



UNIVERSIDADE ESTADUAL DO SUDOESTE DA BAHIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM AGRONOMIA
ÁREA DE CONCENTRAÇÃO EM FITOTECNIA

MUDANÇAS NA GLOMALINA E CARBONO DO SOLO INDUZIDAS POR
SISTEMAS DE CULTIVO DE CAFÉ

TALITA OLIVEIRA DOS SANTOS

VITÓRIA DA CONQUISTA
BAHIA - BRASIL
2024

TALITA OLIVEIRA DOS SANTOS

**MUDANÇAS NA GLOMALINA E CARBONO DO SOLO INDUZIDAS POR
SISTEMAS DE CULTIVO DE CAFÉ**

Orientadora: Prof.^a Dr.^a Patrícia Anjos Bittencourt Barreto-Garcia

Coorientador: Dr. Paulo Henrique Marques Monroe

Dissertação apresentada à Universidade Estadual do Sudoeste da Bahia, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Agronomia, área de concentração em Fitotecnia, para a obtenção do título de Mestre.

VITÓRIA DA CONQUISTA

BAHIA - BRASIL

2024

S239s

Santos, Talita Oliveira dos.

Mudanças na glomalina e carbono do solo induzidas por sistemas de cultivo de café. / Talita Oliveira dos Santos, 2024.

59f. : il.

Orientador (a): Dr^a. Patrícia Anjos Bittencourt Barreto-Garcia.

Dissertação (mestrado) – Universidade Estadual do Sudoeste da Bahia, Programa de Pós-Graduação em Agronomia, Área de concentração em Fitotecnia. Vitória da Conquista, 2024.

Inclui referência F. 44 - 59.

1. Cafeeiro (*Coffea arabica*). 2. Qualidade do solo. 3. *Turnover*. 4. Agroflorestas

-
Macroagregação - Fracionamento. I. Barreto-Garcia, Patrícia Anjos Bittencourt. II. Universidade Estadual do Sudoeste da Bahia, Programa de Pós-Graduação em

Catálogo na fonte: Juliana Teixeira de Assunção – CRB 5/1890

UESB – Campus Vitória da Conquista – BA



**UNIVERSIDADE ESTADUAL DO SUDOESTE DA BAHIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM AGRONOMIA
Área de Concentração em Fitotecnia**

Campus de Vitória da Conquista, BA

DECLARAÇÃO DE APROVAÇÃO

**TÍTULO: “MUDANÇAS NA GLOMALINA E CARBONO DO SOLO INDUZIDAS
POR SISTEMAS DE CULTIVO DE CAFÉ”**

AUTOR (A): Talita Oliveira dos Santos

**Aprovada como parte das exigências para obtenção do Título de MESTRE EM
AGRONOMIA, ÁREA DE CONCENTRAÇÃO EM FITOTECNIA, pela seguinte
Banca Examinadora:**



Patrícia Anjos Bittencourt Barreto-Garcia, D.Sc. (UESB)



Emanuela Forestieri da Gama-Rodrigues, D.Sc. (UENF-RJ)



Márcio Renato Nunes, D.Sc. (*University of Florida*)

Data de realização: 31 de Janeiro de 2024.

DEDICATÓRIA

“Aos meus pais, Telma e Oilton, à
minha irmã, Taline, e aos meus avós,
Corina, Edvaldo, Aranita e Manoel.”

AGRADECIMENTOS

Aos meus pais, Telma e Oilton, e irmã, Taline, por serem minha base, fortaleza e por sempre me apoiarem.

Aos meus avós, Corina, Edvaldo, Aranita e Manoel, por me ensinarem a amar a simplicidade da vida.

Ao meu namorado, Kevin, e à minha sogra, Zilma, por serem minha segunda família e sempre me acolherem.

À toda minha família por sempre vibrarem comigo em minhas vitórias, apesar das minhas ausências necessárias.

À minha orientadora, Dra. Patrícia Barreto-Garcia, a qual agradeço pela confiança e orientações dadas a mim, as quais tornaram a caminhada do mestrado muito mais leve.

Ao meu co-orientador, Dr. Paulo Henrique Monroe, por todos os ensinamentos, conselhos e suporte dados sempre que necessário.

À Kyegla Martins, por todo companheirismo, pelos aconselhamentos e por sua amizade. Gratidão pela sua parceria no grupo de pesquisa.

Ao grupo de pesquisa Forest Soil, pelos momentos vividos como uma verdadeira equipe.

Ao Programa de Pós-Graduação em Agronomia. Obrigada a todos os docentes, coordenação e secretários por todo o suporte.

Às colegas de UESB - Eryca, Daniela, Maria Caroline, Rosilene, Romana, Jaqueline e Natielly. Obrigada pelos momentos vividos dentro e fora dos muros da universidade.

A todos os meus amigos e amigas, não citarei nomes para não ser injusta com ninguém. Obrigada por todas as conversas e momentos de descontração.

À EMBRAPA Agrobiologia e à UFRRJ (Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro), nas pessoas de Professor Marcos Gervásio e Professora Eliane Maria, que tornaram possíveis as análises de FMAs e glomalina.

À Maristela e Cristiane, por toda orientação e ajuda prestadas para realização das análises de glomalina e FMAs.

À FAPESB (Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado da Bahia), pela concessão da bolsa de apoio a esta pesquisa.

E a todos aqueles que contribuíram direta ou indiretamente para realização deste estudo, muito obrigada!

RESUMO

SANTOS. T.O. **Mudanças na glomalina e carbono do solo induzidas por sistemas de cultivo de café.** Vitória da Conquista – BA, UESB, 2024. 59p. (Dissertação: Mestrado em Agronomia; Área de Concentração: Fitotecnia).¹

Diante do papel socioeconômico que a cafeicultura representa para o Brasil, entender o funcionamento dos sistemas de cultivo e de que forma eles influenciam na qualidade do solo é de extrema importância para assegurar uma produção cafeeira sustentável. Assim, objetivou-se, com o presente estudo, responder aos seguintes questionamentos: “Os sistemas de cultivo influenciam o conteúdo de carbono e glomalina em macroagregados do solo?”; e “Como essas respostas diferem entre sistemas agrofloretais e monocultivo?”. Os tratamentos avaliados foram: um SAF (Sistema Agroflorestal) de café com *Grevillea robusta* (CG), um SAF de café com *Toona ciliata* (CC), um monocultivo de café (CM) e uma floresta nativa (FN) como referência, situados na região do Planalto da Conquista, no município de Barra do Choça, Bahia. O desenho experimental utilizado foi inteiramente casualizado com quatro repetições em cada tratamento, totalizando dezesseis unidades amostrais. Em cada parcela foi coletado um monólito com dimensão de 10 cm³ com auxílio de um gabarito e uma pá, na camada superficial de 0-10 cm do solo. Posteriormente, os monólitos foram fracionados em campo, com auxílio de jogo de peneiras sobrepostas, em quatro classes de tamanho de macroagregados: >6, 6-4, 4-2 e <2 mm. Os teores de carbono orgânico do solo, carbono lábil, nitrogênio total, glomalina total e facilmente extraível foram determinados em cada uma das classes de macroagregados, sendo a abundância dos esporos de fungos micorrízicos avaliada na camada de 0-10 cm do solo. Os resultados evidenciaram que o CG mantém os níveis de carbono orgânico na mesma proporção que a floresta nativa e aumenta os níveis de glomalina facilmente extraível, enquanto que o CC e o CM reduz os teores de carbono e glomalina no solo. O sistema agroflorestal de café com *Grevillea robusta* se mostrou com grande potencial para uma produção cafeeira sustentável, mantendo os estoques de carbono orgânico no solo. Contudo não se deve subestimar o SAF de café com *Toona ciliata*, por se tratar de um sistema ainda jovem.

Palavras-chave: qualidade do solo; *Coffea arabica*; turnover; agroflorestas; macroagregação; fracionamento.

¹ **Orientadora:** Prof.^a Dr.^a Patrícia Anjos Bittencourt Barreto-Garcia, UESB.
Coorientador: Dr. Paulo Henrique Marques Monroe, UESB.

ABSTRACT

SANTOS, T.O. **Changes in glomalin and soil carbon induced by coffee cropping systems.** Vitória da Conquista – BA, UESB, 2024. 59p. (Dissertation: Master Science in Agronomy; Area of Concentration: Crop Science).²

Given the socioeconomic role that coffee farming represents for Brazil, understanding how cultivation systems work and how they influence soil quality is extremely important to ensure sustainable coffee production. Thus, the aim of this study was to answer the following questions: “Do cultivation systems influence the carbon and glomalin content in soil macroaggregates?”; and “How do these responses differ between agroforestry and monoculture systems?” The treatments evaluated were: a coffee AFS (Agroforestry System) with *Grevillea robusta* (CG), a coffee AFS with *Toona ciliata* (CC), a coffee monoculture (CM) and a native forest (FN) as a reference, located in the region of Planalto da Conquista, in the municipality of Barra do Choça, Bahia. The experimental design used was completely randomized with four replications in each treatment, totaling sixteen sample units. In each plot, a monolith measuring 10 cm³ was collected using a template and a shovel, in the 0-10 cm surface layer of the soil. Subsequently, the monoliths were fractionated in the field, using overlapping sieves, into four macroaggregate size classes: >6, 6-4, 4-2 and <2 mm. The contents of soil organic carbon, labile carbon, total nitrogen, total and easily extractable glomalin were determined in each of the classes of macroaggregates, with the abundance of mycorrhizal fungal spores being evaluated in the 0-10 cm layer of the soil. The results showed that CG maintains organic carbon levels in the same proportion as native forest and increases levels of easily extractable glomalin, while CC and CM reduce carbon and glomalin content in the soil. The coffee agroforestry system with *Grevillea robusta* showed great potential for sustainable coffee production, maintaining organic carbon stocks in the soil. However, coffee AFS with *Toona ciliata* should not be underestimated, as it is still a young system.

Keywords: soil quality; *Coffea arabica*; turnover; agroforests; macroaggregation; fractionation.

² **Advisor:** Prof.^a Dr.^a Patrícia Anjos Bittencourt Barreto-Garcia, UESB.

Co-advisor: Dr. Paulo Henrique Marques Monroe.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Mapa de localização da cidade Barra do Choça-BA.....	19
Figura 2. Estoque de serapilheira em sistemas de cultivo de café e floresta nativa em Barra do Choça, Bahia, Brasil.....	26
Figura 3. Massa de raízes do solo em sistemas de cultivo de café e floresta nativa em Barra do Choça, Bahia, Brasil.....	27
Figura 4. Carbono total (CT) e nitrogênio total (NT) do solo em sistemas de cultivo de café e floresta nativa em Barra do Choça, Bahia, Brasil.....	28
Figura 5. Número de esporos de fungos micorrízicos arbusculares (A) e riqueza média de espécies de fungos micorrízicos arbusculares (B) em sistemas de cultivo de café e floresta nativa em Barra do Choça, Bahia, Brasil.....	29
Figura 6. Efeito da interação na distribuição de macroagregados em sistemas de cultivo de café e floresta nativa em Barra do Choça, Bahia, Brasil.....	31
Figura 7. Massa de raízes de macroagregados do solo em sistemas de cultivo de café e floresta nativa em Barra do Choça, Bahia, Brasil: (A) comparação entre sistemas e (B) comparação entre classes de agregados.....	32
Figura 8. Carbono lábil (CL), carbono não lábil (CNL) e nitrogênio total (NT) de macroagregados do solo em sistemas de cultivo de café e floresta nativa em Barra do Choça, Bahia, Brasil.....	33
Figura 9. Proteína de solo relacionada a glomalina facilmente extraível (PSRG-FE) e total (PSRG-T) de macroagregados do solo em sistemas de cultivo de café e floresta nativa em Barra do Choça, Bahia, Brasil: (A) comparação da PSRG-FE entre sistemas e (B) comparação da PSRG-T entre classes de tamanho de agregados.....	34
Figura 10. Diagrama de ordenação produzido com a análise de componentes principais (A) e matriz de correlação de Pearson (B) de atributos do solo, raízes e serapilheira em sistemas de cultivo de café e floresta nativa em Barra do Choça, Bahia, Brasil.....	35

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Caracterização do solo (profundidade 0-10 cm) em sistemas de cultivo de café e floresta nativa no município de Barra do Choça, Bahia, Brasil.....	20
Tabela 2. Caracterização de três sistemas de cultivo de café e floresta nativa no município de Barra do Choça, Bahia, Brasil.....	21
Tabela 3. Análise de variância da porcentagem de agregados, massa de raízes, carbono lábil, carbono total, nitrogênio total, proteína do solo relacionada a glomalina total e facilmente extraível em classes de agregados em sistemas de cultivo de café e floresta nativa.....	30

