂ ~ RaoQ _{HÁBITOS}	434,6799	0,5695
Efluxo de CO ₂ ~ RaoQ _{PARCELAS}	84,60488	0,6725
Efluxo de CO ₂ ~ FRic	78,94014	0,3529

Onde, RaoQ = índice de Rao; FRic = riqueza funcional

7. DISCUSSÃO

Apesar de a decomposição da serrapilheira ser favorecida pelo aumento da umidade do solo na maioria dos ecossistemas sazonais da região tropical, sabe-se que existe um limite de saturação do solo a partir do qual o aumento na umidade passa a exercer um efeito semelhante ao ocasionado pelo déficit hídrico, reduzindo a velocidade com que a matéria orgânica depositada sobre o solo é decomposta (Terror et al., 2011). Particularmente, o solo do SAF experimental é mal drenado, refletindo em lenta atividade biológica heterotrófica se comparado a outros ecossistemas tropicais sazonais, refletindo nos processos ecossistêmicos que envolvem a ciclagem de nutrientes como o acúmulo de serrapilheira e a respiração do solo. É importante lembrar que a respiração das raízes, dirigida principalmente pela fotossíntese (Hogberg et al., 2008) e pela temperatura do ar (Burlon et al., 2002), colaboram com cerca de 30% a 80% na RB, sendo, portanto, fortes contribuintes na taxa de efluxo de CO₂, que também conta com a atuação heterotrófica dos microorganismos aeróbicos (Alkin et al., 2000).

Comparando a respiração do solo em diferentes áreas que abrigam mata natural, mata recém-queimada e área de pastagem, Kepler et al. (1990), verificaram em seu estudo (o qual tinha finalidade de isolar a influência das camadas inferiores sobre a respiração do solo), em mata primária que 80% da respiração edáfica ocorreu nos primeiros 5 cm do solo, já que a remoção da serrapilheira teve pouca influência da produção total de CO₂. De acordo com esses autores, a falta de

contribuição das camadas superficiais foi compensada em 90% pela difusão do CO₂ proveniente das camadas inferiores. Também observaram que a liberação total de CO₂ do solo para a atmosfera foi mais elevada na área de pastagem quando comparada à mata primária e à área desmatada com posterior queimada. Logo, constata-se que o manejo tem forte influência na dinâmica biótica do solo, e, portanto, interfere em sua respiração e que a maior atividade biótica se encontra nas camadas superficiais do solo. Aliando essas informações à condição de solo que comporta o SAF experimental, pode-se dizer que a dinâmica de sua atividade biológica e a garantia de sua fertilidade é garantida pela existência de serrapilheira.

Diante disso, é indispensável ressaltar que, como pode ser visto na linha do tempo ilustrada no tópico 5.5, a coleta de serrapilheira no momento T1 (maio de 2017) ocorreu em meio à rotação de culturas das herbáceas eretas, onde, logo após a coleta estas foram roçadas. No momento T2, o SAF já havia passado por uma rotação de culturas das HE e por podas das espécies de hábitos arbustivos. Como visto, todos resíduos das podas e roçadas foram depositados no solo das parcelas a qual pertencem, portanto influenciaram a quantificação da MS e, possivelmente, também tiveram interferência na RB. Até o momento do ensaio em campo para medição da respiração do solo, o SAF já havia passado por muitas atividades de manejo, onde já haviam sido realizadas três rotações nas faixas de herbáceas eretas, com último plantio efetuado cerca de um mês antes da coleta de dados de respiração.

7.1 EFEITO DOS TRATAMENTOS

Em um SAF sucessional a produção de biomassa, a capacidade de acumular N e a relação C/N da serrapilheira e palhadas depositadas no solo são características importantes na seleção de adubos verdes, pois estão relacionadas aos potenciais das plantas de cobertura de proteger o solo e à velocidade de liberação de N e de seus resíduos para as culturas sucessoras (Boer et al., 2007; Carneiro et al., 2008). Sabe-se que as folhas são as maiores contribuintes do abastecimento da serrapilheira depositada no solo (Dickow et al., 2012), e que materiais de relação C/N baixa, ou seja, alto teor de N foliar, são mais frágeis e, portanto, mais rapidamente decompostos, demandando menores custos energéticos aos decompositores, quando comparados aos de alta relação C/N, que contém

baixo teor de N foliar (Klieman, 2006). Diante dessa conjuntura compreende-se as diferenças diagnosticadas entre os tratamentos A (alto teor de N foliar) e B (baixo teor de N foliar) para ambos os processos ecossistêmicos avaliados.

Observando a Figura 12B pode-se notar que as plantas crescem mais nas condições do tratamento de médio N foliar, ou seja, têm maior possibilidade de gerar crescimento secundário e densidade do caule, o que pode estar relacionado à presença de resíduos com diferentes velocidades de decomposição, com abastecimento constante na alimentação do solo. O nitrogênio participa de inúmeros compostos orgânicos presentes nas plantas (aminoácidos, amidas, coenzimas, DNA, tecidos vasculares, hormônios, proteínas), está presente na clorofila e na rubisco, portanto associado à fotossíntese e outros processos como absorção iônica e respiração (Pereira et al., 1981; Chapin, 1980). Logo, apesar de maiores valores de N foliar estarem ligados a maior velocidade de decomposição e menor tempo de permanência da serrapilheira no solo, também permitem maiores taxas fotossintéticas possibilitando maiores taxas de crescimento absoluto, fatos que refletem na biomassa das plantas. Não foi detectado efeito direto da biomassa das espécies cultivadas no efluxo de CO₂ do solo, porém esta mostrou correlacionar-se positivamente com a massa acumulada de serrapilheira no final do verão (Fig 12B), já que uma maior quantidade de biomassa vegetal reflete em mais massa acumulada de material depositado e vice-versa.

O tratamento B possui resíduos com baixo teor de N foliar, geralmente estão associados à alta massa foliar por área, propriedades que caracterizam plantas conservadoras de recursos, com maior longevidade das folhas, refletindo em ciclos biogeoquímicos mais demorados que contribuem para proteção do solo e para o estoque de carbono com uso eficiente de nutrientes (Lavorel & Grigulis, 2012). Em ambos os momentos de coleta (T1 e T2) a menor expressão de acúmulo de serrapilheira esteve presente no tratamento de baixo N-foliar (Figura 9) onde resíduos de alta relação C/N são predominantes, porém com maior longevidade das folhas. Ainda, inicialmente, nos primeiros 6 meses de vida do SAF experimental (T1), o tratamento de alto N foliar acumulou mais serrapilheira. Nesse tratamento predominam espécies exploradoras de recursos, com folhas de baixa relação C/N, que geralmente está associada à baixa massa foliar por área, são folhas de vida curta, com rápida decomposição, refletindo em ciclos biogeoquímicos mais rápidos,

aumento da fertilidade do solo em menor tempo e consequente rápido aproveitamento de nutrientes e crescimento vegetal (Lavorel & Grigulis, 2012).

Observa-se que os resultados encontrados são contrários ao esperado teoricamente, e isso pode estar ligado às condições iniciais limitantes do solo que abriga do SAF experimental. Por ser um solo com material de origem félsico, portador de acidez natural, jovem, pouco profundo, mal drenado, arenoso, com pouca capacidade de retenção de nutrientes, ou seja, de fácil lixiviação e com baixa atividade biológica, tem sua fertilidade potencializada pela existência de serrapilheira. Esse fato, relacionado à juvenilidade do SAF, com recente aporte de matéria orgânica, e associado à morfologia das espécies presentes nos diferentes tratamentos, onde o tratamento de baixo N foliar continha espécies portadoras de perfilhos aglomerados em touceiras, como o capim-elefante e o capim-limão, ou com poucas ou pequenas folhas, como a cana-de-açúcar e o sorgo, pode justificar a baixa contribuição no acervo de serrapilheira no tratamento B, mesmo tendo características químicas favoráveis ao acúmulo e o inverso para o tratamento A. O teor de N foliar também está associado à maior atividade biológica em um curto-prazo, o que explica os valores próximos das médias de CO₂ emitido pelo solo encontrados, onde os tratamentos alto e médio tiveram as maiores taxas.

Posteriormente, já com 11 meses de vida do SAF (T2), o maior acúmulo de serrapilheira passou a ser visto no tratamento médio (Figura 9a), que comporta espécies com folhas de alta e baixa relação C/N, garantindo abastecimento constante no aporte da cobertura vegetal que permanece por mais tempo no solo, o que favorece a dinâmica de sua atividade biológica, atua em sua proteção e gera melhores condições microclimáticas.

7.2. EFEITO DOS HÁBITOS DE CRESCIMENTO

As herbáceas eretas são espécies de rápido crescimento e ciclo curto, quando comparadas às demais representantes dos distintos hábitos de crescimento presentes no experimento, ou seja, têm uma maior taxa de produção de biomassa. Esse fato refletiu no acervo de serrapilheira averiguado na primeira coleta ocorrida em maio de 2017, no outono (T1), onde as temperaturas são mais amenas contribuindo com a permanência da serrapilheira no solo por afetar a atividade biológica. Na presença dessas espécies de rápido crescimento, o solo apresentou as

maiores taxas respiratórias o em contraste com os demais hábitos de crescimento, com exceção da faixa das arbóreas (Figura 13).