LISTA DE ABREVIATURAS, SIGLAS E SÍMBOLOS

SAFs	Sistemas agroflorestais
MOS	Matéria orgânica do solo
COS	Carbono orgânico do solo
C	Carbono
N	Nitrogênio
FMAAs	Fungos micorrízicos arbusculares
RF	Raízes finas
FN	Floresta nativa
CG	Sistema agroflorestral de café com grevilea
CC	Sistema agroflorestral de café com cedro australiano
CM	Café monocultivo
U%	Umidade do solo em %
CT	Carbono total
CL	Carbono lábil
NT	Nitrogênio total
TPC	Taxa de perda de carbono
PSRG-T	Proteína do solo relacionada a glomalina – total
PSRG-FE	Proteína do solo relacionada a glomalina – facilmente extraível
ACP	Análise de componentes principais

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	13
2	REFERENCIAL TEÓRICO	15
2.1	Café em sistemas agroflorestais	15
2.2	Carbono orgânico do solo	16
2.3	Agregados do solo	17
2.4	Fungos micorrízicos arbusculares e glomalina	19
3	MATERIAL E MÉTODOS	21
3.1	Descrição da Área experimental	21
3.2	Amostragem de solo e serapilheira	23
3.3	Umidade do solo	24
3.4	Fracionamento seco de macroagregados	24
3.5	Carbono e nitrogênio total e carbono lábil	25
3.6	Massa de raízes	25
3.7	Glomalina	25
3.8	Fungos micorrízicos arbusculares	26
3.9	Análise estatística dos dados	26
4	RESULTADOS	28
4.1	Serapilheira e raízes	28
4.2	Carbono e nitrogênio do solo	29
4.3	Fungos micorrízicos arbusculares	30
4.4	Raízes, carbono, nitrogênio e glomalina em agregados do solo	31
4.5	Análise de componentes principais	36
5	DISCUSSÃO	38
5.1	Serapilheira e raízes	38
5.2	Carbono e nitrogênio do solo	38
5.3	Fungos micorrízicos arbusculares	39
5.4	Raízes, carbono, nitrogênio e glomalina em agregados do solo	39
5.5	Análise de componentes principais	42
6	CONCLUSÕES	43
7	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	44

1 INTRODUÇÃO

A cafeicultura representa uma das principais *commodities* do Brasil, com área plantada de aproximadamente 2,2 milhões de hectares, levando o país a liderar o *ranking* mundial de produção e exportação de café (Conab, 2021). Até junho de 2022, o volume em sacas de 60 kg exportado foi de 3.144.334 unidades, segundo dados do Conselho dos Exportadores de Café do Brasil, o que comprova a importância socioeconômica dessa cultura para o país.

Coffea arabica L. é a espécie mais cultivada do gênero *Coffea* e responde por cerca de 76,6% do café comercializado mundialmente (USDA, 2019; USDA, 2020). No Brasil, a espécie é cultivada predominantemente em condições de pleno sol (monocultivo), mas também é comum a adoção de cultivo sombreado, principalmente em consórcio ou sistema agroflorestal com banana ou espécies arbóreas (como *Grevillea robusta* e outras espécies madeireiras). O monocultivo de café pode ter implicações negativas tanto em nível de cultura – como a produção excessiva devido ao *stress* das plantas pela alta intensidade de luz (Voltan et al., 1992) – quanto em nível de ambiente – como o aumento da temperatura e redução da umidade do solo e das entradas de matéria orgânica (Nigussie et al., 2014).

Estudos sobre a dinâmica e estrutura de sistemas agroflorestais (SAFs) de café constataram a importância do sombreamento para otimizar as condições microclimáticas das plantas de café e do solo (Barradas e Fanjul, 1986; Babbar e Zak, 1995; Campanha et al., 2007). Estes sistemas mantêm ou aumentam os reservatórios de matéria orgânica do solo (MOS) quando comparados à floresta nativa (Muche et al., 2022, Dori et al., 2022). A MOS favorece a agregação do solo devido ao seu efeito ligante, que possibilita a aproximação e cimentação das partículas primárias do solo (areia, argila e silte) (Six et al., 2004; Mulumba e Lal, 2008; Noellemeyer et al., 2008; Brady e Weil, 2013).

A agregação do solo promove a formação de estruturas de diferentes formas e tamanhos, dentre as quais estão os macroagregados ($> 0,25$ mm), que costumam ser categorizados em grandes (>2 mm), médios (1-2 mm) e pequenos (0,25-1 mm) (Kemper e Rosenau, 1986, Sun et al., 2024). Essas estruturas promovem a proteção física da MOS (O'Brien e Jastrow, 2013), criando um efeito de revestimento e isolamento que proporciona inacessibilidade física de microrganismos decompositores, enzimas extracelulares e oxigênio ao interior dos agregados. A proteção física da MOS dentro dos agregados é considerada a principal forma de estabilização de carbono orgânico do solo (COS) (Six et al. 2002).

Além da MOS, outro agente cimentante dos agregados que merece destaque é a glomalina, uma glicoproteína produzida por fungos micorrízicos arbusculares (FMAs) (Wright e Upadhyaya, 1998), que é constituinte da parede celular de suas hifas e esporos e se acumula no solo após a morte e decomposição dessas estruturas (Moreira e Siqueira, 2006; Gillespie et al., 2011). Esse acúmulo promove a formação de complexos organominerais, ligando as partículas do solo e atuando como um agente de estabilização, com consequências positivas para o armazenamento de carbono no solo (Singh et al., 2013; Wu et al., 2012). Além do seu papel na agregação e proteção do carbono, a glomalina também é considerada a fonte mais importante desse elemento no reservatório ativo de COS (Wright e Nichols, 2002, Rillig et al., 2003a), podendo ser responsável por até 27% do carbono no solo (Comis, 2002; Schindler et al., 2007).

Embora a glomalina seja considerada um componente crucial para o reservatório de COS dos ecossistemas (Wright e Upadhyaya, 1996; Jia et al., 2016), ainda são escassos os estudos focados na influência da glomalina no armazenamento de carbono em macroagregados grandes (>2 mm) sob influência de sistemas de cultivo de café (monocultivos e SAFs), especialmente estudos em que se façam comparações com florestas nativas. Tais estudos podem auxiliar na compreensão de como os sistemas de cultivo de café interferem no armazenamento e proteção física do COS e quais os mecanismos envolvidos nesse processo, fornecendo subsídios para assegurar a sustentabilidade da cafeicultura.

Diante do exposto, este estudo foi desenvolvido a partir da avaliação de amostras de solo coletadas em três sistemas de cultivo de café (dois SAFs e um monocultivo), utilizando como referência uma floresta nativa. Assumiu-se as seguintes hipóteses: (1) o sistema agroflorestal de café com *Grevillea robusta* favorece o armazenamento de carbono e glomalina no solo e em macroagregados como resultado das suas maiores entradas de resíduos orgânicos acima e abaixo do solo; (2) o sistema agroflorestal de café com *Toona ciliata*, assim como o monocultivo de café, proporciona redução dos teores de carbono e glomalina no solo e nos macroagregados, devido ao baixo estoque de resíduos orgânicos e maior exposição do solo. Objetivou-se responder as seguintes questões: os sistemas de cultivo influenciam o conteúdo de carbono e glomalina em macroagregados do solo? Como essas respostas diferem entre sistemas agroflorestais e monocultivo?

2 REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 Café em sistemas agroflorestais

O uso de sistemas conservacionistas de uso e manejo do solo vem sendo enfatizado nos últimos tempos, principalmente no que se refere à melhoria e manutenção dos atributos químicos, físicos e biológicos do solo e suas implicações para o rendimento das culturas (Argenton et al., 2005). Os SAFs destacam-se entre os principais sistemas de cultivo conservacionistas adotados no Brasil e no mundo, uma vez que proporcionam muitos benefícios sociais, ambientais e econômicos.

Dentre os principais benefícios dos SAFs, estão a diversificação da renda (promovendo segurança alimentar e consumo dos próprios produtos produzidos na fazenda, como frutas, madeira), melhoria da qualidade do café, diminuição da bialidade na produção da cultura, conservação da biodiversidade (incluindo agentes polinizadores), regulação de fitopatógenos, melhoria do *status* hídrico do solo, maior eficiência no uso da luz e no sequestro de carbono (Perfecto et al., 1996; Muschler, 2001; Damatta, 2004; Lin, 2007; Jha et al., 2014; Charbonnier et al., 2017; Schnabel et al., 2017; Avelino et al., 2018). Esses sistemas tem como grande diferencial a presença do componente arbóreo, que proporcionam sombreamento (Moguel e Toledo, 1999) e microclima que condiz com a ecofisiologia do cafeeiro (Damatta, 2004). A cobertura arbórea, além de tudo isso, protege o solo contra erosões e propicia um aporte constante de matéria orgânica para o solo.

Os SAFs possuem maior potencial do que cultivos de monoculturas para o sequestro e armazenamento do CO₂ atmosférico na biomassa vegetal e nos solos, colaborando com a mitigação das alterações climáticas (Nair et al., 2010, 2021; Luedeling et al., 2014; Mbow et al., 2014). Vários são os fatores que contribuem para que solos sob SAFs sejam mais eficientes em sequestrar C do que solos sob monoculturas, como a eficiência do ciclo do carbono no sistema solo-planta, um maior retorno de biomassa ao solo e uma diminuição da decomposição de biomassa nas camadas mais profundas do solo (Apolinário et al., 2016; Montagnini e Nair, 2004; Nair, 2012; Oelbermann et al., 2006; Saha et al., 2010; Tonucci et al., 2011).

Em média, sistemas agroflorestais de café sombreados recebem contínua deposição de serapilheira, chegando até 10 Mg ha⁻¹ ano⁻¹ em alguns casos (Beer et al., 1998). Os estoques de COS em sistemas de café sombreados são elevados em grande parte das regiões produtoras de café no mundo e geralmente correspondem a uma média de 150 Mg de C ha⁻¹ ano⁻¹ até a profundidade de 60 cm (Abou Rajab et al. 2016; Valencia

et al. 2014). Esse efeito varia de acordo com as características do SAF e do ambiente, que condiciona a produção de biomassa, resíduos de vegetais e insumos (Tian et al., 2007) e os tempos de residência da serapilheira (Hairiah et al., 2006) e, como consequência, influencia os estoques de COS e a qualidade do solo (Kibblewhite et al., 2008).

2.2 Carbono orgânico do solo

Os solos exercem papel fundamental na regulação das mudanças climáticas (Minasny et al., 2017; Pachauri e Meyer, 2015), uma vez que constituem o principal reservatório de carbono do ecossistema terrestre (Lal, 2004; Stockmann et al., 2015). De acordo com sua composição e manejo, os sistemas de uso da terra influenciam os estoques de carbono sequestrado no solo diferente (Richter et al., 1999; Spivak et al., 2019; Tonucci et al., 2017), sendo que sistemas mais intensivos de uso do solo funcionam como fonte de C para a atmosfera (Aryal et al., 2018; Nair et al., 2021; Xu et al., 2020). Por outro lado, sistemas mais conservacionistas, como os SAFs, possuem grande capacidade de armazenar carbono da atmosfera na sua biomassa e potencializar a capacidade de armazenamento de carbono no solo, pela grande adição de resíduos orgânicos (via serapilheira e *turnover* de raízes) e consequente incorporação de matéria orgânica (Costa et al., 2006).

As raízes em geral, e em particular as raízes finas, constituem uma importante entrada de carbono no solo (Liao et al., 2014). O grau de contribuição de carbono de raiz fina no COS depende do sistema de uso da terra, o que determina a arquitetura da raiz, a taxa de ciclagem, os exsudados radiculares e a colonização por micorrizas (Hertel et al., 2009; Pollierer et al., 2012).

O carbono orgânico do solo proporciona vários benefícios para o sistema solo-planta, como a melhoria da ciclagem dos nutrientes, a retenção de água e capacidade entre troca de cátions do solo (Vieira et al., 2009; Mendonça et al., 2013) e a estabilidade de agregados do solo (Tisdall e Oades, 1982; Six et al., 2002; Six e Paustian, 2014; Tisdall e Oades, 1982). A fração lábil do carbono é mais responsável por esta estabilidade do que a quantidade total de COS (Capriel et al., 1990; Albrecht et al., 1992; Le Bissonnais, 1996).

A distribuição e tempo de permanência do C no solo são controlados por uma infinidade de fatores que variam amplamente entre as escalas. Em escala global, o COS e sua dinâmica são mais afetadas pelo clima (ou seja, temperatura, precipitação e evaporação), enquanto que as propriedades físicas e químicas e os organismos do solo

têm mais importância na escala local (O'rourke et al., 2015; Wiesmeier et al., 2019; Cotrufo et al., 2021), embora muitas vezes seja difícil separar tais efeitos.

Os principais mecanismos responsáveis pela estabilidade do carbono orgânico no solo são a recalcitrância química inerente ao componente orgânico, a ligação química da MOS disponível com os minerais de tamanho de argilas e a oclusão da matéria orgânica dentro dos agregados (Christensen, 2002). A oclusão dentro dos agregados proporciona proteção física do COS contra a decomposição devido a inacessibilidade física a microrganismos, enzimas extracelulares e oxigênio. A ligação da MOS com minerais ocorre pela sorção da MOS nas superfícies minerais do solo por meio de cátions polivalentes, proporcionando a proteção química do COS. Por sua vez, a recalcitrância da MOS determina a proteção bioquímica do COS e isso ocorre através da transformação bioquímica em produtos que sejam resistentes ao ataque microbiano (como substâncias húmicas, por exemplo) (Six et al. 2002; Sarkhot et al. 2007; O'brien e Jastrow 2013; Zhao et al., 2017).