Ainda em T1 (Figura 9), as herbáceas basais tiveram pouca contribuição na MS, pois são fisiologicamente adaptadas às condições de proximidade do solo, ou seja, quando estas se desenvolvem, mais raízes vão sendo criadas por estolões e rizomas, melhorando as condições de suporte das plantas e reduzindo sua necessidade de descarte de folhas velhas para benefício do crescimento. Por isso, amendoim forrageiro, espinafre e batata doce perdem muito menos folhas, especialmente em situações de competição com plantas mais altas. O capim limão não perde folhas facilmente, pois estas estão associadas a touceira, também contribuindo pouco para o acúmulo de serrapilheira até o momento avaliado, sem interferência de manejo de poda ou desbaste. Espécies que produzem tubérculos e pouca biomassa aérea, como a batata doce, contam com baixa atividade respiratória das raízes. Além disso, a faixa da parcela que abrigava essas espécies permanecia parcialmente sombreada pelos arbustos, propiciando temperaturas mais baixas no microclima local, e contribuindo para as menores taxas de efluxo de CO₂ encontradas dentre todos os hábitos de crescimento.

Como visto no decorrer do tempo o SAF passou por muitas atividades de manejo, e após a realização da poda dos arbustos, em junho de 2017, os resíduos provenientes foram depositados em sua faixa de plantio, a qual se encontra muito próxima à faixa ocupada pelas herbáceas basais. Acredita-se que esse fato teve influência nos resultados referentes à massa acumulada de serrapilheira na segunda coleta, em setembro de 2017, na transição inverno/primavera (T2), onde os maiores valores de MS foram encontrados nas herbáceas basais.

Os arbustos de alto N foliar são banana e feijão-guandu e os de baixo N foliar são cana e capim-elefante. Os primeiros possuem características favoráveis à rápida decomposição e os últimos possuem morfologia que dificultam a deposição de folhas no solo, sem interferências de manejo, portanto esse hábito de crescimento contribuiu pouco com o aporte de serrapilheira em ambos os momentos de coleta (T1 e T2). Esse fato, atrelado à morfologia dessas plantas, refletem as menores taxas respiratórias do solo apuradas (Figura 13).

As árvores desenvolvem-se no tempo de maneira muito distinta das demais espécies presentes no experimento. Possuem ciclos muito mais longos e têm uma fase jovem prolongada, permanecendo muito mais tempo no estágio vegetativo

contraposto aos outros hábitos de crescimento, com presença de numerosas raízes finas, o que pode estar atrelado à maiores taxas de respiração.

7.3. EFEITOS DA COMPOSIÇÃO FUNCIONAL

No SAF experimental em questão, comparando os AICs dos modelos, obtém-se o seguinte ranking para o acúmulo de serrapilheira: biomassa das plantas cultivadas > CWM_teor de N foliar > CWM_conteúdo de matéria seca da folha > CWM_altura das plantas > CWM_pH. Já para a respiração basal, a CWM do teor de N foliar revelou esse atributo como o mais influente nesse processo, seguido pela massa acumulada de serrapilheira e pela densidade do caule, respectivamente. Assim é possível inferir que na composição funcional representada pelo conjunto de atributos avaliados, os primeiros, de menor AIC, são mais importantes que os últimos nesses processos ecossistêmicos.

Como já discutido, o teor de N foliar tem forte influência na fisiologia vegetal, refletindo na dinâmica das espécies presentes no ecossistema, fato que pode ser diagnosticado pela influência da relação C/N nos processos biogeoquímicos envolvidos na ciclagem de nutrientes. Altos teores de N foliar estão associados a maior velocidade de decomposição pois conferem maior palatabilidade aos decompositores (Mason, 1980; Gonçalves, et al., 1995), logo, estão ligados à uma atividade mais intensa dos microorganismos na mineralização da serrapilheira e, conseqüentemente, maiores taxas de respiração dos mesmos, refletindo positivamente no efluxo de CO₂. Maiores proporções de N foliar também configuram maior taxa de crescimento relativo, contribuindo para aporte de serrapilheira a curto-prazo, mesmo que no decorrer do tempo favoreça a velocidade de decomposição, ou seja, a respiração heterotrófica. Esses fatos corroboram a correlação positiva encontrada entre esse atributo e os processos avaliados (Figuras 12F e 15A).

Sabe-se que o conteúdo de matéria seca das folhas (LDMC) possui uma correlação positiva com sua vida útil, onde plantas com maior LDMC tendem a se decompor mais devagar pois são mais resistentes a riscos físicos, como a herbivoria, (Perez et al. 2013), conseqüentemente, permanecem por mais tempo no solo incrementando a massa acumulada de serrapilheira (MS) em sua superfície. Por outro lado, plantas com maior LDMC possuem crescimento mais lento refletindo em menor produção de biomassa total por ano por metro quadrado, com

consequente baixo acúmulo de serrapilheira. Assim, em lugares habitados por espécies de alto LDMC, a lenta decomposição das folhas pode ser compensada pela pouca biomassa total (folhas, caules, etc) depositada por ano por metro quadrado, o que pode explicar os resultados detectados no presente estudo, uma correlação negativa, entre LDMC e MS (Figura 12D), ou seja, baixos valores de LDMC associados a mais serrapilheira acumulada.

A altura das plantas cultivadas aparentou mostrar importância no acúmulo de serrapilheira (Figura 12E). Como visto, os dados de MS foram coletados no início do experimento, logo, espera-se que plantas de crescimento mais rápido e mais baixas, tenham maior produção de biomassa, de forma que pequenas alturas estariam relacionadas com maior massa acumulada de serrapilheira nesse estágio do SAF, fato que pode mudar com o passar o tempo e a sucessão das espécies.

A ocorrência de pHs mais alcalinos confere maior palatabilidade aos materiais orgânicos, favorecendo a digestão dos microorganismos (Perez et al. 2013), logo, estão associados a maior velocidade de decomposição. Os resultados do presente estudo aparentam associar pHs mais ácidos, encontrados nas herbáceas basais de todos os tratamentos, com destaque para o N-médio, à maiores valores de acúmulo de serrapilheira (Figura 12C). Esse fato também poderia ter contribuído para o acervo de serrapilheira encontrado em HB na segunda coleta (T2) discutido anteriormente na argumentação a respeito do efeito dos hábitos de crescimento.

Maiores valores de densidade do caule são intrinsecamente relacionados a ritmos de crescimento mais lentos, com maiores custos na construção volumétrica e baixa capacidade hidráulica, com consequente incremento na respiração radicular. Além disso, retratam presença de compostos complexos de difícil digestão, como lignina, sendo assim mais resistentes a danos físicos (Silva et al., 2005), exigindo maior esforço da microbiota edáfica em completar sua decomposição, refletindo proporcionalmente na respiração desses microorganismos, ou seja, no efluxo de CO₂. Esse atributo aparentou correlacionar-se positivamente com a respiração do solo, como encontrado no presente estudo (Figura 15C).

Apesar dessas justificativas teóricas explicarem os efeitos encontrados para os CWMs de altura e pH, estes não parecem bons preditores porque os dados de massa acumulada de serrapilheira não parecem linearmente explicadas pelos gradientes de CWMs. Para ambos atributos, o acúmulo de serrapilheira parece melhor explicado pelas simples categorias de hábitos de crescimento. O mesmo

acontece para o CWM de densidade do caule em relação à respiração basal, com maior variabilidade e maior média nos arbustos e herbáceas eretas, mas menor variabilidade e menor média nas herbáceas basais. Assim, os modelos que englobam essas variáveis foram considerados mal ajustados, invalidando a interpretação de seus efeitos.

Diante do exposto, deduz-se que a quantidade de serrapilheira acumulada é bastante dinâmica, com forte dependência de condições edafoclimáticas e das espécies presentes, suas arquiteturas, morfologias, taxas de crescimento e composição química, como já elucidado por outros estudos (Cunha Neto et al., 2013; Monteiro & Gama-Rodrigues, 2004; Arato et al., 2003; De Souza & Davide, 2001) que juntos esclarecem a complexidade dos ciclos biogeoquímicos impulsionados pela cadeia alimentar presente nos ecossistemas, e que, dentro os atributos avaliados apenas o N foliar e o conteúdo de matéria seca das folhas apresentaram efeito nesses processos.

7.4. EFEITOS DA DIVERSIDADE FUNCIONAL

Não foi detectado efeito significativo da diversidade funcional na massa de serrapilheira acumulada. É importante lembrar que o SAF experimental se encontrava em estágio inicial de desenvolvimento e poucas são as espécies envolvidas se comparando a ecossistemas naturais para os quais o índice de diversidade de Rao foi desenvolvido. Esses fatos podem ter sido empecilhos para manifestação do impacto da diversidade funcional no acúmulo de serrapilheira e na respiração do solo.

7.5. EFEITO DA MASSA ACUMULADA DE SERRAPILHEIRA NA RESPIRAÇÃO DO SOLO

No presente estudo foi encontrada uma correlação negativa entre o acúmulo de serrapilheira e as taxas respiratórias do solo (Figura 15B), ou seja, quanto mais serrapilheira acumulada, menor foi o efluxo de CO₂ proveniente da respiração do solo. As interações bióticas e abióticas que regulam a funcionalidade dos ecossistemas podem atuar positiva ou negativamente na velocidade de decomposição da serrapilheira, ilustrando que, mesmo em escalas local, o processo de decomposição não é influenciado apenas pela qualidade do substrato, mas

também pela qualidade do microambiente (Gama-Rodrigues et al., 2003). Segundo Souto et al. (2005), o ciclo secagem/ umedecimento do solo são bastante rápidos, o que pode implicar maior ou menor atividade e proliferação de organismos. Além disso, a temperatura superficial do solo mais elevada também contribui para a menor população microbiana e redução na intensidade de decomposição dos resíduos orgânicos (menor respiração heterotrófica). Dessa forma, as taxas de efluxo de CO₂ do solo não são constantes e ocorrem alterações intensas em função de variações da temperatura e da umidade do solo (Poggiani et al. 1983). Assim, o resultado encontrado poderia estar atrelado a outros fatores não contemplados nesse estudo, porém, observa-se a possível presença de um arco invertido (Figura 15B) indicando padrões que podem violar os pressupostos estatísticos, invalidando sua interpretação e, portanto, demandando maiores investigações futuras.

8. CONCLUSÃO

A biomassa das plantas cultivadas se mostrou um fator importante no acúmulo de serrapilheira durante o ciclo do verão. As maiores biomassas vistas nas plantas cultivadas estiveram presentes no tratamento de médio N foliar, ou seja, o de maior diversidade funcional, indicando influência positiva desta no desenvolvimento inicial de espécies principalmente no caso das herbáceas, com ação na maximização do acúmulo de serrapilheira. Esse hábito de crescimento se mostrou importante na produção inicial de serrapilheira do SAF, sendo, portanto, de interessante adoção em estágios iniciais de sistemas produtivos que contam com a adubação verde para o incremento de matéria orgânica do solo. Mais estudos são necessários para investigação dos efeitos possivelmente mediados pela biomassa.

Em um estágio inicial de desenvolvimento, foi visto que a composição funcional (identidade funcional) do SAF tem maior impacto no acúmulo de serrapilheira e na respiração do solo que a diversidade de atributos presentes, onde o teor de N foliar ganhou destaque com efeito positivo sobre o acúmulo de serrapilheira e a respiração basal, mostrando-se como atributo de maior impacto nos processos ecossistêmicos avaliados, junto às formas de vida (hábitos de crescimento). Assim, nota-se que os atributos estabelecidos experimentalmente (teor de N foliar e formas de vida) se mostraram mais importantes na maximização dos processos ecológicos avaliados que os atributos medidos à posteriori.

Para avaliação da massa acumulada de serrapilheira (MS), os modelos que envolveram a biomassa das plantas cultivadas, o pH foliar e altura das plantas (em T2) mostraram-se mal ajustados portanto foram desconsiderados na discussão e conclusão do presente estudo. O mesmo aconteceu ao considerar a MS como preditora da respiração basal.

Assim, de acordo com os resultados encontrados no presente estudo, combinar espécies com alto teor N foliar e baixos valores de conteúdo de matéria seca das folhas, refletem maior massa acumulada de serrapilheira a curto-prazo nas condições do SAF experimental. Enquanto combinar espécies de alto N foliar estabelecem condições para maiores taxas de respiração basal. Essas repercussões são bons indícios para o manejo de processos ecológicos, de forma que muitas são as possibilidades de arranjos funcionais a serem empregados em SAFs, dependendo das condições ambientais vivenciadas e das intenções de manejo.

O presente estudo ilustra impactos ecossistêmicos da fisiologia vegetal das espécies cultivadas. Futuros estudos complementares poderão contribuir para melhor desenvolvimento da compreensão acerca do funcionamento dos processos ecológicos e diretrizes para o planejamento e manejo de sistemas produtivos junto à eficácia de ecologia funcional como intérprete desse entendimento.

9. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Futuramente sugere-se atrelar essa pesquisa à avaliação das propriedades químicas do solo e da serrapilheira, ao estudo da longevidade das folhas e à dinâmica microclimática do SAF em questão, visando maior esclarecimento das relações presentes nos processos ecossistêmicos avaliados. A medição de outros atributos não considerados no presente estudo, como atributos radiculares também pode preencher lacunas nessas investigações. A ecologia funcional possui ampla aplicabilidade e vincular a diversidade funcional de plantas cultivadas e/ou espontâneas à diversidade funcional microbiológica do solo no SAF experimental pode enriquecer fortemente esse entendimento. Notou-se a necessidade de um maior número de medições do efluxo de CO₂ em diferentes épocas, sendo ao menos duas, uma no inverno e uma no verão.

REFERÊNCIAS

- ALTIERI, M. A. Agroecologia: as bases científicas da agricultura alternativa. Rio de Janeiro: AS-PTA, 1989. 235p.
- AGUIAR, M. I., VALE, N. F. L., OLIVEIRA, T. S. & CAMPANHA, M. M. Produção de serrapilheira e ciclagem de nutrientes em sistemas agroflorestais. VI Connepi. Natal, RN. 2011.
- ARATO, H. D., MARTINS, S. V. & FERRARI, S. H. S. Produção e decomposição de serrapilheira em um sistema agroflorestal implantado para recuperação de área degradada em Viçosa – MG. **R. Árvore**, Viçosa-MG, v.27, n.5, p.715-721, 2003.
- BALVANERA, P., SIDDIQUE, I., DEE, L., PAQUETTE, A., ISBELL, F., GONZALEZ, A., BYRNES, J., O'CONNOR, M. I., HUNGATE, B. A. e GRIFFIN, J. N. Linking biodiversity and ecosystem services: current uncertainties and the necessary next steps. *BioScience*, v.64, n.1, 2014.
- BARISAUX, M. How have environmental concepts reshaped the agroforestry concept? **Bois et forêts des tropiques**, v. 1, n. 331, p. 5– 17, 2017.
- BOER, C.A.; ASSIS, R.L.; SILVA, G.P.; BRAZ, A.J.B.P.; BARROSO, A.L.L.; CARGNELUTTI FILHO, A.; PIRES, F.R. Ciclagem de nutrientes por plantas de cobertura na entressafra em um solo de cerrado. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, 42:1269-1276, 2007.
- BOTTA-DUKÁT, Z. Rao's quadratic entropy as a measure of functional diversity based on multiple traits. **Journal of Vegetation Science**, v.16, p. 533–540, 2005.
- BROWN, S; GILLESPIE, A. J.; LUGO, A. Biomass estimation methods for tropical forest with applications to inventory data. **Forest Science**, v.35, p.881-902, 1989.
- CADOTTE, M.W., CARSCADDEN, K. & MIROTCGNICK, N. Beyond species: Functional diversity and the maintenance of ecological processes and services. **Journal of Applied Ecology**, v.48, 1079–1087, 2011.
- CADOTTE, M.W. Functional traits explain ecosystem function through opposing mechanisms. **Ecology Letters**, p.989–996, 2017.
- CAMARINHA FILHO, J. A. Nota metodológica sobre Modelos Lineares Mistos. Universidade Federal do Paraná. Curitiba, PR. Setembro, 2003.
- CAPRA, F. As Conexões Ocultas. Editora Cultrix, 2002.
- CARNEIRO, M.A.C.; CORDEIRO, M.A.S.; ASSIS, P.C.R.; MORAES, E.S.; PEREIRA, H.S.; PAULINO, H.B.; SOUZA, E.D. Produção de fitomassa de diferentes espécies de cobertura e suas alterações na atividade microbiana de solo de Cerrado. *Bragantia*, 67:455-462, 2008.
- CARPANEZZI, A. A. Banco de sementes e deposição de folheto e seus nutrientes em

povoamentos de bracatinga (*Mimosa scabrella* Bentham) na região metropolitana de Curitiba-

PR. Tese (Doutorado em Ciências Biológicas) – Instituto de Biociências, Universidade

Estadual Paulista, Rio Claro, 1997. 177 p.

CHAVES, S. H. R., DE PAIVA, R. D. S. R., CAMPOS, W. V. S., RODRIGUES, S. J. S. C. & VASCONSELOS, S. S. Estoque de raízes, serrapilheira e carbono no solo de sistemas agroflorestais com palma de óleo na Amazônia oriental. V Simpósio de Estudo e Pesquisa em Ciências Ambientais na Amazônia, Belém (PA), 16 a 18/11 de 2016.

CHAPIN, F. S. The mineral nutrition of wild plants. *Annual Review of Ecology and Systematics*, v.11, p.233-360, 1980.

COELHO, M. M. Estudo da respiração do solo em floresta de transição no sudoeste da Amazônia. 2005. 51p. Dissertação (Mestre em Física e Meio Ambiente) - Universidade Federal de Mato Grosso, CUIABÁ – MT, 2005.