2.3 Agregados do solo

Os agregados do solo são originados a partir de mecanismos de aproximação e cimentação das partículas primárias do solo, que são diretamente influenciados pela MOS (Six et al., 2004; Mulumba e Lal, 2008; Noellemeyer et al., 2008; Brady e Weil, 2013). Além de ser condicionada pela presença de MOS, a agregação é influenciada por diversos outros fatores, como raízes, fauna edáfica, agentes inorgânicos, fatores ambientais e manejo do solo. Ou seja, a interação entre esses fatores regula a formação e estabilização dos agregados do solo (Six et al., 2004; Bronick e Lal, 2005; Rilling e Mummey, 2006). Os agregados são conjuntos heterogêneos de partículas minerais e orgânicas (Six et al. 2004).

A agregação do solo dá origem a estruturas de diferentes formas e tamanhos. Essas estruturas são organizadas hierarquicamente através da associação da MOS em duas frações físicas do solo: microagregados (<0,250 mm) e macroagregados (>0,250 mm) (Oades, 1984). Os macroagregados contém, principalmente, frações de carbono orgânico ativas e lábeis que são oriundas especialmente de recursos orgânicos (Six et al. 2004) e podem ser categorizados em: extragrandes (8–19 mm) (Tivet et al., 2013), grandes (>2mm), médios (1-2 mm) e pequenos (0,25-1 mm) (Kemper e Rosenau, 1986, Sun et al., 2024). Por outro lado, os microagregados (<250 µm) são constituídos por frações de COS mais estáveis que são formados a partir de macromoléculas humificadas (Gao et al. 2015).

Os agregados do solo promovem a proteção física de partículas de MOS e criam microambientes que reduzem a acessibilidade física de microrganismos decompositores, enzimas extracelulares e oxigênio ao interior dos agregados (Guan et al., 2019). Essa proteção é considerada a principal forma de estabilização de carbono orgânico do solo (Six et al., 2002). Christensen (1992) observou que a proteção da MOS varia entre classes de tamanho de agregados, que podem se ligar a frações específicas da MOS. Tiessen e Stewart (1983) e Feller et al. (1996) observaram que a MOS em macroagregados (>250 μm) é frequentemente menos estável do que a MOS nas frações de silte e argila (<50 μm) e nos microagregados. Tivet et al. (2013) relataram a predominância de macroagregados extragrandes (8–19 mm) em solos sob sistemas de plantio direto e, vegetação nativa em condições tropicais e subtropicais – o que é indicativo de que a macroagregação pode ser utilizada como um indicador da proteção das frações lábeis do COS oriundas da decomposição de resíduos vegetais (Castro Filho e Lourenço, 2002; Madari et al., 2005; Tivet et al., 2013).

Tisdall e Oades (1982) postularam a hierarquia da agregação, considerada o avanço teórico mais significativo nos estudos da interação entre agregado e MOS. Segundo os autores, diferentes agentes ligantes atuam em diferentes estágios hierárquicos da agregação: partículas primárias livres (<20 μm) uniam-se em microagregados (20-250 μm) por meio da ação de agentes ligantes persistentes (MOS humificada e polissacarídeos), cátions polivalentes, argilas e óxidos; esses microagregados estáveis, por conseguinte, uniam-se em macroagregados (>250 μm) pela ação de agentes de ligação temporários (raízes e hifas de fungos) e agentes transitórios (MOS particulada e polissacarídeos). Devido a essa hierarquização dos agregados e seus agentes ligantes, os microagregados são mais estáveis e menos dependentes do manejo agrícola adotado em comparação aos macroagregados.

Nesse modelo adotado por Tisdall e Oades (1982) fica implícito que os microagregados são formados livremente no solo através da junção das partículas primárias e depois unem-se formando os macroagregados. Adicionalmente, Oades (1984), dois anos após a publicação do modelo hierárquico, postulou que as raízes e as hifas que unem os macroagregados, após serem decompostas, formam fragmentos revestidos de mucilagens que vão sendo incrustadas com argilas, servindo de núcleo de formação para microagregados dentro dos macroagregados – teoria esta que ainda hoje é aceita.

2.4 Fungos micorrízicos arbusculares e glomalina

Os fungos micorrízicos arbusculares (FMAs) são importantes organismos edáficos, essenciais para a fertilidade do solo e nutrição vegetal (Smith e Read, 1997). Além disso, esses organismos desempenham um papel importante na translocação de nutrientes do solo para as raízes das plantas e de carbono das raízes para o solo (Miller e Jastrow, 2000; Zhu e Miller, 2003). Isso proporciona benefícios nutricionais e viabiliza o crescimento das plantas em suas diferentes fitofisionomias (Rubin e Stürmer, 2015; Lehmann et al., 2017; Singh et al., 2018; Marinho et al., 2019). Nos sistemas ecológicos, os FMAs são importantes componentes para as comunidades de fungos do solo e representam cerca de 30% da massa microbiana (Olsson et al., 1999).

Os tratos culturais em lavoura, a aplicação de pesticidas e a fertilização química afetam diretamente na ocorrência de FMAs, impactando a atividade biológica do solo (Sieverding, 1991; Johnson e Pflieger, 1992; helgason et al., 1998). Por essa razão, os FMAs são considerados bons indicadores de mudanças no ecossistema, mostrando-se sensíveis aos sistemas de uso e manejo do solo e a intensidade de cultivo (Lin et al., 2012, Oehl et al., 2010).

A atividade dos FMAs possui um papel fundamental para a dinâmica de formação dos agregados e para a estabilidade da estrutura do solo. Esses fungos encontram-se dentre os grupos de microrganismos que atuam em funções importantes para a estruturação do solo, uma vez que favorecem a formação e estabilização dos agregados (Rubin e Stürmer, 2015; Lehmann et al., 2017; Singh et al., 2018; Marinho et al., 2019). Essa influência positiva dos FMAs ocorre devido ao efeito mecânico da distribuição de suas hifas extraradiculares e também devido ao acúmulo de proteínas no solo, como a glomalina (Rillig et al., 2017; Lehmann et al., 2017). As hifas atuam de forma mecânica orientando as partículas do solo durante o seu crescimento no micélio extra radicular do fungo, o que causa uma pressão nas partículas formando microagregados circunvizinhos ao micélio e, posteriormente, pela liberação de glomalina que proporciona uma ação cimentadora aos agregados do solo (Vilela et al., 2014; Rubin e Sturmer; 2015; Lehmann et al., 2017; Kinany et al., 2018).

A glomalina é uma glicoproteína especial, produzida pelos FMAs, como um constituinte da parede celular de suas hifas e esporos e se deposita no solo com a decomposição dessas estruturas (Moreira e Siqueira, 2006; Gillespie et al., 2011). Com essa deposição, a glomalina atua como um agente de estabilização, ligando as partículas do solo e favorecendo a agregação e proteção física do COS. Essa glicoproteína também

é considerada um importante constituinte do reservatório de COS (Wright e Nichols, 2002, Rillig et al., 2003a), contribuindo com até 27% do carbono no solo (Comis, 2002; Schindler et al., 2007).

A glomalina é quantificada como proteína do solo relacionada à glomalina (PSRG) (Wright e Upadhyaya, 1998), podendo indicar a vitalidade de FMAs e sua contribuição para a melhoria da qualidade do solo e armazenamento de carbono (Zhang et al., 2017a, 2017b; Qiang et al., 2019).

3 MATERIAL E MÉTODOS

3.1 Descrição da Área experimental

O estudo foi realizado em áreas de cultivo comercial de café, situadas no município de Barra do Choça, estado da Bahia, Brasil (coordenadas geográficas: 14°54'46" de latitude sul e 40°36'39" de longitude oeste) (Figura 1). O clima local é tropical de altitude (Cwb), segundo a classificação climática de Koppen-Geiser (Alvares et al., 2013), com temperatura média e precipitação pluviométrica anual de 20,4 °C e 854 mm, respectivamente (Climate-data.org, 2021).

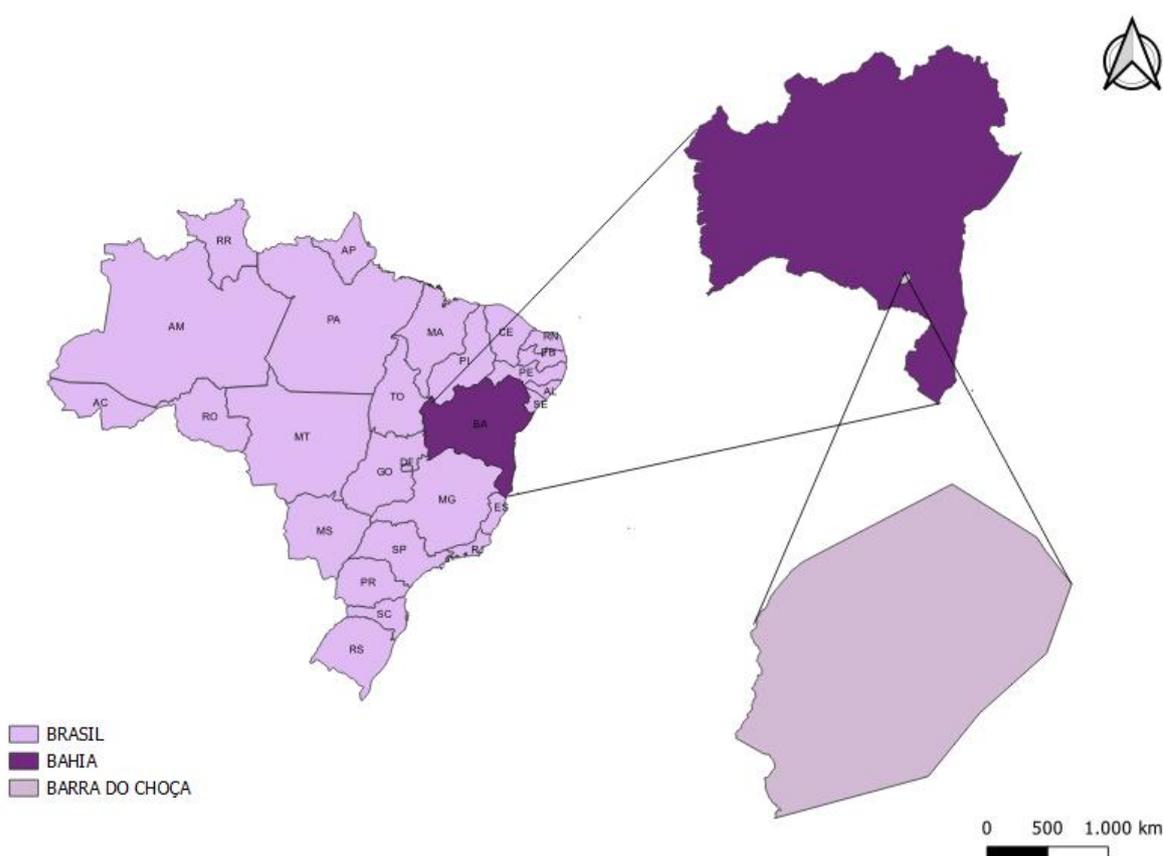


Figura 1: Mapa de localização da cidade Barra do Choça – BA.

O solo é classificado como Latossolo Amarelo Distrófico, de acordo com o Sistema Brasileiro de Classificação de Solos (Santos et al., 2018) e Oxisol, de acordo com o sistema de classificação americano – *Soil Taxonomy* (Soil Survey Staff, 2014). O solo possui textura argilo-arenosa, média acidez e entre baixa e média fertilidade, apresentando caracterização química e física conforme Tabela 1.

Tabela 1. Caracterização do solo (profundidade 0-10 cm) em sistemas de cultivo de café e floresta nativa no município de Barra do Choça, Bahia, Brasil.

Trat.	pH	P	K ⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺	H+Al	Argila	Areia	Silte	U
	H ₂ O			Cmol _c dm ⁻³				g kg ⁻¹		%
FN	4,2	4	0,16	1,0	0,8	20,6	480	430	90	31,26 a
CG	4,8	21	0,39	4,2	1,5	10,9	530	450	20	33,18 a
CC	5,2	3	0,37	5,3	2,6	4,7	450	510	40	22,77 b
CM	4,8	8	0,46	2,3	1,5	9,8	550	405	45	22,47 b

Em que: FN – floresta nativa; CG – sistema agroflorestal de *Coffea arabica* com *Grevillea robusta*; CC – sistema agroflorestal de *Coffea arabica* com *Toona ciliata*; CM – monocultivo de *Coffea arabica*; U – umidade do solo; Ds – densidade do solo.