CONWAY, G. R. The Properties of Agroecosystems. International Institute for Environment and Development. *Agricultural Systems*, Londres. p. 95-117, 1987

CORNELISSEN, J.H.C et al. A handbook of protocols for standardised and easy measurement of plant functional traits worldwide. *Aust. J. Bot.*, 51, pp. 335-380, 2003.

CORNELISSEN, J.H.C., LAVOREL, S., GARNIEL, E., DÍAZ, S., BUCHMANN, N., GUREVICH, D.E., REICH, P.B., Ter STEEGE, H., MORGAN, H.D., Van der HEIJDEN, M.G.A., PAUSAS, J.G. & POORTER, H. A handbook of protocols for standardised and easy measurement of plant functional traits worldwide. *Aust. J. Bot.* v.51, p.335-380, 2003.

CORNWEL, W. K., CORNELISSEN, J. H. C., ALLISON, S. D., BAUHUS J., EGGLETON, P., PRESTON, C. M., SCARFF, F., WEEDON, J. T., WIRTH, C., ZANNE, A. E. Plant traits and wood fates across the globe: rotted, burned, or consumed? **Global Change Biology**, v.15, p.2431–2449, 2009.

CUNHA, G. M., TINTORI, J. L., MOREIRA, G. R., DA SILVA, D. M. & PIVATTO, G. L. Produção de serrapilheira e ciclagem de nutrientes em sistema agroflorestal com cafeeiro no sul do estado do Espírito Santo. *Cadernos de Agroecologia. Anais do VI CLAA, X CBA e V SEMDF – v. 13, n.1, jul. 2018.*

CUNHA NETO, F. V., LELES, P. S. S., PEREIRA, M. G., BELLUMATH, V. G. H. & ALONSO J. M. Acúmulo e decomposição de serrapilheira em quatro formações florestais. **Ciência Florestal**, Santa Maria, v. 23, n. 3, p. 379-387, jul.-set., 2013.

D'AGUSTINI, L. R.; CUNHA, A. P. P. *Ambiente*. Rio de Janeiro: Garamond, 2007. p. 58 – 65.

D'AGUSTINI, L. R., Souza, F. N. S., Alves, J. N. *Sistemas agroflorestais: menos quantidade e mais regularidade*. Nova Letra Gráfica Editora, Palmas, 2007. 88p.

- DA SILVA, L. B., NOVAIS, J. W. Z., SANCHES, L., MACHADO, N. G., AQUINO, A. M. & SALLO, F. S. Serrapilheira e efluxo de CO₂ do solo em floresta sazonalmente alagável no Pantanal brasileiro. **Ensaios Cienc.**, Cienc. Biol. Agrar. Saúde, v.21, n.3, p. 178-182, 2017.
- DA SILVA, M. S. C., DA SILVA, E. M. R., PEREIRA, M. G. & DA SILVA, C. F. Estoque de serrapilheira e atividade microbiana em solo sob sistemas agroflorestais. **Floresta e Ambiente**; v.19, n.4, p. 431-441, 2012.
- DEBASTIANI, V. J.; PILLAR, V. D. Syncca-R tool for analysis of metacommunities based on functional traits and phylogeny of the community components. *Bioinformatics*, v. 28, n. 15, p. 2067–2068, 2012.
- DE FREITAS, I. C., DOS SANTOS, F. C. V., CUSTÓDIO FILHO, R. O. & CORRECHEL, V. Carbono no solo, acúmulo e qualidade da serrapilheira em sistemas de produção familiar. **Rev. Floresta**, Curitiba, PR, v. 46, n. 1, p. 31 – 38, 2016.
- DE LIMA, S. S., LEITE, L. F. C., AQUINO, A. M., OLIVEIRA, F. C. & CASTRO, A. A. J. F. Serrapilheira e teores de nutrientes em argissolo sob diferentes manejos no norte do Piauí. **R. Árvore**, Viçosa-MG, v.34, n.1, p.75-84, 2010.
- DE-POLLI, H.; PIMENTEL, M. S. Indicadores de qualidade do solo. In: Aquino, A. M.; Assis, R. L. (eds.) *Processos biológicos no sistema solo-planta: ferramentas para uma agricultura sustentável*. Brasília-DF: Embrapa, p. 17-28, 2005.
- DE SOUZA, J. A. & DAVIDE, A. C. Deposição de serrapilheira e nutrientes em uma mata não minerada, em plantações de bracatinga (*Mimosa scabrella*) E DEEUCALIPTO (*Eucalyptus saligna*) EM ÁREAS DE MINERAÇÃO DE BAUXITA. **CERNE**, V.7, N.1, P.101-113, 2001.
- DIAS, J. D. Fluxo de CO₂ proveniente da respiração do solo em áreas de floresta nativa da Amazônia. 2006. 88p. Dissertação (Mestre em Ecologia de Agroecossistemas) - Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2006.
- DIAZ, S. & CABIDO, M. Vive la différence: plant functional diversity matters to ecosystem processes. *Trends Ecol. Evol.*, v.16, n.8, p. 646-655, 2001.
- DICKOW, K. M. C.; MARQUES, R.; PINTO, C. B. & HÖFER, H. Produção de serrapilheira em diferentes fases sucessionais em uma floresta subtropical secundária, em Antonina, PR. **Cerne**, Lavras, v. 18, n. 1, p. 75-86, 2012.
- DIXON, R.; BROWN, S.; HOUGHTON, R.; SOLOMON, A.; TREXLER, M.; WISNIEWSKI, J. Carbon pools and flux of global forest ecosystems. **Science**, v. 263, p. 185– 191, 1994.
- EDWARDS, N. T. Effects of temperature and moisture on carbon dioxide evolution in a mixed deciduous forest floor. *Soil Science Society of America Proceedings*, Madison, v. 39, n. 2, p. 361 - 365, 1975.
- EHLERS, E. *Agricultura Sustentável. Origens e perspectivas de um novo paradigma*. São Paulo: Livros da Terra, 1996. 178p.

EWEL, J. J. Natural systems as models for the design of sustainable systems of land use. *Agroforestry Systems*, v. 45, n. 1/3, p. 1–21, 1999.

FAUCON, M.-P., HOUBEN, D. & LAMBERS, H. Plant Functional Traits: Soil and Ecosystem Services. **Trends in Plant Science**, Elsevier v. 22, p. 385–394, 2017.

FOLEY, J.A., RAMANKUTTY, N., BRAUMAN, K.A., Cassidy, E.S., Gerber, J.S., JOHNSTON, M., *et al.* Solutions for a cultivated planet. **Nature**, v.478, p.337–42, 2011.

FERREIRA, E. A. B. Dinâmica de longo prazo do carbono do solo em sistema de manejo no cerrado. 2013. 235p. Tese (Doutorado em Ecologia) - Instituto de Ciências Biológicas, Universidade de Brasília, Brasília, 2013.

FERREIRA, L. R. .; DAL SOGLIO, F. K. Instituições e concepções de sistemas agroflorestais no Rio Grande do Sul. In: SIDDIQUE, I.; DIONÍSIO, A. C.; SIMÕES-RAMOS, G. A. (Eds.). . *Redes SAFAS: construindo conhecimento sobre Agroflorestas em rede*. Florianópolis: UFSC, 2017. p. 94.

FIGUEIREDO FILHO, A.; MORAES, G.F.; LUCIANO BUDANT SCHAAF, L.B.; FIGUEIREDO, D.J. de. Avaliação estacional da deposição em uma floresta ombrófila mista localizada no sul do Estado do Paraná. **Ciência florestal**, v. 13, n. 1, p. 11-18, 2003.

FINNEY, D. M.; KAYE, J. P. Functional diversity in cover crop polycultures increases multifunctionality of an agricultural system. p. 509–517, 2016.

FIREBAUGH, F.M. Sustainable Agricultural Systems: a concluding view. In: EDWARDS, C. A.; LAL, R.; MADDEN, P.; MILLER, R.H.; HOUSE, G. *Sustainable Agricultural Systems*. Florida: St. Lucie Press (Soil and Water Conservation Society) , 1990. Cap. 40. p. 696.

FRAZÃO, L. A., SANTANA, I. K. S., CAMPOS, D. V. B., FEIGL, B. J. e CERRI, C. C. Estoques de carbono e nitrogênio e fração leve da matéria orgânica em Neossolo Quartzarênico sob uso agrícola. **Pesq. agropec. bras.**, Brasília, v.45, n.10, p.1198-1204, out. 2010.

FREIJER, J.I.; BOUTN, W. A comparison of field methods for measuring soil carbon dioxide evolution: experiments and simulation. **Plant and Soil**, Dordrecht, v. 135, p. 133-142, 1991.

GAMA-RODRIGUES, A.C.; BARROS, N.F.; SANTOS, M.L. Decomposição e liberação de nutrientes do folheto de espécies florestais nativas em plantios puros e mistos no sudeste da Bahia. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v.27, n.6, p.1021-1031, 2003.

GARAY, I.; ANDRADE, F. N.; KINDEL, A. Evolução da serapilheira e da fertilidade do solo em região de Mata Atlântica de tabuleiros: de plantios a mata nativa. In: CONGRESSO DE ECOLOGIA: ambiente e sociedade, Porto Alegre. Resumos. Porto Alegre: UFRGS/Centro de Ecologia. p. 242, 2011.

GARNIER E. et al Plant functional markers capture ecosystem properties during secondary succession. **Ecology**, v.85, p.2630–2637, 2004.

GELL-MAN, M. *O quark e o jaguar: aventuras no simples e no complexo*. Rio de Janeiro: Rocco, 1996.

GLIESSMAN, S. R. *Agroecologia: processos ecológicos em agricultura sustentável*. Porto Alegre: UFRGS, 2008 653 p.

GONÇALVES, L. E. Carbono orgânico do solo e dinâmica de crescimento de raízes finas em um cerrado sob manejo de gramínea invasora *Milinisminutiflora* P. Beauv. 2012. 62 p. Dissertação (Mestrado em Ecologia) - Instituto de Ciências Biológicas, Universidade de Brasília, Brasília, 2012.

GÖTSCH, E. *Break-thropugh in agriculture*. Rio de Janeiro: AS-PTA, 1995. 22p.

GÖTSCH, E. *O renascer da agricultura*. Assessoria e Serviços a Projetos em Agricultura Alternativa, 1996.

GÖTSCH, E. *Homem e natureza: cultura na agricultura*. Recife: Centro Sabi, 1997.

GRIME, J. P., CORNELISSEN, J. H. C., THOMPSON, K., HOODGSON, J. G. Evidence of a causal connection between anti-herbivore defense and the decomposition rate of leaves. **Oikos**, v.77, p.489–494, 1996.

GUSMAO, J. B., BRAUKO, K. M., Eriksson BK, LANA, P. C. Functional diversity of macrobenthic assemblages decreases in response to sewage discharges. *Ecol Indic*, v. 66, p. 65–75, 2016.

HAYNES, B. E.; GOWNER, S. T. Bellowground carbono allocation in unfertilization and fertilized red pine plantations in northern Wisconsin. **Tree Physiology**, Victoria, v.15, 317 – 325, 1995.

HEEMSBERGEN, D.A., BERG, M.P., LOREAU, M., Van HAL, J.R., FABER, J.H. & VERHOEF, H.A. Biodiversity effects on soil processes explained by interspecific functional dissimilarity. **Science**. v.306, n.5698, p.1019-1020, 2004.

HILLEBRAND, H., MATTHIESSEN, B. Biodiversity in a complex world: consolidation and progress in functional biodiversity research. *Ecol Lett* , v.12, p.1405–1419, 2009.

HODGSON, J.G., WILSON, P. J., HUNT, R., GRIME, J. P., THOMPSON, K. Allocating C-S-R plant functional types: a soft approach to a hard problem. **Oikos**, v.85, p.282–294, 1999.

HOLMGREN, D. *Permacultura: princípios e caminhos além da sustentabilidade*. Porto Alegre: Via Sapiens, 2013.

HOOPER, D. et al. Effects of biodiversity on ecosystem functioning: a consensus of current knowledge. **Ecol Monogr**, v.75, p.3–35, 2005.

HOUGHTON, R.A. Workshop emissão versus sequestro, uma nova oportunidade de negócio para o Brasil. Rio de Janeiro, Ed. Campus, p.12 – 13, 1994.

ISELL, F., GONZALEZ, A., Loreau, M., Cowles, J., Díaz, S., Hector, A., *et al.* Linking the influence and dependence of people on biodiversity across scales Sampling effects of biodiversity emerging at larger scales. **Nature**, v. 546, p. 65–72, 2017.

JONER, F. *et al.* Functional redundancy in a clipping experiment on grassland plant communities. *Oikos*, v. 120, n. 9, p. 1420–1426, 2011.

JONER, F. O papel das agroflorestas na conservação da biodiversidade: estratégias e conflitos. In: SIDDIQUE, I.; DIONÍSIO, A. C.; SIMÕES-RAMOS, G. A. (Eds.). . Redes SAFAS: construindo conhecimento sobre Agroflorestas em rede. Florianópolis: UFSC, 2017. p. 94.

KEPLER, S.; VOLKOFF, B.; CERRI, C.C.; CHONÉ, T.; LUIZÃO, F.; EDUARDO, B.P. Respiração do Solo: Comparação entre Áreas com Mata Natural, Mata Recém-queimada e Pastagem, na Amazônia Central. *Geochim. Brasil.*, v.4, p.111- 118, 1990.

KLIEMAN, H. J. , BRAZ, A. J. P. B. & SILVEIRA, P. M. Taxas de decomposição de resíduos de espécies de cobertura em Latossolo vermelho distroférico. *Pesquisa Agropecuária Tropical*, v.36, n.1, p.21-28, 2006.

KNEVEL, I. C., BEKKER, R. M., KLEYER, M. Life-history traits of the northwest European flora: the LEDA database. *Journal of Vegetation Science*, v.14, p.611–614, 2003.

KREBS, C.J. *Ecological methodology*. Harper & Row, New York, 1999. p. 624.

LALIBERTE, E. & LEGENDRE, P. A distance-based framework for measuring functional diversity from multiple traits A distance-based framework for measuring from multiple traits functional diversity. **Ecology**, v. 91, p.299–305, 2010.

LAVOREL, S. & GARNIER, E. Predicting changes in community composition and ecosystem functioning from plant traits: revisiting the Holy Grail. **Functional Ecology**, v. 16, p.545–556, 2002.

LAVOREL, S., GRIGULIS, K., MCINTYRE, S., WILLIAMS, N.S.G., GARDEN, D., DORROUGH, J., *et al.* Assessing functional diversity in the field - Methodology matters!. **Functional Ecology**, v.22, p.134–147, 2008.

LEFF, E. La ecología política en América Latina: un campo en construcción. *Sociedade e Estado*, Brasília, v.18, n.17-40, 2003.

LITTLE, P. E. Ecologia política como etnografia: um guia teórico e metodológico. **Horizontes Antropológicos**, Porto Alegre, ano 12, v.25, p.85-103, 2006.

LOPES, E. B. M. Diversidade metabólica em solos tratados com bio-sólidos. Dissertação de mestrado apresentada à ESALQ na área de Solos e Nutrição de Plantas. Piracicaba – SP, 2001.

LUNDEGÅRDH, H. Carbon dioxide evolution and crop growth. **Soil Science**, v.23, p.417- 453, 1927.

MACHADO, P. L. O. de A. Carbono do solo e a mitigação da mudança climática global. **Química Nova**, v.28, n.2, p. 329-334, 2005.

MAEZUMI, S. Y. et al. The legacy of 4,500 years of polyculture agroforestry in the eastern Amazon. **Nature Plants**, v. 4, n. August, p. 540–547, 2018.

MAGURRAN, A.E. 2004. Measuring biological diversity. Blackwell, Oxford, p. 256.

MALÉZIEUX, E. et al. Review article Mixing plant species in cropping systems : concepts , tools and models . A review. *Agronomy for Sustainable Development*, v. 29, p. 43–62, 2009.

MALHI, Y.; NOBRE, A.D.; GRACE, J.; KRUIJT, B.; PEREIRA, M.G.P., CULF, A.; SCOTT, S. Carbon Dioxide Transfer Over a Central Amazonian Rain Forest. *Journal of Geophysical Research - Atmospheres*, August 1997.

MANHAES, C. M. C. & FRANCELINO, F. M. A. Estudo na inter-relação da qualidade do solo e da serrapilheira com a fauna edáfica utilizando análise multivariada. **Nucleus**, v.9, n.2, out.2012.

MARTINS, S. V.; RODRIGUES, R. R. Produção de serrapilheira em clareiras de uma floresta estacional semidecidual no município de Campinas, SP. **Revista Brasileira de Botânica**, v. 22, n. 3, p. 405-412, 1999.

MASON, N.W.H., MACGILLIVRAY, K., STEEL, J.B. & WILSON, J.B. An index of functional diversity. *J. Veg. Sci.*, v.14, n.4, p.571-578, 2003

MASON, N.W.H., MOUILLOT, D., LEE, W.G. & WILSON, J.B. Functional richness, functional evenness and functional divergence: The primary components of functional diversity. **Oikos**, v.111, p.112–118, 2005.

MCINTYRE, S., LAVOREL, S., LANDSBERG, J., FORBES, T. D. A. Disturbance response in vegetation – towards a global perspective on functional traits. *Journal of Vegetation Science*, v.10, p.621–630, 1999.

MILLER, R. P. Construindo a complexidade: o encontro de paradigmas agroflorestais. *Agrofloresta.net*. Instituto Olhar Etnográfico, Brasília, 2009. 21p.

MEDEIROS, S. A. F. Agricultura moderna e demandas ambientais: o caso da sustentabilidade da soja nos cerrados. In: Duarte, L. M. G. & Braga, M. L. de S. (ORG.). *Tristes cerrados: sociedade e biodiversidade*. Brasília, 1998 p. 133.

MOITINHO, M. R. Emissão de CO₂ e sua relação com propriedades, manejo do solo e palha em áreas de cana-de-açúcar. 2013. 68p. Dissertação (Mestre em Agronomia (Ciência do Solo)) - Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias – Unesp, Jaboticabal – SP.