Foram avaliados três sistemas de cultivo de café (dois sistemas agroflorestais e um monocultivo) e uma área de vegetação nativa (floresta nativa). A Tabela 2 apresenta uma caracterização de cada um dos sistemas estudados: área, ano de implantação, densidade e histórico. A floresta nativa tem vegetação classificada como Floresta Estacional Semidecidual (transição entre os biomas Mata Atlântica e Caatinga), possui estrato arbóreo entre 10 e 15 m, está localizada próximo aos cafezais e foi utilizada como testemunha para representar a condição original das áreas antes da implantação dos sistemas de cultivo.

Tabela 2. Caracterização de três sistemas de cultivo de café e floresta nativa no município de Barra do Choça, Bahia, Brasil.

Sistema	Área	Ano	Densidade	Histórico
FN	6 ha.	-	-	Vegetação não sofre interferência antrópica a pelo menos 20 anos
CG	14 ha.	2000	Arranjo espacial contínuo com uma linha de grevilea a cada 5 linhas de café, totalizando 10.000 plantas de café ha ⁻¹ . Espaçamentos: 3,0m entre árvores na linha de plantio e 12,0m entre as linhas de grevilea; 0,5m entre plantas e 2,0m entre linhas de café.	Implantação: limpeza da área, abertura de covas e adubação localizada com KCl (50g) e superfosfato simples (300g); Adubação de cobertura: ureia até 2018 (200g planta ⁻¹ ano ⁻¹) e palha de café nas linhas de café a partir de 2018; Irrigação: gotejamento duas vezes por semana; Colheita: mecanizada; Controle de ervas daninhas: capinas e herbicida nas entrelinhas.
CC	34 ha.	2014	Arranjo espacial contínuo com uma linha de cedro a cada 5 linhas de café, totalizando 6.000 plantas de café ha ⁻¹ . Espaçamentos: 16,5m entre linhas x 3,0 m entre árvores na linha de plantio; 3,3 m entre linhas x 0,5 m entre plantas de café.	Mesmo histórico do CG.
CM	24 ha.	2006	Espaçamento adensado de 2,0 m entre linhas x 0,5 m entre plantas, totalizando 10.000 pés/ha.	Mesmo histórico do CG.

Em que: FN – floresta nativa; CG – sistema agroflorestal de *Coffea arabica* L. com *Grevillea robusta* (A. Cunn.); CC – sistema agroflorestal de *Coffea arabica* L. com *Toona ciliata* M. Roem; CM – monocultivo de *Coffea arabica* L.; Ano – ano de implantação.

3.2 Amostragem de solo e serapilheira

Para amostragem de solo e serapilheira, quatro parcelas de 20 × 20 m foram demarcadas de forma aleatória e independente em cada um dos sistemas avaliados (assegurando 20 m de distância mínima entre parcelas). As quatro parcelas dentro de cada sistema foram consideradas repetições. Ainda que seja sabido que a ausência de um delineamento experimental pode interferir na interpretação dos dados, constatamos que desenhos experimentais similares foram adotados em vários estudos que objetivaram avaliar o efeito do uso da terra em atributos do solo (Santos et al., 2019; Barreto-Garcia et al., 2021; Nascimento et al., 2021; Oliveira et al., 2022; Monroe et al., 2022; Dori et

al., 2022) e que estes foram relevantes para avaliar sistemas de longo prazo já estabelecidos, nos quais não são aplicáveis ensaios de campo randomizados.

Em cada parcela, foram adotadas duas formas de amostragem de solo: (1) coleta de monólitos – foram retirados monólitos com dimensões de 10 × 10 cm nos primeiros 10 cm de profundidade, com auxílio de pá e distribuição aleatória nas entrelinhas dos cafeeiros e cafeeiro-árvore; e (2) coleta com auxílio de trado holandês - foram retiradas três amostras simples (profundidade 0 – 10 cm) por caminhamento aleatório e estas foram reunidas para obter uma amostra composta. As amostras da coleta (1) foram empregadas para o fracionamento seco em classes de tamanho e determinação de teores de carbono, nitrogênio e glomalina, enquanto as amostras (2) foram utilizadas para avaliação da umidade e FMAs.

A amostragem de serapilheira foi realizada nas mesmas parcelas descritas anteriormente, com o auxílio de um gabarito com dimensões 25 × 25 cm. Em todos os sistemas, o gabarito foi lançado de maneira aleatória, assegurando a representatividade das diferentes condições encontradas no interior dos sistemas de cultivo. Assim, em cada parcela, o gabarito foi lançado na linha e entrelinha dos cafeeiros no monocultivo; e na linha dos cafeeiros, linha das árvores e entrelinha cafeeiro-árvore nos sistemas agroflorestais. As subamostras foram reunidas para formar uma amostra composta de cada parcela experimental, totalizando quatro amostras compostas por tratamento. Após a coleta, estas foram triadas e separadas em quatro frações: folhas, galhos+cascas, material reprodutivo e miscelânea. As frações foram secas em estufa a 60 °C, até alcançar peso seco constante e, posteriormente, foram pesadas em balança semi-analítica. Os dados de massa seca (g) foram convertidos para Mg ha⁻¹.

3.3 Umidade do solo

Após coleta, as amostras de solo foram levadas para laboratório em sacos plásticos vedados para determinar sua massa úmida. Posteriormente foram secas em estufa de circulação forçada de ar a 105 °C por 48 horas. Após a secagem, as amostras foram pesadas para determinar o teor de umidade pela seguinte equação: $U\% = ((\text{massa úmida} - \text{massa seca}) / \text{massa seca}) * 100$.

3.4 Fracionamento seco de macroagregados

Os monólitos de solo coletados foram cuidadosamente destorroados de forma manual ao longo das suas linhas de quebra naturais, conforme adotado por Pereira et al.

(2021) e, posteriormente, foram submetidos a peneiramento seco, utilizando-se uma sequência de peneiras com malha de 6, 4 e 2 mm sucessivamente. No peneiramento, as amostras foram agitadas manualmente em movimentos horizontais de aproximadamente 4 cm de amplitude, durante um minuto, separando-se os agregados em quatro classes de tamanho: >6 mm (retidos na peneira de 6mm), 6-4mm (retidos na peneira de 4mm), 4-2 mm (retidos na peneira de 2mm) e <2mm (retidos no fundo da peneira de 2mm). Os agregados pertencentes a cada classe foram secos ao ar durante quatro semanas e pesados para determinação da contribuição de cada classe de agregados em relação à massa total do solo.

3.5 Carbono e nitrogênio total e carbono lábil

As concentrações de carbono total (CT) e nitrogênio total (NT) do solo como um todo e de cada classe de agregados foram determinadas por combustão seca em um sistema analisador elementar automatizado, o Perkin-Elmer Series II 2400 CHNS/O. O carbono lábil (CL) das classes de agregados foi determinado por oxidação úmida com permanganato de potássio, conforme Blair et al. (1995).

A taxa de perda de carbono do solo (TPC) nos sistemas de cultivo estudados foi calculada por meio da equação seguinte:

$$TPC = (CT_R - CT_{SC}) / T$$

Em que: TPC = taxa de perda do carbono total; CT_R = carbono total do tratamento de referência ($Mg\ ha^{-1}$) (floresta nativa); CT_{SC} = carbono total do sistema de cultivo ($Mg\ ha^{-1}$); T = período em anos.

3.6 Massa de raízes

Subamostras de 50 g das classes de agregados >6, 6 – 4, 4 – 2 e <2mm foram utilizadas para quantificação da massa de raízes (Tennant, 1975). As amostras de solo foram destorroadas e lavadas em água abundante, com auxílio de duas peneiras de 2 mm e 0,250 mm sobrepostas, até que restassem apenas as raízes. Após a separação, as raízes foram secas em estufa a 60 °C por 48 horas e pesadas em balança semi-analítica.

3.7 Glomalina

A extração de glomalina foi realizada nas amostras de solo das diferentes classes de agregados. A glomalina foi quantificada como proteína do solo relacionada à glomalina (PSRG) e classificada em duas frações que foram diferenciadas com base nas

condições de extração: PSRG-FE – PSRG facilmente extraível e PSRG-T – PSRG total (Wright e Upadhyaya, 1998). PSRG-FE foi obtida por meio da extração em autoclave, utilizando 1 g de solo e 8 ml de solução de citrato de sódio 20 mM (pH 7,0) a uma temperatura de 121 °C por 30 minutos, apenas uma vez. PSRG-T foi obtida nas mesmas proporções da fração PSRG-FE, com exceção da concentração do extrator e tempo no autoclave: citrato de sódio 50 mM, (pH 8,0) a 121 °C durante 60 minutos. Para extração dessa última fração, foram necessários mais de um ciclo de autoclavagem (cinco a 10 ciclos, dependendo da amostra) até que a amostra atingisse a cor amarela-clara. Em ambas as frações, após a extração em autoclave, as amostras foram centrifugadas a 5000 rpm, durante 5 minutos. Os sobrenadantes foram transferidos para vidros de penicilina e armazenados em refrigerador até a finalização de todos os ciclos de autoclavagem. As frações da glomalina foram quantificadas utilizando o método de Bradford (1976) modificado por Wright et al. (1996), que utiliza soroalbumina bovina como padrão. Posteriormente, após a quantificação, as concentrações das duas frações de glomalina foram determinadas por meio de leitura da absorbância em espectrofotômetro a 595nm e, após isso, convertidas para mg g⁻¹ de solo.

3.8 Fungos micorrízicos arbusculares

Para extração dos esporos de fungos micorrízicos arbusculares (FMA), foram utilizados 50 g de cada amostra de solo, empregando-se a técnica de peneiramento úmido (Gerdemann e Nicolson, 1963) e centrifugação em gradiente de densidade com água e sacarose 45% (Jenkins, 1964). Posteriormente, realizou-se a contagem de esporos e identificação das espécies com o auxílio de um microscópio estereoscópico, consultando o manual de Schenck & Pérez (1988) e o site da coleção internacional da FMA-INVAM (2022).

3.9 Análise estatística dos dados

Os dados foram testados quanto a normalidade (teste de Lilliefors, $\alpha = 5\%$) e homogeneidade (teste de Cochran, $\alpha = 5\%$). Após constatar dados paramétricos, foi realizada análise de variância, considerando um esquema fatorial 4 × 4 para verificar o efeito isolado e de interação dos sistemas de cultivo e das classes de agregados nas variáveis massa de raízes, CL, CT, NT, PSRG-T e PSRG-FE. Foram realizadas comparações múltiplas das médias pelo teste LSD de Fisher a 5% de significância.

Os dados foram submetidos à análise de componentes principais (ACP) com finalidade de sintetizar a variação multidimensional dos tratamentos em um plano cartesiano e ordená-los nos componentes de acordo com suas similaridades com base nas variáveis consideradas (Ter Braak, 1986). Para esta análise, foram utilizadas as variáveis mais discriminantes de diferenças entre tratamentos: serapilheira, FMAs, CT, NT, CL e massa de raízes do solo, porcentagens das quatro classes de agregados e valores médios de massa de raízes, CT, CL, NT e PSRG-FE das classes de agregados. Adicionalmente, a relação entre estas variáveis foi avaliada por meio da análise de correlação de Person a 5% de significância. As análises foram realizadas com auxílio dos *softwares* StatSoft Statistica® versão 12.0 (Statsoft, 1974-2009), Xlstat® versão 19.2.2 (Addinsoft, 2019), R® version 4.3.2 e SigmaPlot® versão 14.0 (Systat, 2010). Estes dois últimos *softwares* também foram empregados para construção dos gráficos.

4 RESULTADOS

4.1 Serapilheira e raízes

Os estoques de serapilheira total e da fração miscelânea foram inferiores no CC e no monocultivo (média de 13,35 Mg ha⁻¹) e superior no CG, que não se diferenciou da floresta nativa (Figura 2). A fração galhos+cascas mostrou similaridade entre os dois SAFs, que superaram o CM, mas foram inferiores à FN. Por sua vez, a fração folhas não expressou diferenças entre os sistemas de cultivo e a floresta nativa, no entanto o CG foi superior ao CM. A fração material reprodutivo teve valor superior no CG em relação ao CC e à FN.

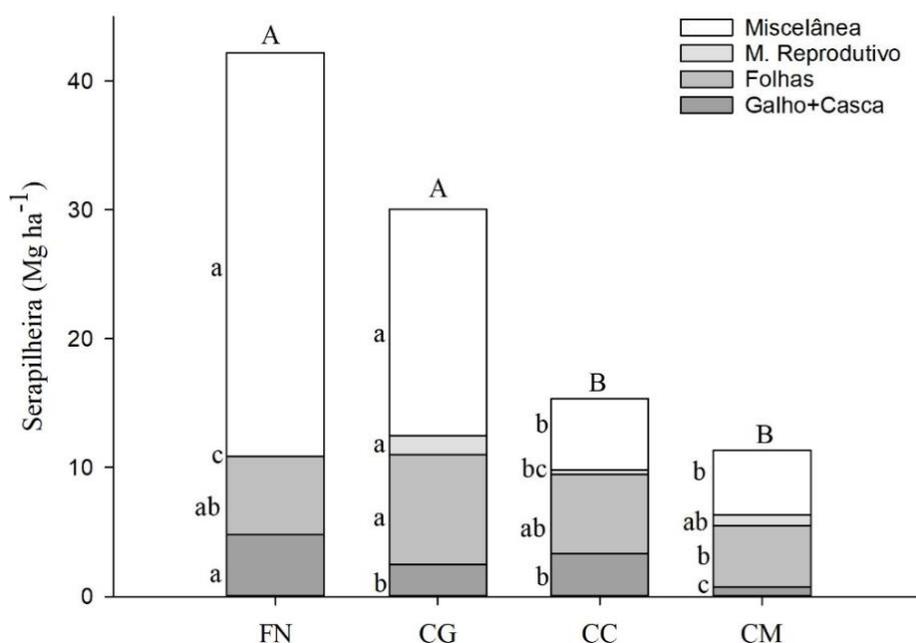


Figura 2. Estoque de serapilheira em sistemas de cultivo de café e floresta nativa em Barra do Choça, Bahia, Brasil. Em que: FN – floresta nativa; CG – sistema agroflorestal de café com *Grevillea robusta*; CC – sistema agroflorestal de café com *Toona ciliata* M. Roem; CM – monocultivo de café. Letras maiúsculas diferenciam a serapilheira acumulada total e letras minúsculas diferenciam as frações da serapilheira entre os sistemas pelo teste Fisher a 5% de significância.

A massa de raízes mostrou valor superior no CG em relação ao CC, mas ambos não se distinguiram da FN e do CM (figura 3). A massa média de raízes observada no CG foi de 146,44 g kg⁻¹, enquanto que no CC foi de 50,98 g kg⁻¹.

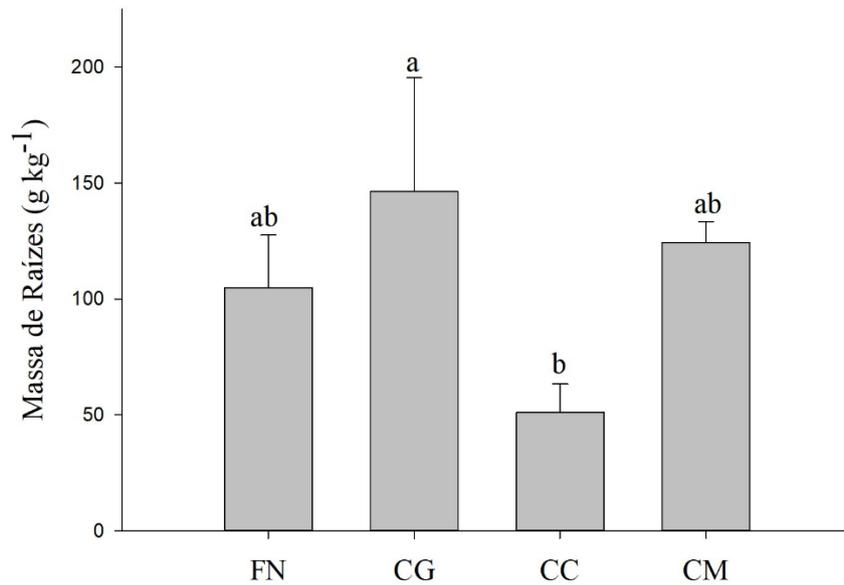


Figura 3. Massa de raízes do solo em sistemas de cultivo de café e floresta nativa em Barra do Choça, Bahia, Brasil. Em que: FN – floresta nativa; CG – sistema agroflorestal de café com *Grevillea robusta*; CC – sistema agroflorestal de café com *Toona ciliata* M. Roem; CM – monocultivo de café. Letras minúsculas diferenciam massa de raízes entre os sistemas pelo teste Fisher a 5% de significância.

4.2 Carbono e nitrogênio do solo

Os teores de carbono total do solo (CT) foram superiores no CG (6,4 g kg⁻¹) em relação aos demais sistemas de cultivo de café (média de 4,8 g kg⁻¹), sendo este o único sistema que não ocasionou redução em relação a floresta nativa (Figura 4). A taxa de perda de carbono do solo foi de 0,16 Mg ha⁻¹ ano⁻¹ no CC e 0,18 Mg ha⁻¹ ano⁻¹ no CM. Por outro lado, o nitrogênio total (NT) mostrou valor inferior apenas no CC em relação à FN. Apesar disso, a relação C/N apresentou valores inferiores em todos os sistemas de café quando comparados a FN.

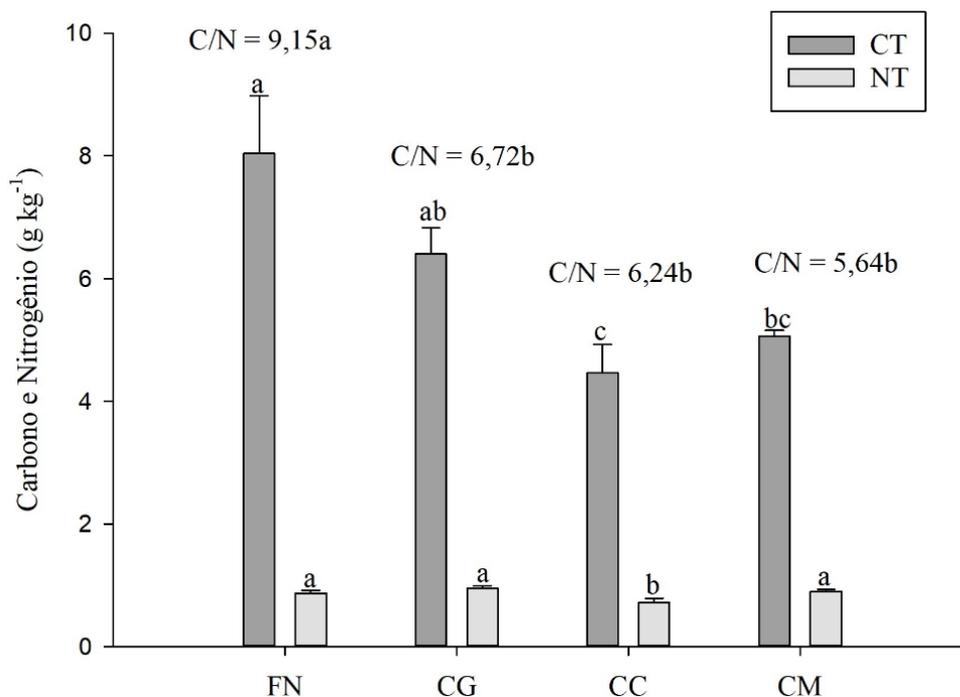


Figura 4. Carbono total (CT) e nitrogênio total (NT) do solo em sistemas de cultivo de café e floresta nativa em Barra do Choça, Bahia, Brasil. Em que: FN – floresta nativa; CG – sistema agroflorestal de café com *Grevillea robusta*; CC – sistema agroflorestal de café com *Toona ciliata* M. Roem; CM – monocultivo de café. Letras minúsculas diferenciam o CT e o NT entre os sistemas pelo teste Fisher a 5% de significância.

4.3 Fungos micorrízicos arbusculares

A densidade de esporos não variou entre os sistemas agroflorestais e a floresta nativa (média de 9,42 esporos g⁻¹ solo) (Figura 5). No entanto, CM se destacou quanto à quantidade de esporos (15,65 esporos g⁻¹ solo), apresentando valor superior tanto em relação a FN quanto em relação aos SAFs (Figura 5 A). Não houve diferença significativa para riqueza média entre os tratamentos (Figura 5 B).

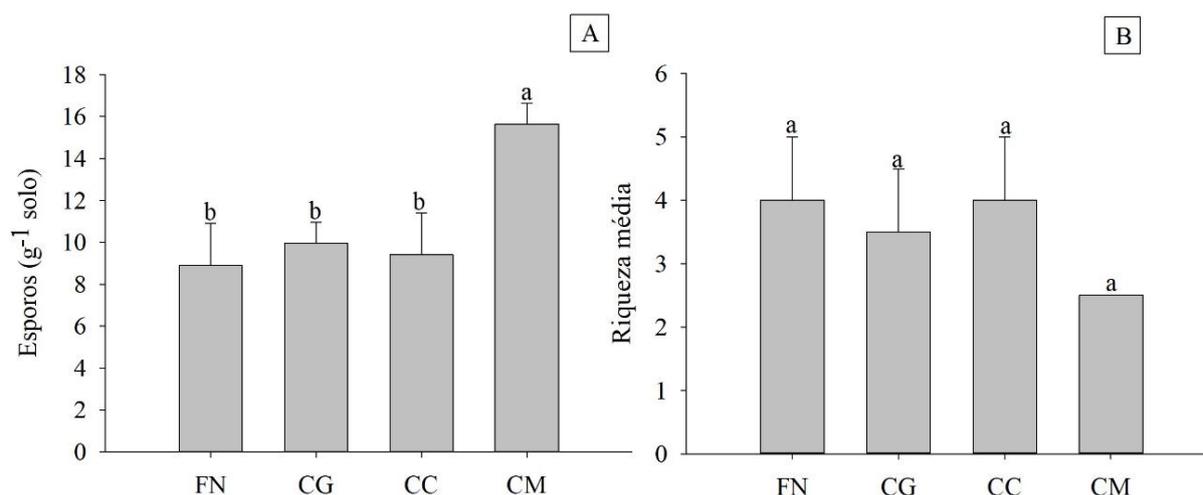


Figura 5. Número de esporos de fungos micorrízicos arbusculares (A) e riqueza média de espécies de fungos micorrízicos arbusculares (B) em sistemas de cultivo de café e floresta nativa em Barra do Choça, Bahia, Brasil. Em que: FN – floresta nativa; CG – sistema agroflorestal de café com *Grevillea robusta*; CC – sistema agroflorestal de café com *Toona ciliata* M. Roem; CM – monocultivo de café. Letras minúsculas diferenciam os esporos de FMAs e riqueza média entre os sistemas pelo teste Fisher a 5% de significância.

4.4. Raízes, carbono, nitrogênio e glomalina em agregados do solo

Houve efeito significativo da interação sistema × classes de agregados apenas para a proporção dos agregados (Tabela 3). Os sistemas causaram efeito isolado nas variáveis massa de raízes, CL, CT, NT e PSRG-FE, enquanto o efeito das classes de tamanho de agregados ocorreu apenas para massa de raízes e PSRG-T.

Tabela 3. Análise de variância da porcentagem de agregados, massa de raízes, carbono lábil, carbono total, nitrogênio total, proteína do solo relacionada a glomalina total e facilmente extraível em classes de agregados em sistemas de cultivo de café e floresta nativa.

Trat.	GL	Agregados	Raízes	CL	CT	NT	PSRG-T	PSRG-FE
		%	g kg ⁻¹		g kg ⁻¹		mg g ⁻¹	
Sistema	3	1,00	0,02*	0,01*	0,01*	0,01*	0,28	0,01*
Classe de tamanho	3	0,01*	0,01*	1,00	0,06	0,80	0,01*	0,72
SIS * CLA	9	0,01*	0,41	1,00	0,57	1,00	0,37	0,82
ERRO	48							
TOTAL	63							

Em que: sistemas (SIS); classes de tamanho de agregados (CLA); carbono lábil (CL); carbono total (CT); nitrogênio total (NT); proteína de solo relacionada a glomalina – total (PSRG-T); proteína de solo relacionada a glomalina – facilmente extraível (PSRG-FE). Teste Fisher a 5% de significância.

As classes de agregados <2mm, 4-2 mm e > 6mm foram predominantes na FN, CM e CC, respectivamente (Figura 6). As demais classes não mostraram grande variação entre os sistemas. A classe >6 mm foi a menos representativa no CM, assim como na FN. No CC, as classes 6-4, 4-2 e <2mm não variaram entre si e foram significativamente inferiores a classe > 6mm. CG foi o sistema com distribuição mais uniforme de todas classes de agregados, sem grande variação entre si.