MOLLISON, B. C.; HOLMGREN, D. *Permacultura um: uma agricultura permanente nas comunidades em geral*. Ground, 1983.

MONTEIRO, M. T. & GAMA-RODRIGUES, E. F. Carbono NITROGÊNIO E ATIVIDADE DA BIOMASSA MICROBIANA EM DIFERENTES ESTRUTURAS DE SERAPILHEIRA DE UMA FLORESTA NATURAL. *R. Bras. Ci. Solo*, 28:819-826, 2004.

MORAES, R. M.; DELITTI, W. B. C.; RINALDI, M. C. S.; REBELO, C. F. Ciclagem mineral em Mata Atlântica de encosta e mata sobre restinga, Ilha do Cardoso, SP: nutrientes na serapilheira acumulada. In: SIMPÓSIO DE ECOSSISTEMAS BRASILEIROS, 4., 1998, Águas de Lindóia. Anais... Águas de Lindóia: ACIESP, p. 71-77, 1998.

MUNIZ, L. M. Ecologia Política: o campo de estudo dos conflitos sócio-ambientais. **Revista Pós Ciências Sociais**, v.6, n.12., 2009.

NAIR, P. K. R. An introduction to agroforestry. ICRAF. 123 – 154. 1993.

NAKANO, E. Y. & OKIAWA, S. M. Hipóteses estatísticas testadas por diversos softwares em modelos com dois fatores cruzados e dados desbalanceados. *Mat. Apl. Comput.*, v.5, n.1, p.117-124, 2004.

NAVAS, M. L. Trait-based approaches to unravelling the assembly of weed communities and their impact on agro-ecosystem functioning. *Weed Research*, v. 52, n. 6, p. 479–488, 2012.

NÏHOFF, M. What is agroforestry? *Agroforestry Systems*, v. 1, p. 369, 1982.

PARKINSON, D., GRAY, T. R. G., WILLIAMS, S. T. Methods for studying the ecology of soil microorganisms. Oxford: Adlard. 116p. 1971.

PARRA, V., SCHULER, H., MAGNATI, N., JONER, F., SIMÕES-RAMOS, G. A., SIDDIQUE, I. Diálogo de saberes em rede para o desenvolvimento de sistemas agroflorestais agroecológicos no sul do Brasil. *Cadernos de Agroecologia. Anais do VI CLAA, X CBA e V SEMDF – Vol. 13, N° 1, Jul. 2018.*

PÉREZ-HARGUINDEGUY, N., DÍAZ, S., GARNIER, E., LAVOREL, S., POORTER, H., JAUREGUIBERRY, P., *et al.* New handbook for standardised measurement of plant functional traits worldwide. **Australian Journal of Botany**, v.61, p.167–234, 2013.

PETCHEY, O.L. On the statistical significance of functional diversity. *Funct. Ecol.*, v.18, n.2, p.297-303, 2004.

PETCHEY, O.L. & GASTON, K.J. Functional Diversity (FD), species richness, and community composition. *Ecol. Lett.*, v.5, n.3, p.402-411, 2002.

PETCHEY, O.L. & GASTON, K.J. Functional diversity: back to basics and looking forward. *Ecol. Lett.*, v.9, n.6, p.741-758, 2006.

PETCHEY, O.L., HECTOR, A. & GASTON, K.J. How do measures of functional diversity perform? *Ecology*, v.85, n.3, p.847-857, 2004.

PILLAR, V. D. *et al.* Functional redundancy and stability in plant communities. *Journal of Vegetation Science*, v. 24, n. 5, p. 963–974, 2013.

PINHEIRO J *et al.* nlme: Linear and Nonlinear Mixed Effects Models, 2018.

- POGGIANI, F.; REZENDE, G.C.; SUITER FILHO, W. Efeitos do fogo na brotação e crescimento de *Eucalyptus grandis* após o corte raso e alterações nas propriedades do solo. IPEF, n.24, p.33-42, 1983.
- PORTO-GONÇALVES, C. W. A ecologia política na América Latina: reapropriação social da natureza e reinvenção dos territórios. R. Inter. Interdisc. INTERthesis, Florianópolis, v.9, p.16-50, 2012.
- PRIGOGINE, I. *O fim das certezas: tempo, caos e leis da natureza*. São Paulo: UNESP, 1996.
- PRIMAVESI, A. Pergunte aos solos e as raízes: uma análise dos solos tropicais e mais de 70 casos resolvidos pela agroecologia. 1ªed. São Paulo: Nobel. 2014. 288 p
- R CORE TEAM. R: A language and environment for statistical computingVienna, AustriaR Foundation for Statistical Computing, , 2018. Disponível em: <https://www.r-project.org/>
- RADOMSKI, M. I. & RIBASKI, J. Fertilidade do solo e produtividade da pastagem em sistema silvipastoril com *Grevillea robusta*. Pesq. flor. bras. **Colombo**, v. 32, n. 69, p. 53-61, 2012.
- RAICH, J. W. & NADELHOFFER, K.J. Below-ground Carbon Allocation in Forest Ecosystems: Global Trends. **Ecology**, v.70, p. 1346-1354, 1989.
- RAO, C. R. Diversity and dissimilarity coefficients - a unified approach. Theoretical Population Biology, v.21, p.24-43, 1982.
- REICH, P.B. The world-wide “fast-slow” plant economics spectrum: A traits manifesto. *Journal of Ecology*, v.102, p.275-301, 2014.
- RESTREPO, J. R. El ABC de la agricultura orgánica y harina de rocas. 1ªed. Managua: SIMAS, 262 p. 1993.
- RICOTTA, C. On parametric evenness measures. J. Theor. Biol., v.222, n.1, p.189-197, 2003.
- RICOTTA, C. A parametric diversity measure combining the relative abundances and taxonomic distinctiveness of species. *Divers. Distrib*, v.10, n.1, p.143-146, 2004.
- RICOTTA, C. Through the jungle of biological diversity. *Acta Biotheor.*, v.53, n.1, p.29-38, 2005.
- RICOTTA, C.; MORETTI, M. CWM and Rao’s quadratic diversity: a unified framework for functional ecology. *Oecologia*, v. 167, n. 1, p. 181-188, 2011.
- ROBERTS, J. M. Effects of temperature on soil respiration: a brief overview. Wallingford: Center for Ecology and Hydrology, 2000. 45 p.
- SALIMON, C. I. Respiração do solo sob florestas e pastagens na Amazônia Sul - Ocidental.2003.97p.Tese(Doutorado em Ciências) Centro de energia Nuclear na agricultura, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2003.

SANDERSON, M. A. et al. Diversification and ecosystem services for conservation agriculture: Outcomes from pastures and integrated crop– livestock systems. *Renewable Agriculture and Food Systems*, v.28, p.129–144, 2013.

SANTOS, V. D. Ciclagem de nutrientes minerais em mata tropical subcaducifolia dos planaltos do Paraná (Parque Estadual Vila Rica do Espírito Santo – Fênix/PR). 387 p. Tese (Doutorado em Ecologia e Recursos Naturais) – Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 1989.

SCHLEUTER, D., AUFRESNE, M., MASSOL, F. & ARGILLIER, C. A user's guide to functional diversity indices. *Ecological Monographs*, v.80, p.469–484, 2010.

SHLESER, G.H. 1982. The Response of CO₂ Evolution from Soils to Global Temperature Changes. *Z. Naturforsch*, v.37, p. 287-291.

SHELDRAKE, R. The rebirth of nature: the greening of Science and God. Cultrix, 1991. 240p.

SIDDIQUE, I.; DIONÍSIO, A. C.; SIMÕES-RAMOS, G. A. Construindo conhecimentos sobre agroflorestas em rede. 1. ed. Florianópolis - SC: Rede de Sistemas AgroFlorestais Agroecológicos do Sul do Brasil (Rede SAFAS), 2017.

SILVA, G. A.; SOUTO, J. S.; ARAUJO, J. L. Atividade microbiana em Luvissole do semiárido da Paraíba após a incorporação de resíduos vegetais. *Agropecuária Técnica*, v.27, n.1, p.13-20, 2006.

SILVA, L. M.; ALQUINI, Y. & CAVALLET, V. C. Inter-relação entre a anatomia vegetal e a produção vegetal. *Acta bot. bras.* v. 19, n.1, p.183-194, 2005.

SIX, J.; FREY, S.D.; THIES, R.K.; BATTEN, K.M. Bacterial and fungal contributions to carbon sequestration in agroecosystems. *Soil Science Society American Journal*, v.70, p. 555- 569, 2006.

SMITH, T. M. & SMITH, R. L. Elements of ecology. Pearson Education. 8^a ed. 2009.

SOTTA, E. D. Fluxo de CO₂ entre solo e atmosfera em Floresta Tropical Úmida da Amazônia Central. 1998. 99p. Dissertação (Mestre em Ciências Biológicas, área de concentração em Ciências de Florestas Tropicais.) - Universidade do Amazonas – UA, Manaus – AM.