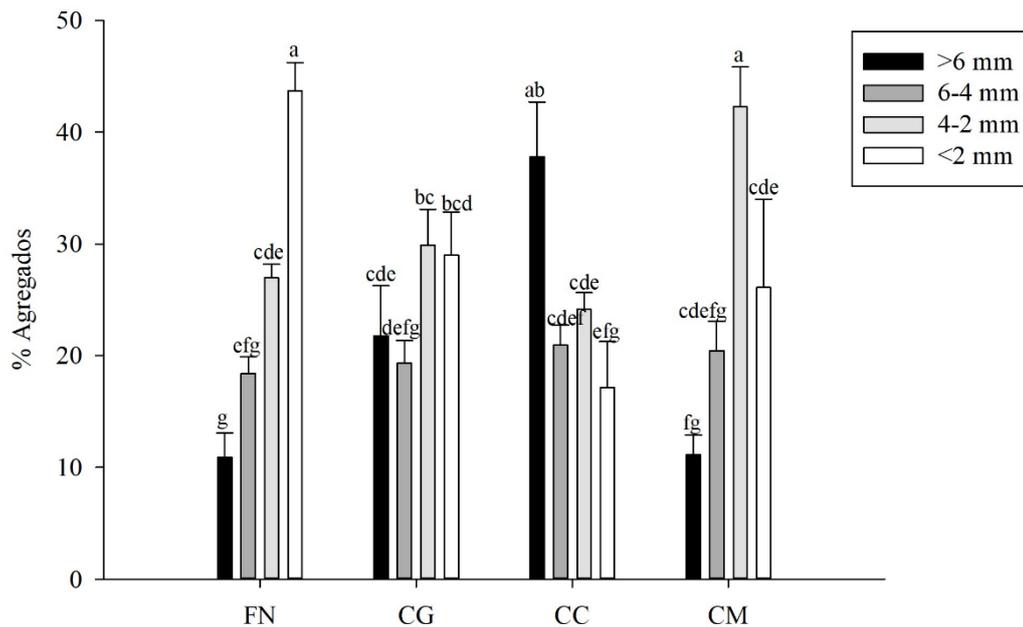


Figura 6. Efeito da interação na distribuição de macroagregados em sistemas de cultivo de café e floresta nativa em Barra do Choça, Bahia, Brasil. Em que: FN – floresta nativa; CG – sistema agroflorestal de café com *Grevillea robusta*; CC – sistema agroflorestal de café com *Toona ciliata* M. Roem; CM – monocultivo de café. Letras minúsculas diferenciam a porcentagem de agregados entre os sistemas e entre as classes de agregados pelo teste Fisher a 5% de significância.

A massa de raízes dos agregados foi superior nos sistemas CG e CM (média de $33,84 \text{ g kg}^{-1}$), que não se distinguiram da FN, e inferior no CC (Figura 7 A). Os agregados $> 6 \text{ mm}$ foram a classe com maior massa de raízes ($91,3 \text{ g kg}^{-1}$), observando-se valor intermediário na classe $<2 \text{ mm}$ ($9,87 \text{ g kg}^{-1}$) e inferior nas classes 6-4 e 4-2 mm (média de $2,75 \text{ g kg}^{-1}$) (Figura 7 B).

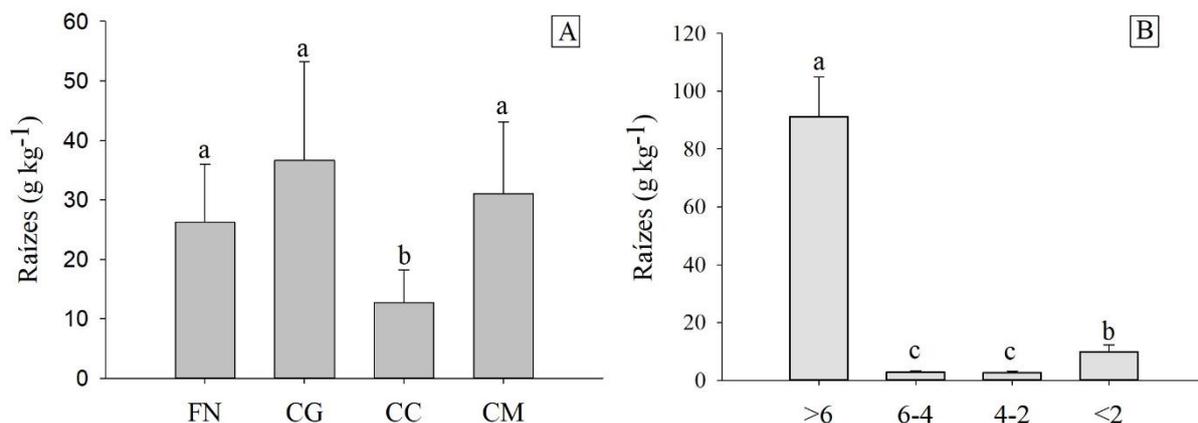


Figura 7. Massa de raízes de macroagregados do solo em sistemas de cultivo de café e floresta nativa em Barra do Choça, Bahia, Brasil: (A) comparação entre sistemas e (B) comparação entre classes de agregados. Em que: FN – floresta nativa; CG – sistema agroflorestal de café com *Grevillea robusta*; CC – sistema agroflorestal de café com *Toona ciliata* M. Roem; CM – monocultivo de café; >6 – agregados maiores que 6 mm; 6-4 – entre 6 e 4 mm; 4-2 – entre 4 e 2 mm; <2 – menores que 2 mm. Letras minúsculas diferenciam a massa de raízes entre os sistemas ou entre as classes de agregados pelo teste Fisher a 5% de significância.

Seguindo padrão semelhante ao CT do solo não fracionado, os teores médios de CT das classes de agregados mostraram que o CG foi superior aos demais sistemas de café. Apesar disso, apenas no sistema CC houve redução em relação a FN (41,79%), enquanto CM e CG não se diferenciaram da referência (média de 72,10 g kg⁻¹) (Figura 8). Esse mesmo padrão de variação foi observado para o CL médio dos agregados.

O teor de NT médio dos agregados também mostrou superioridade do CG (12,37 g kg⁻¹) tanto em relação a FN quanto aos demais sistemas de café (média de 9,78 g kg⁻¹). Todos os sistemas de café propiciaram redução da relação C/N dos agregados em relação a FN, observando-se menor valor no CC.

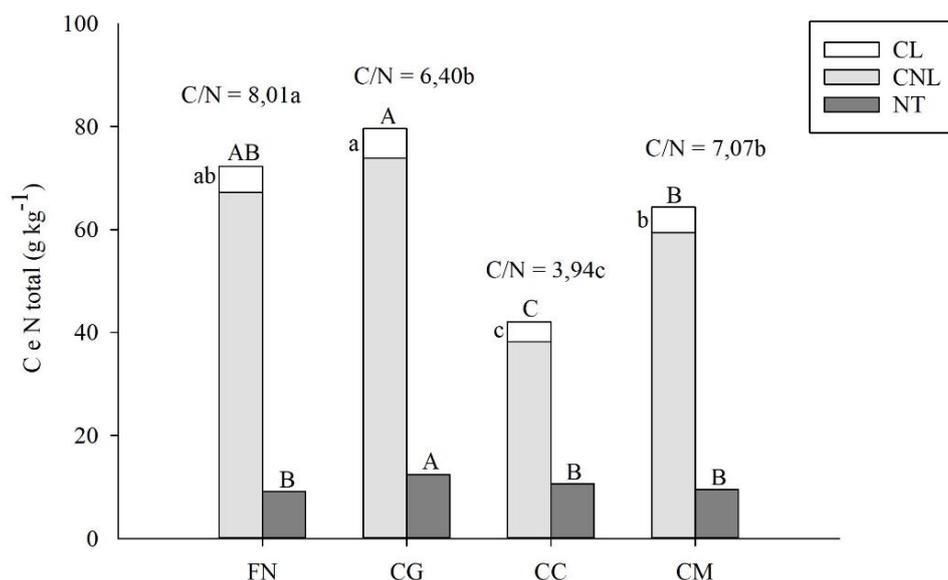


Figura 8. Carbono lábil (CL), carbono não lábil (CNL) e nitrogênio total (NT) de macroagregados do solo em sistemas de cultivo de café e floresta nativa em Barra do Choça, Bahia, Brasil. Em que: FN – floresta nativa; CG – sistema agroflorestal de café com *Grevillea robusta*; CC – sistema agroflorestal de café com *Toona ciliata* M. Roem; CM – monocultivo de café. Letras minúsculas na lateral das barras diferenciam o CL e a relação C/N e letras maiúsculas acima das barras diferenciam o carbono total (CL+CNL) e o NT dos agregados entre os sistemas pelo teste Fisher a 5% de significância.

Os teores de PSRG-FE mostraram variação entre os sistemas de café e a floresta nativa, com maior valor no CG (7,81 g mg⁻¹), valor intermediário na FN e menor no CC e CM (média de 4,77 g mg⁻¹) (Figura 9 A). Os teores de PSRG-T não variaram entre as classes de tamanho > 6, 6-4 e 4-2 mm, apresentando valor inferior na classe <2 mm, o que representou uma redução de 35,39% em relação as outras classes (Figura 9 B).

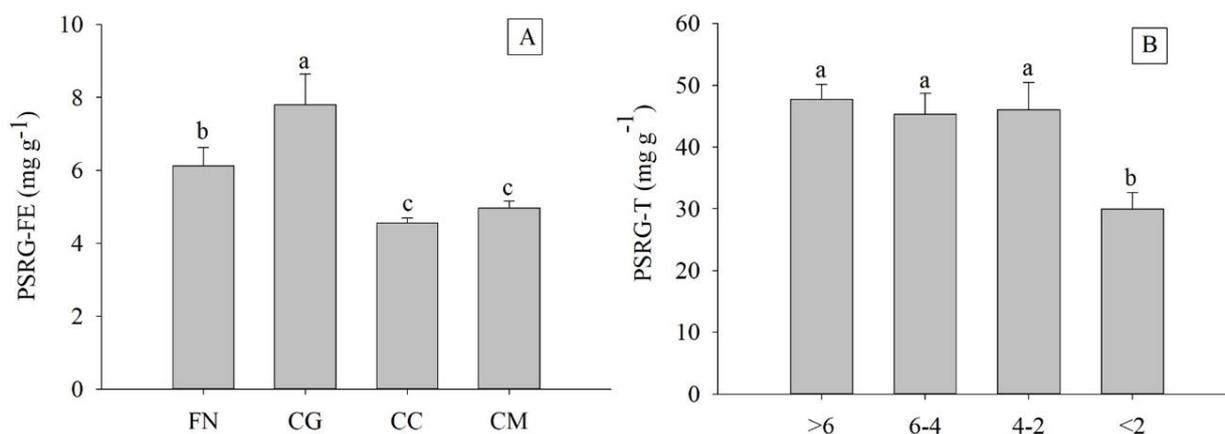


Figura 9. Proteína de solo relacionada a glomalina facilmente extraível (PSRG-FE) e total (PSRG-T) de macroagregados do solo em sistemas de cultivo de café e floresta nativa em Barra do Choça, Bahia, Brasil: (A) comparação da PSRG-FE entre sistemas e (B) comparação da PSRG-T entre classes de tamanho de agregados. Em que: >6 – macroagregados maiores que 6 mm; 6-4 – entre 6 e 4 mm; 4-2 – entre 4 e 2 mm; <2 – menores que 2 mm; FN – floresta nativa; CG – sistema agroflorestal de café com *Grevillea robusta*; CC – sistema agroflorestal de café com *Toona ciliata* M. Roem; CM – monocultivo de café. Letras minúsculas diferenciam os sistemas e as classes de agregados pelo teste Fisher a 5% de significância.

4.5 Análise de componentes principais

Os atributos do solo não fracionado mostraram correlações positivas significativas com os atributos dos agregados e serapilheira: CT do solo com serapilheira; PSRG-FE com CL e CT dos agregados; NT com raízes e CT, CL e raízes dos agregados; raízes com CT, CL e raízes dos agregados; FMA com proporção dos agregados 4-2 mm; e CT dos agregados com CL dos agregados. Também foram observadas correlações negativas dos agregados > 6 mm com CT do solo e serapilheira; e entre os agregados < 2mm e de 6-4 mm.

A avaliação conjunta das variáveis mais discriminantes de diferenças entre tratamentos por meio da análise de componentes principais (ACP) explicou 83,53% da dissimilaridade entre os sistemas estudados, por meio de dois componentes (Figura 10 B). O primeiro componente principal (CP1) explicou 57,51% da variabilidade total dos dados, e o segundo componente (CP2) foi responsável por 26,06%. CP1 apresentou maior

associação com a maioria das variáveis analisadas: raízes; CT do solo e dos agregados; NT do solo; agregados <2 mm; raízes, CT, CL e PSRG-FE dos agregados e agregados > 6 mm e 6-4 mm. CP2 teve como principais variáveis responsáveis por sua explicação a serapilheira, FMA, agregados 4-2 mm e NT dos agregados. A dispersão gráfica dada pela ACP demonstrou dissimilaridade entre tratamentos: CG e FN ficaram mais próximos entre si e posicionados à direita do gráfico, o primeiro no quadrante superior e o segundo no inferior; CM e CC ficaram isolados, com o CM no quadrante superior esquerdo e CC no quadrante inferior esquerdo.

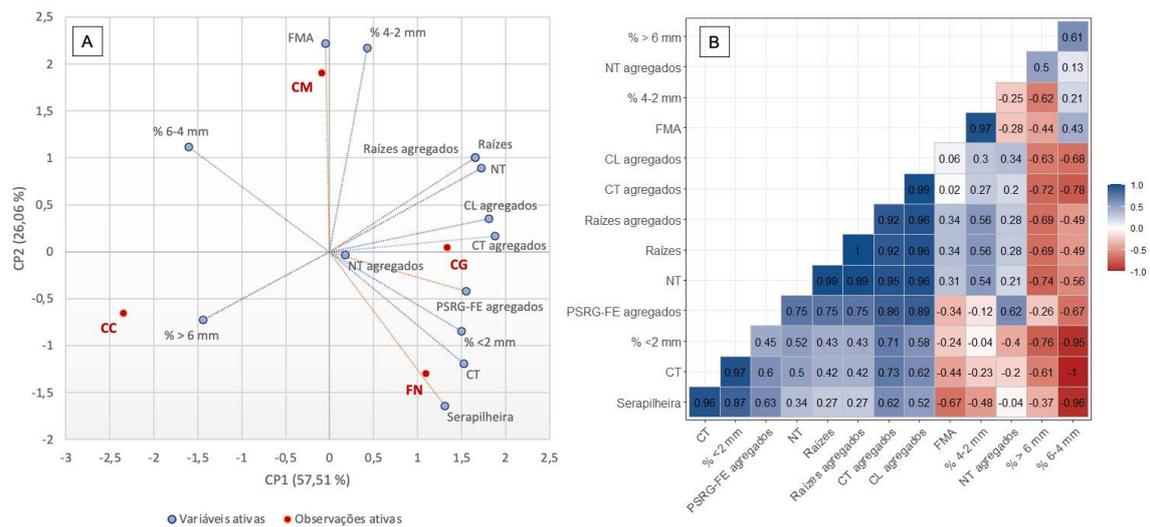


Figura 10. Diagrama de ordenação produzido com a análise de componentes principais (A) e matriz de correlação de Pearson (B) de atributos do solo, raízes e serapilheira em sistemas de cultivo de café e floresta nativa em Barra do Choça, Bahia, Brasil. Em que: FN – floresta nativa; CG – sistema agroflorestal de café com *Grevillea robusta*; CC – sistema agroflorestal de café com *Toona ciliata*; CM – monocultivo de café; Serapilheira – massa de serapilheira estocada sobre o solo; FMA - número de esporos de fungos micorrízicos arbusculares; Raízes e Raízes agregados - massa de raízes do solo e dos agregados; CT e CT agregados - carbono total do solo e médio dos agregados; NT e NT agregados – nitrogênio total do solo e médio dos agregados; CL agregados – C lábil médio dos agregados; PSRG-FE agregados – glomalina facilmente extraível média dos agregados; % > 6 mm, % 6-4 mm, % 4-2 mm e % <2 mm - proporção das classes de agregados >6, 6-4, 4-2 e <2 mm, respectivamente.

5 DISCUSSÃO

5.1 Serapilheira e raízes

A manutenção do estoque de serapilheira do CG semelhante à FN é justificada pela presença da espécie florestal *Grevillea robusta*, que promove grande adição de serapilheira ao solo por meio de um constante aporte de resíduos orgânicos (Chatterjee, et al., 2019; Nascimento, 2021). Por outro lado, o estoque reduzido de serapilheira no CC, assim como no CM, pode ser atribuído à baixa capacidade do cedro australiano acumular resíduos vegetais (Tandon e Sand, 2016) e ainda a menor idade do povoamento juntamente com o amplo espaçamento entre fileiras desse componente arbóreo no sistema CC (18 m), que minimizou o efeito do cedro no incremento de resíduos por unidade de área.

A presença da espécie *Grevillea robusta* também explica o incremento de resíduos abaixo do solo propiciado pela maior massa de raízes observada no CG em comparação ao CC. Estudos realizados em SAFs com a presença deste componente arbóreo constataram um grande potencial de produção de raízes finas e raízes proteóides nos primeiros 20 cm do solo (Odhiambo et al., 2001; Monroe et al., 2021). Adicionalmente, o maior acúmulo de serapilheira no sistema CG também pode ter estimulado a produção de raízes devido ao maior fluxo de nutrientes na camada superficial do solo (Pulrolnik et al., 2009).

5.2 Carbono e nitrogênio do solo

A manutenção dos teores de carbono total no CG e redução nos sistemas CC e CM em comparação com a FN pode ser atribuída a variações no incremento de resíduos orgânicos, conforme discutido anteriormente. Especificamente no sistema CG, o maior acúmulo de serapilheira e concentração de raízes na camada superficial do solo propiciou maior incorporação de matéria orgânica e isso explica a manutenção do armazenamento de carbono no solo. A adição e decomposição de resíduos vegetais da parte aérea e das raízes são responsáveis pelo incremento de carbono orgânico comumente relatado em solos sob SAFs (Chatterjee et al., 2018; Gama Rodrigues et al., 2010; Monroe et al., 2016).

Seguindo essa mesma linha de raciocínio, o menor teor de nitrogênio total no CC em relação a FN pode ter relação tanto com o menor estoque de serapilheira quanto com a qualidade química dos resíduos depositados pelo cedro. Embora não tenham sido verificadas diferenças na relação C/N dos sistemas de cultivo avaliados, estudos indicam

uma baixa qualidade da serapilheira depositada pelo cedro, devido a maior concentração de compostos fenólicos (Tandon e Sand, 2016). Adicionalmente, Bastos et al. (2023), estudando os mesmos sistemas de café do presente estudo, observaram uma associação positiva entre os teores de N do solo e da serapilheira e, além disso, verificaram que a serapilheira do CC apresentou menores teores de N quando comparada a floresta nativa.

A maior relação C/N observada na FN poderia ser atribuída ao fato de a serapilheira desse ambiente apresentar uma maior participação de galhos + cascas. A presença de material formador da serapilheira mais lignificado aumenta a relação C/N do solo (Wojciech et al., 2019).

5.3 Fungos micorrízicos arbusculares

A maior abundância de esporos no CM pode ser atribuída a menor cobertura do solo (tanto pela vegetação quanto pelo menor acúmulo de serapilheira), que ocasiona maior amplitude térmica e de umidade no solo sob este sistema. Isso torna as condições microclimáticas do solo mais estressantes e, como consequência, favorece a produção de estruturas de sobrevivência de FMAs (Silva et al., 2016). A esporulação de FMAs é um mecanismo de perpetuação da espécie que é estimulado quando a planta e o fungo são submetidos a algum estresse (Oehl et al., 2009; Velazquez et al., 2013; Silva et al., 2014). Adicionalmente, de acordo com Caproni (2001), ambientes com camadas superficiais do solo mais protegidas de perturbações são mais estáveis e, nessas condições, algumas espécies de FMAs conseguem sobreviver com baixa esporulação. Essa maior abundância de esporos no monocultivo é corroborado por vários estudos realizados em áreas cultivadas, que também observaram aumento da densidade de esporos em comparação a áreas sob vegetação nativa (Siqueira et al., 1989; Cordeiro et al., 2005; Miranda et al., 2005; Ferreira et al., 2012).

5.4 Raízes, carbono, nitrogênio e glomalina em agregados do solo

A predominância de agregados < 2 mm na FN pode ser justificada pelo maior acúmulo de MOS proveniente do material formador de serapilheira nesse ambiente; isso reflete a condição mais estável da floresta nativa com pouca ou nenhuma perturbação. Nessa fração, mais especificamente nos agregados > 0,250 mm, há maior concentração de agregados estáveis em água (aproximadamente 70%) (Gama-Rodrigues et al., 2010; Monroe et al., 2022) que se originam predominantemente por meio da ação de agentes ligantes temporários, como por exemplo a MOS. Agregados < 2 mm (estáveis em água)

são formados durante o processo de decomposição de resíduos vegetais recém aportados (Jastrow 1996; Six et al., 1998), que por sua vez são fonte de substâncias orgânicas essenciais para a atividade microbiana, que produzem agentes de ligação das partículas primárias do solo (Golchin et al., 1994; Jastrow, 1996; Six et al., 1999a).

Neste mesmo sentido, os baixos estoques de serapilheira podem justificar a predominância da classe de agregados 4-2 mm no CM, uma vez que isso diminui a cobertura do solo e torna a camada superficial mais suscetível à perda de umidade por evaporação. É provável que essa menor cobertura juntamente com a irrigação constante da área esteja favorecendo a ocorrência de ciclos de umedecimento e secagem, que, embora causem um efeito agregante no solo, faz aumentar a quantidade de agregados de baixa estabilidade (Six et al., 2004). Esse mecanismo também pode explicar o predomínio da classe de agregados > 6 mm e, ao mesmo tempo, a distribuição uniforme das demais classes de agregados no CC. Agregados formados predominantemente por ciclos de umedecimento e secagem (> 6 mm) são mais instáveis e, por essa razão, podem apresentar maior *turnover* dos agregados. Ou seja, perturbações eventuais – como colheita, tratamentos culturais e irrigação – tendem a levar a ruptura destes agregados maiores, mantendo semelhantes as quantidades de agregados menores que 6 mm (Six et al., 2000).

Por outro lado, o *turnover* de agregados não foi o que determinou a distribuição mais uniforme das classes de agregados no CG (Figura 6), que pode ser justificada pelo grande acúmulo de serapilheira, semelhante a FN. Esse maior estoque de material orgânico, além de manter a cobertura do solo, diminuindo a intensidade dos ciclos de umedecimento e secagem, favorece a formação de macroagregados estáveis em água (Jastrow, 1996; Six et al., 1998).

Sabe-se que as raízes possuem uma importante ação mecânica no solo, unindo as partículas do solo em agregados (Tisdall e Oades, 1982). No entanto, os resultados do presente estudo não mostraram claramente esse efeito na formação de agregados maiores (Figura 7 B), uma vez que CC foi o sistema com menor quantidade de raízes (Figura 7 A) e, ao mesmo tempo, com maior quantidade de agregados > 6 mm (Figura 6). Isso demonstra que as raízes estão ali associadas para absorção de nutrientes diretamente da ciclagem proveniente da serapilheira (Thakur et al., 2015) e não exercem grande influência na formação de macroagregados desse sistema.

A predominância de agregados formados por via fisiogênica (por ciclos de umedecimento e secagem) juntamente com os menores estoques de resíduos orgânicos no CC pode explicar os seus menores teores de CT e CL dos agregados (Figura 8), uma

vez que o carbono orgânico presente em agregados maiores é derivado principalmente de entradas de resíduos relativamente frescos de detritos e exsudados radiculares (Poirier et al., 2018, Six et al., 2000). Por outro lado, o fato de o CM não ter seguido este mesmo padrão de redução, mantendo valores de CT e CL dos agregados semelhantes a FN, deve ter relação com a maior massa de raízes deste sistema em relação ao CC (Figura 7 A).

Em consonância com a discussão acima, a maior entrada de resíduos orgânicos no CG, acima (Figura 2) e abaixo do solo (Figura 7 A), favoreceram o incremento de CT e CL nos agregados nesse sistema. Em sistemas de uso da terra onde há perturbações mínimas do solo, a quantidade e a qualidade da entrada de C proveniente da biomassa iniciam um fluxo contínuo de C, que levam a um maior armazenamento do carbono orgânico dentro dos agregados (Li et al., 2016; Six et al., 2004; Six et al., 2002; Tivet et al., 2013).

O maior teor de N dos agregados do solo sob o CG pode estar relacionado com o fato da *Grevillea robusta* ser uma espécie fixadora de N e, portanto, apresentar potencial de elevar os teores de N do solo pela deposição de serapilheira rica em nitrogênio (Zhao et al., 2014). Esse resultado é corroborado pelos estudos de Liu et al. (2022), os quais observaram que microrganismos fixadores de N preferiram habitar macroagregados, e de Feng et al. (2018), os quais verificaram que a presença de espécies arbóreas fixadoras de N aumentou o conteúdo de N nos macroagregados.

A menor relação C/N nos agregados do sistema CC (Figura 8) pode ser justificada pela baixa massa de raízes observada neste sistema, que estaria levando a um menor incremento de C nos agregados e, como consequência, diminuindo a relação C/N. Além de melhorar a estabilidade dos agregados, o sistema radicular exerce efeitos benéficos para ativação dos microrganismos por meio da produção de exsudados radiculares (Jia et al., 2021), que contribuem conjuntamente para o acúmulo de carbono orgânico associado aos agregados (Egan et al., 2018).

Os níveis mais elevados de PSRG-FE dos agregados no CG (figura 9 B), superando até mesmo a FN, podem estar relacionados ao alto teor de N nos agregados desse sistema, discutido anteriormente. Em concordância com essa explicação, Sun et al. (2018) observaram aumento da PSRG-FE nos macroagregados com a adição de N ao solo, refletindo em aumento no solo. A grande quantidade de serapilheira depositada sobre o solo do CG também pode ter favorecido o acúmulo de PSRG-FE no CG, já que melhora o microambiente, podendo estimular a decomposição das hifas e o acúmulo de glomalina.

Os menores teores de PSRG-T na classe < 2 mm (figura 9 A) são indicativos de que a glomalina exerce menor influência na formação de agregados de menor tamanho. Estudo realizado por Yang et al. (2024) indicou que a formação de grandes agregados (> 2 mm) foi favorecida pelo acúmulo de PSRG. Isso pode ser resultante do enrolamento das hifas e do efeito ligante da PSRG, que promove sinergicamente a transformação de pequenos agregados em grandes agregados (Bedini et al., 2009; Kohler et al., 2017; Ji et al., 2019).