SOUTO, P.C.; SOUTO, J.S.; SANTOS, R.V.; ARAÚJO, G.T.; SOUTO, L.S. Decomposição de esterco disposto em diferentes profundidades em área degradada no semiárido da Paraíba. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v.29, n.1, p.125-130, 2005.

STEENBOCK, W. & VEZZANI, F. M. Agrofloresta: aprendendo a produzir com a natureza. 1^aed. Curitiba: Fabiane Machado Vezzani, 2013. 140p.

TEDESCO, M. J., GIANELLO, C., BISSANI, C. A., BONHEN, H. VOLKWEISS, S. J. Análises de solo, plantas e outros materiais. 2. Ed. Porto Alegre: Dpto de Solos, UFRGS, 1995.

TERROR, V.L.; SOUSA, H.C.; KOSOVITS, A.R. Produção, decomposição e qualidade nutricional da serapilheira foliar em uma floresta paludosa de altitude. **Acta Botanica Brasílica**, v.25, n.1, p.113-121, 2011.

TILMAN, D. Functional diversity. In *Encyclopedia of Biodiversity* (S.A. Levin, ed.). Academic Press, San Diego, p. 109-120, 2001.

TILMAN. Agriculture sustainability and intensive production practices. *Nature*, v. 418, n. August, p. 671–677, 2002.

TILMAN, D. et al. Global food demand and the sustainable intensification of agriculture. *Proc. Natl Acad. Sci.*, v. 108, n. 50, p. 20260, 2011.

TOPANOTTI, L. R., GESSER, M. J., DERENGOSKI, J. A., FIGUEIRA, F. C., DUARTE, E. & PINHEIRO, L. B. A. Atividade da macrofauna edáfica e serrapilheira em sistemas agroflorestais no sudoeste do Paraná. 15^{as} Jornadas Técnicas Forestales y Ambientales. Facultad de Ciencias Forestales, UNaM - EEA Montecarlo, INTA. 7, 8 y 9 de Junio de 2012 -Eldorado, Misiones, Argentina, 2012.

VANDERMEER, J. & PERFECTO, I. The agricultural matrix and a future paradigm for conservation. **Conservation Biology**, v,21, p.274–277, 2007.

VIANA, B. F., OLIVEIRA, D., NASCIMENTO, I. A., MATUTE, R. G., BENCHIMOL, R. L. Biodiversidade e suas aplicações: parcerias entre Brasil e Canadá, resultados e perspectivas futuras. *Interface Brasil/Canadá*. Rio Grande, v. 8, n. 9, 2008.

VILLÉGER., MASON. & MOUILLOT. New multidimensional functional diversity indices for a multifaceted framwork in functional ecology. **Ecology**, v.89, p.2290–2301, 2008.

VIOLLE, C., NAVAS, M.L., VILE, D., KAZAKOU, E., FORTUNEL, C., HUMMEL, I., *et al.* Let the concept of trait be functional!. **Oikos**, v.116, p.882–892, 2007.

WAGAI, R.; BRYE, K. R.; GOWER, S. T.; NORMAN, J. M.; BUNDY, L. G. Land use and environmental factors influencing soil surface CO₂ flux and microbial biomass in natural and managed ecosystems in southern Wisconsin. **Soil Biology & Biochemistry**, Oxford, v.30, n.12, p.1501-1509, out 1998.

WEIHER, E., VAN DER WERF, A., THOMPSON, K., RODERICK, M., GARNIER, E., ERIKSSON, O. Challenging Theophrastus: a common core list of plant traits for functional ecology. *Journal of Vegetation*. **Science**, v.10, p.609–620, 1999.

WESTOBY, M. A leaf-height-seed (LHS) plant ecology strategy scheme. **Plant and Soil**, v.199, p.213–227, 1998.

WISNIEWSKI, C. et al. Caracterização do ecossistema e estudo das relações solo-cobertura vegetal em planície pleistocênica do litoral paranaense. Curitiba: UFPR/Departamento de Solos, 1997. 55 p.

WOOD, S. A. et al. Functional traits in agriculture: Agrobiodiversity and ecosystem services. **Trends in Ecology and Evolution**, v. 30, n. 9, p. 531–539, 2015.

WOOD, S.A., KARP, D.S., DECIERCK, F., KREMEN, C., NAEEM, S. & PALM, C.A. Functional traits in agriculture: Agrobiodiversity and ecosystem services. **Trends in Ecology and Evolution**, Elsevier Ltd 30, 531–539, 2015.

WORSTER, D. Transformations of the earth: towards an agroecological perspective in history. **Journal of American History**, Bloomington, v.10, p.1087-1104, 1990

ZANCHI, F. B.; ROCHA, H. R.; KRUIJT, B.; CARDOSO, F. L.; DEUS, J. A.; AGUIAR, L. J. G. Medição do efluxo de CO₂ do solo: monitoramento com câmaras automáticas sobre floresta e pastagem em Rondônia. Congresso de Ecologia do Brasil, 2003, Fortaleza. Anais. Ed. Betania, p. 631-632, 2003.

ANEXOS – Estatística descritiva dos dados e modelos testados

ANEXO I

Tabela 1a - Estatística descritiva das variáveis presentes nos modelos referentes à T1.

Variáveis	Unid. de medida	Média	Variância	Desvio padrão	Amplitude total	CV%	SE
CWM LA	mm ²	72435,7200	27716890831,0000	166483,9000	777496,2000	229,8368	16019,9200
CWM LAE	mm ² mg ⁻¹	16,4024	21,6915	4,6574	18,5674	28,3947	0,4482
CWM LDMC	mg g ⁻¹	261,8463	2800,1590	52,9165	239,8254	20,2090	5,0919
CWM Dc	g cm ⁻³	0,3909	0,0724	0,2691	0,8616	68,8416	0,0259
CWM pH	-	5,9036	0,0849	0,2913	1,1172	4,9345	0,0280
CWM H	M	1,7512	1,8996	1,3783	4,1112	78,7026	0,1326
CWM Nf	%	2,3218	0,5228	0,7231	2,7011	31,1435	0,0696
RaoQ	-	0,0159	0,0003	0,0173	0,0541	108,4625	0,0017
Biom	kg m ⁻²	0,9880	0,6917	0,8317	3,3982	84,1766	0,0800
Cotas	-	0,5166	0,0157	0,1256	0,4690	24,2925	0,0148
Mserrap1	kg m ⁻²	0,2104	0,03020	0,1738	0,8864	82,5839	0,0205

Onde, VarPRED: variáveis preditoras; VarRESP: variável resposta; LA: Área foliar; LAE: Área foliar específica; LDMC: Conteúdo de matéria seca foliar; Dc: Densidade do caule; H: Altura da planta; Nf: Teor de N foliar; RaoQ: Entropia quadrática de Rao; biom: Biomassa das plantas cultivadas; e Mserrap1: massa de serrapilheira acumulada referente à primeira coleta (T1).

Tabela 2a – Estatística descritiva das variáveis presentes nos modelos referentes à T2.

Variáveis	Unid. de medida	Média	Variância	Desvio padrão	Amplitude total	CV%	SE
CWM LA	mm ²	69146,29	28123641629	167701	777496,2	242,5308	16137,04
CWM LAE	mm ² mg ⁻¹	18,0518	44,2464	6,6518	22,7818	36,8483	0,6401
CWM LDMC	mg g ⁻¹	246,7025	2432,5410	49,3208	188,5195	19,9920	4,7459
CWM Dc	g cm ⁻³	0,2392	0,0255	0,1598	0,8278	66,7928	0,0154
CWM pH	-	5,9128	0,0774	0,2783	1,1171	4,7064	0,0268
CWM H	M	1,7342	1,9543	1,3980	4,1112	80,6099	0,1345
CWM Nf	%	2,4778	0,9301	0,9644	2,8437	38,9229	0,0928
RaoQ	-	0,0103	0,0003	0,0168	0,0558	162,3910	0,0016
Biom	kg m ⁻²	0,5743	0,3607	0,6006	3,3566	104,5875	0,0578
Cotas	-	0,5166	0,0157	0,1256	0,4690	24,2925	0,0148
Mserrap2	kg m ⁻²	0,34685	0,1555	0,3943	1,9511	113,6846	0,04647

Onde, VarPRED: variáveis preditoras; VarRESP: variável resposta; LA: Área foliar; LAE: Área foliar específica; LDMC: Conteúdo de matéria seca foliar; Dc: Densidade do caule; H: Altura da planta; Nf: Teor de N foliar; RaoQ: Entropia quadrática de Rao; biom: Biomassa das plantas cultivadas; e Mserrap2: massa de serrapilheira acumulada referente à segunda coleta (T2).

Tabela 3a - Estatística descritiva das variáveis presentes nos modelos mistos para RB.

Variáveis	Unid. de medida	Média	Variância	Desvio padrão	Amplitude total	CV%	SE
CWM LA	mm ²	55474,49	21949568938,0	148153,9	764782,3	267,0667	13198,6
CWM LAE	mm ² mg ⁻¹	14,0868	34,8380	5,9024	19,9955	41,9000	0,5258
CWM LDMC	mg g ⁻¹	269,8499	2455,2350	49,5503	207,6632	18,3622	4,4143
CWM Dc	g Cm ⁻³	0,28798	0,0165	0,1285	0,6164	44,6459	0,0114
CWM pH	-	5,9207	0,2016	0,4490	2,1937	7,5832	0,0399
CWM H	M	1,7322	1,7859	1,3364	4,0882	77,1469	0,1190
CWM Nf	%	2,7645	0,5560	0,6179	3,6928	37,1819	0,0688
RaoQ	-	0,0082	0,0002	0,0153	0,0601	187,6005	0,0014
Biom	kg m ⁻²	1,5898	2,6921	1,6408	6,7544	103,2079	0,1462
Cotas	-	0,5224	0,0176	0,1327	0,5390	25,4045	0,0118
MSerrap2	kg m ⁻²	0,34685	0,1555	0,3943	1,9511	113,6846	0,04647
RB	kg m ⁻²	3,3502	1,7827	1,3352	7,57	39,8543	0,1189

Onde, VarPRED: variáveis preditoras; VarRESP: variável resposta; LA: Área foliar; LAE: Área foliar específica; LDMC: Conteúdo de matéria seca foliar; Dc: Densidade do caule; H: Altura da planta; Nf:

Teor de N foliar; RaoQ: Entropia quadrática de Rao; biom: Biomassa das plantas cultivadas; Mserrap2: massa de serrapilheira acumulada referente à segunda coleta (T2) e RB: respiração basal

ANEXO II

Tabela 4a – Modelo final de teste de efeito dos hábitos crescimento de tratamentos na massa acumulada de serrapilheira referentes à T1.

MS ~ Tratamentos + Hábitos de crescimento (AIC : -34,85905)				
Análise de variância				
	numDF	denDF	F-value	p-value
(Intercept)	1	52	31,4783	<,0001***
Tratamentos	2	10	4,6983	0,0364*
Hábitos	2	52	6,8474	0,0023**
Comparações de médias (Tukey)				
Tratamentos	Estimate	Std. Error	z value	Pr(> z)
B - A == 0	-0,12033	0,03944	-3,051	0,00646 **
M - A == 0	-0,0702	0,03944	-1,780	0,17623
M - B == 0	0,05013	0,03944	1,271	0,41155
Hábitos	Estimate	Std. Error	z value	Pr(> z)
HB - ARB == 0	-0,08241	0,04554	-1,810	0,165133
HE - ARB == 0	0,06273	0,03944	1,591	0,248139
HE - HB == 0	0,14515	0,03944	3,680	0,000679 ***

Onde, A: alto teor de N foliar; B: baixo teor de N foliar; M: médio teor de N foliar; HE: herbáceas eretas; HB: herbáceas basais e ARB: arbustos.

Tabela 5a - Modelo final de teste de efeito dos hábitos crescimento de tratamentos na massa acumulada de serrapilheira referentes ao momento T2.

MS ~ Hábitos de crescimento (AIC: -70,1885)				
Análise de variância				
-	numDF	denDF	F-value	p-value
(Intercept)	1	52	138,1886	<,0001***
Hábitos	2	52	2,7951	<,0001***
Comparações de médias (Tukey)				
Hábitos	Estimate	Std. Error	z value	Pr(> z)
HB - ARB == 0	0,72074	0,10488	6,8720	<0,001 ***
HE - ARB == 0	-0,04119	0,02524	-1,6320	0,208
HE - HB == 0	-0,76193	0,10327	-7,3780	<0,001 ***

Onde, MS: massa acumulada de serrapilheira; HB: herbáceas basais; ARB: arbustos; HE: herbáceas eretas e HB: herbáceas basais

ANEXO III

Tabela 6a – Modelos finais de teste de efeito dos CWMs dos atributos na massa de serrapilheira acumulada referentes ao momento T1.

MS ~ biomassa das plantas cultivadas (AIC: -43,93284)				
Análise de variância				
-	numDF	denDF	F-value	p-value
(Intercept)	1	53	9,4829	0,0033
Biomassa	1	53	9,1577	0,0038*
MS ~ conteúdo de matéria seca da folha (LDMC) (AIC: -31,61895)				
Análise de variância				
-	numDF	denDF	F-value	p-value
(Intercept)	1	53	18,8845	0,0001
LDMC	1	53	4,8975	0,0312*
MS ~ biomassa das plantas cultivadas + teor de N foliar (AIC: -41,79066)				
Análise de variância				
-	numDF	denDF	F-value	p-value
(Intercept)	1	52	0,0156	0,9009
Biomassa	1	52	12,1315	0,001**
Teor de N foliar	1	52	6,0564	0,0172*

Tabela 7a - Modelos finais de teste de efeito dos CWMs dos atributos na massa de serrapilheira acumulada referentes ao momento T2.

MS ~ biomassa das plantas cultivadas + pH (AIC : 64,56106)				
Análise de variância				
-	numDF	denDF	F-value	p-value
(Intercept)	1	52	7,3429	0,0091*
Biomassa	1	52	7,1454	0,0100*
pH	1	52	5,4814	0,0231*
MS ~ altura das plantas (AIC : 31,91712)				
ANOVA.lme (marginal)				
-	numDF	denDF	F-value	p-value
(Intercept)	1	53	54,1882	<,0001***
Altura das plantas	1	53	31,0347	<,0001***

Tabela 8a - Modelos finais de teste de efeito da diversidade funcional na massa de serrapilheira acumulada referentes à T1.

MS ~ RaoQ + Hábitos de crescimento + cotas (AIC: 39,81779)				
Análise de variância				
-	numDF	denDF	F-value	p-value
(Intercept)	1	51	0,0056	0,9409
RaoQ	1	51	1,8998	0,1741
Hábitos	2	51	6,6051	0,0028*
cotas	1	11	5,1115	0,0450*

Tabela 9a - Modelos finais de teste de efeito da diversidade funcional na massa de serrapilheira acumulada referentes à T2.

MS ~ RaoQ + Hábitos de crescimento (AIC: -69,58176)				
Análise de variância				
-	numDF	denDF	F-value	p-value
(Intercept)	1	51	44	<,0001***
RaoQ	1	51	0,04846	0,8266
Hábitos	2	51	27,88478	<,0001***

ANEXO IV

Tabela 10a - Modelos finais de teste de efeito dos hábitos e tratamentos respiração basal.

Efluxo de CO ₂ ~ Tratamentos + Hábitos de crescimento (AIC: 419,1134)				
Análise de variância				
-	numDF	denDF	F-value	p-value
(Intercept)	1	105	289,7739	<,0001
Tratamentos	2	10	4,4424	0,0416*
Hábitos	3	105	6,9552	0,0003**
Comparações de médias (Tukey)				
Tratamentos	Estimate	Std. Error	z value	Pr(> z)
B - A == 0	-0,6672	0,2322	-2,8730	0,0112 *
M - A == 0	-0,2752	0,2503	-1,1000	0,5131
M - B == 0	0,3919	0,2156	1,8180	0,1629
Hábitos	Estimate	Std. Error	z value	Pr(> z)
ARV - ARB == 0	10,5520	0,3868	2,7280	0,03013 *
HB - ARB == 0	-0,2662	0,2152	-1,2370	0,59174
HE - ARB == 0	0,6450	0,2684	2,4030	0,07185 .
HB - ARV == 0	-1,3215	0,3788	-3,4880	0,00263 **
HE - ARV == 0	-0,4102	0,4111	-0,9980	0,74188
HE - HB == 0	0,9113	0,2567	3,5500	0,00207 **

Onde B: baixo N foliar; A: alto N foliar; M: médio N foliar; ARV: árvores; ARB: abustos; HB: herbáceas basais; HE: herbáceas eretas.

Tabela 11a - Modelos finais de teste de efeito dos CWMs dos atributos na respiração basal.

Efluxo de CO ₂ ~ CWM Densidade do caule (AIC: 418,7075)				
Análise de variância				
-	numDF	denDF	F-value	p-value
(Intercept)	1	107	38,41019	<,0001***
Densidade do caule	1	107	12,13185	7e-4***
Efluxo de CO ₂ ~ CWM teor de N foliar (AIC: 217,0517)				
Análise de variância				
-	numDF	denDF	F-value	p-value
(Intercept)	1	53	25,9123	<,0001***
Teor de N foliar	1	53	4,5025	0,0385*
Efluxo de CO ₂ ~ massa acumulada de serrapilheira (MS) (AIC: 236,3826)				
Análise de variância				
-	numDF	denDF	F-value	p-value
(Intercept)	1	53	332,3821	<,0001***
MS	1	53	4,8637	0,0318*

Onde, CWM: média ponderada da comunidade; MS: massa acumulada de serrapilheira em T2.

Tabela 12a - Modelos finais de teste de efeito da diversidade funcional na respiração basal.

Efluxo de CO ₂ ~ RaoQ + Hábitos de crescimento + cota (AIC: 405,5424)				
Análise de variância				
	numDF	denDF	F-value	p-value
- (Intercept)	1	104	281,4154	<,0001
RaoQ	1	104	2,9127	0,0909
Hábitos	3	104	7,1920	0,0002**