5.5 Análise de componentes principais

A forte correlação das variáveis serapilheira e raízes com o carbono e nitrogênio total do solo não fracionado assim como das raízes dos agregados com CT, NT e CL dos agregados (Figura 10B) demonstram o importante papel das entradas de resíduos vegetais acima e abaixo do solo na incorporação de carbono e nitrogênio no solo. Adicionalmente, o posicionamento de todas essas variáveis juntamente com os sistemas CG e FN e as variáveis agregados < 2 mm e PSRG-FE na ACP (Figura 10A) indicam que as entradas de resíduos vegetais regulam a formação de agregados < 2 mm e os teores de C, N e glomalina no solo. Também indicam que esses mecanismos seriam responsáveis pela maior similaridade entre esses dois sistemas. Estudo realizado por Bastos et al. (2023) nas mesmas áreas experimentais deste estudo, considerando indicadores microbiológicos e químicos do solo, também indicou grande similaridade entre o SAF de café com grevílea e a floresta nativa. Isso demonstra que o CG pode desempenhar um papel importante na agregação e armazenamento de carbono no solo e também na manutenção e/ou melhoria da qualidade do solo.

Por sua vez, a dissimilaridade do CC e sua associação apenas com os agregados > 6 mm e 6-4 mm (Figura 10A) sugerem que as condições ambientais desse sistema (maior exposição do solo e manejo de irrigação) estariam condicionando a formação desses agregados, provavelmente por favorecer a ocorrência de mecanismos de umedecimento e secagem. Já a dissimilaridade do CM, agrupado apenas às variáveis FMA e agregados 4-2 mm, denota a interferência desse sistema na esporulação dos fungos micorrízicos e na formação de agregados por via fisiogênica, como discutido anteriormente.

6 CONCLUSÕES

Os resultados do presente estudo suportam a hipótese de que o sistema agroflorestal de café com *Grevillea robusta* proporciona maior incremento de carbono e glomalina facilmente extraível no solo e, conseqüentemente, dentro dos macroagregados, uma vez que proporciona maiores entradas de resíduos orgânicos acima e abaixo do solo. A segunda hipótese também foi contemplada, o SAF de café com *Toona ciliata* assim como o monocultivo de café proporcionam redução dos teores de carbono e glomalina no solo e nos macroagregados, devido a maior exposição do solo e baixo estoque de resíduos orgânicos, que se refletiu em maior influência de ciclos de umedecimento e secagem. O sistema agroflorestal de café com *Grevillea robusta* mostra maior potencial para uma produção cafeeira mais sustentável, uma vez que favorece os estoques de carbono orgânico no solo. Contudo não se deve subestimar o potencial dos sistemas de café sombreados com *Toona Ciliata* em incrementar os níveis de matéria orgânica do solo, especialmente em idades de plantio mais avançadas, quando os acréscimos de resíduos orgânicos (via serapilheira e *turnover* de raízes) tendem a ser mais expressivos.

7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Abou rajab, Y; Leuschner, C; Barus, H; Tjoa, A; Hertel, D. Cacao cultivation under diverse shade tree cover allows high carbon storage and sequestration without yield losses. **Plos One** 11:e0149949, 2016. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0149949>

Addinsoft, 2019. XLSTAT statistical and data analysis solution. Boston, USA. <https://www.xlstat.com>. Version 19.2.2.

Albrecht, A; Rangon, L; Barret, P. Effets de la matière organique sur la stabilité structurale et la détachabilité d'un vertisol et d'un ferrisol (Martinique). **Chaiers Orstom, Séroé Pédol**, v.27, n. 1, p. 121–133, 1992.

Alvares, C.A; Stape, J.L; Sentelhas, P.C; Gonçalves, J.L.M; Sparovek, G. Köppen's climate classification map for Brazil. **Meteorologische Zeitschrift**, v. 22, n. 6, p. 711–728, 2013. <https://doi.org/10.1127/0941-2948/2013/0507>

Apolinario, V.X.O; Dubeux, J.C.B; Lira, M.A; Ferreira, R.L.C; Mello, A.C.L; Coelho, D.L; Muir, J.P Sampaio, E.V.S.B. Decomposition of arboreal legume fractions in a silvopastoral system. **Crop Science**, v. 56, n. 3, p. 1356 – 1363, 2016. <https://doi.org/10.2135/cropsci2015.09.0588>

Argenton J.; Albuquerque, J.A.; Bayer, C; Wildner, L.P. Comportamento de atributos relacionados com a forma da estrutura de Latossolo Vermelho sob sistemas de preparo e plantas de cobertura. **Revista Brasileira de Ciências do Solo**, v. 29, p. 425-435, 2005.

Aryal, D.R; Ruiz, D.E.M; Marroquín, C.N.T; Ruiz, R.P; Hernández, F.G; Venegas, J.A.V; Mendoza, A.P; López, G.V; Lugo, F.C; Larramendi, L.A.R; Coss, A.L; López, A.H; Jonapá, F.J.M; Sanabria, C.A.V; Aguilar, A.A; Chi, I.E. Soil organic carbon depletion from forests to grasslands conversion in Mexico: a review. **Agriculture**, v. 8, n. 11, p. 181, 2018. <https://doi.org/10.3390/agriculture8110181>

Avelino, J; Allinne, C; Cerda, R; Willocquet, L; Savary, S. Multiple-disease system in coffee: from crop loss assessment to sustainable management. **Annual Review of Phytopathology**, v. 56, n. 1, p. 611–635, 2018. <https://doi.org/10.1146/annurev-phyto-080417-050117>

Babbar, L.I.; Zak, D.R. Nitrogen loss from coffee agroecosystems in Costa Rica: leaching and denitrification in the presence and absence of shade trees. **Journal of Environmental Quality**, v. 24, p. 227-233, 1995.

Barradas, V.L.; Fanjul, L. Microclimatic characterization of shaded and open-grown coffee (*Coffea arabica* L.) plantations in Mexico. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 38, p.101-112, 1986.

Barreto-Garcia, P.A.B; Batista, S.G.M; Gama-Rodrigues, E.F; Paula, A; Batista, W.C.A. Short-term effects of forest management on soil microbial biomass and activity in caatinga dry forest, Brazil. **Forest Ecology and Management**, v. 481, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2020.118790>

Bastos, T.R.S; Barreto-Garcia, P.A.B; Mendes, I.C; Monroe, P.H.M; Carvalho, F.F. Response of soil microbial biomass and enzyme activity in Coffee-based agroforestry systems in a high-altitude tropical climate region of Brazil. **Catena**, v. 230, 107270, 2023.

Bayer, C.; Mielniczuk, J. Dinâmica E Função Da Matéria Orgânica. In: Santos, G. A.; Silva, L.S.; Canellas, L.P.; Camargo, F.A.O. **Fundamentos da matéria orgânica do solo: ecossistemas tropicais e subtropicais**. Porto Alegre, 2 ed., 2008, p. 7-18.

Bedini, S.; Pellegrino, E.; Avio, L.; Pellegrini, S.; Bazzoffi, P.; Argese, E.; Giovannetti, M. Changes in soil aggregation and glomalin-related soil protein content as affected by the arbuscular mycorrhizal fungal species *Glomus mosseae* and *Glomus intraradices*. **Soil Biology and Biochemistry**, v. 41, n. 7, p. 1491–1496, 2009.

Beer, J.; Muschler, R.; Kass, D.; Somarriba, E. Shade management in coffee and cacao plantations. **Agroforestry System**, v. 38, p. 139–164, 1998.
<https://doi.org/10.1023/A:1005956528316>

Blair, G.J.; Lefroy, R.D.B.; Lisle, L. Soil carbon fractions based on their degree of oxidation, and development of a carbon management index for agricultural systems. **Australian Journal of Agricultural Research**, v. 46, p. 1459–1466, 1995.
<https://doi.org/10.1071/ar9951459>

Bradford, M.M. A rapid and sensitive method for the quantitation of microgram quantities of protein utilizing the principle of protein-dye binding. **Analytical Biochemistry**, v. 72, n. 1-2, p. 248-254, 1976.

Brady, N.C.; Weil, R.R. **The nature and properties of soils**. 3^a ed. New York, Bookman, 2013. 922p.

Bronick, C.J.; Lal, R. Soil structure and management: a review. **Geoderma**, v. 124, p. 3-32, 2005.

Campanha, M.M.; Santos, R.H.S.; Freitas, G.B.; Martinez, H.E.P.; Jaramillo-Botero, C.; Garcia, S.L. Análise comparativa das características da serrapilheira e do solo em cafezais (*Coffea arabica*) cultivados em sistema agroflorestal e em monocultura, na zona da mata MG. **Revista Árvore**, v. 31, n. 5, p. 805-812, 2007.

Capriel, P.; Beck, T.; Borchert, H.; Härter, P. Relationship between soil aliphatic fraction extracted with supercritical hexane, soil microbial biomass, and soil aggregate stability. **Soil Science Society of America Journal**, v. 54, p. 415–420, 1990.
<https://doi.org/10.2136/sssaj1990.03615995005400020020x>

Caproni, A.L. **Fungos micorrízicos arbusculares em áreas reflorestadas remanescentes da mineração de bauxita em Porto Trombetas/PA**. 2001. 186p. Tese (Doutorado em Fitotecnia) - Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, Seropédica, RJ.

Castro Filho, C.; Lourenço, A.; Guimarães, M.F.; Fonseca, I.C.B. Aggregate stability under different soil management systems in a red latosol in the state of Parana, Brazil. **Soil Tillage Research**, v. 65, n. 1, p. 45–51, 2002.

Cecafe, 2022. Exportações Brasileiras de Café. Disponível em: <<https://www.cecafe.com.br/dados-estatisticos/exportacoes-brasileiras/>>. Acesso em: 29 de julho de 2022.

Charbonnier, F.; Roupsard, O.; Le Maire, G.; Guillemot, J.; Casanoves, F.; Lacoite, A.; Vaast, P.; Allinne, C.; Audebert, L.; Cambou, A.; Clement-Vidal, A.; Defrenet, E.; Duursma, R.A.; Jarri, L.; Jourdan, C.; Khac, E.; Leandro, P.; Medlyn, B.E.; Saintandre, L.; Thaler, P.; Van Den Meersche, K.; Aguilar, A.B.; Lehner, P.; Dreyer, E. Increased light-use efficiency sustains net primary productivity of shaded coffee plants in agroforestry system. **Plant, Cell and Environment**, v. 40, p. 1592–1608, 2017.

Chatterjee, N.; Nair, P.K.R.; Nair, V.D.; Viswanath, S.; Bhattacharjee, A. Depth-wise distribution of soil-carbon stock in aggregate sized fractions under shaded-perennial agroforestry systems in the Western Ghats of Karnataka, India. **Agroforest System**, v. 94, p. 341–358. <https://doi.org/10.1007/s10457-019-00399-z>

Chatterjee, N.; Nair, P.K.R.; Chakraborty, S.; Nair, V.D. Agriculture, ecosystems and environment changes in soil carbon stocks across the forest-agroforest-agriculture/pasture continuum in various agroecological regions: a meta-analysis. **Agriculture Ecosystems Environment**, v. 266, p. 55-67, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2018.07.014>

Christensen, B.T. Physical fractionation of soil and structural and functional complexity in organic matter turnover. **European Journal of Soil Science**, v. 52, n. 3, p. 345- 353, 2002. <https://doi.org/10.1046/j.1365-2389.2001.00417.x>

Christensen, B.T. Physical fractionation of soil and organic matter in primary particle size and density separates. In: LAL, R., ROSE, C.W., SCHWERTMANN, U., STEWART, B.A., TINKER, P.B., WAGENET, R.J., YARON, B. **Advances in Soil Science**. New York, Springer-Verlag. 1–76 p.

Comis, D. Glomalin: a hiding place for a third of the world's stored soil carbon. **Agricultural Research**, p. 1-4, 2002.

COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO – CONAB. Acompanhamento da Safra Brasileira de Café, Brasília, DF, v. 8, safra 2021, n. 1, primeiro levantamento, jan. 2021.

Cordeiro, M.A.S.; Carneiro, M.A.C.; Paulino, H.B.; Saggin-Júnior, O.J. Colonização e densidade de esporos de fungos micorrízicos em dois solos do Cerrado sob diferentes sistemas de manejo. **Pesquisa Agropecuária Tropical**, v. 35, p. 147-153, 2005.

Costa, F.S.; Gomes, J.; Bayer, C. & Mielniczuk, J. Métodos para avaliação das emissões de gases de efeito estufa no sistema solo-atmosfera. **Ciência Rural**, v. 36, p. 693-700, 2006. <https://doi.org/10.1590/S0103-84782006000200056>

- Costa, P.A.; Mota, J.C.A.; Romero, R.E.; Freire, A.G.; Ferreira, T.O. Changes in soil pore network in response to twenty-three years of irrigation in a tropical semiarid pasture from northeast Brazil. **Soil & Tillage Research**, v. 2, p. 23-32, 2014. <https://doi.org/10.1016/j.still.2013.11.004>
- Cotrufo, M.F.; Lavelle, J.M.; Zhang, Y.; Hansen, P.M.; Paustian, K.H.; Schipanski, M.; Wallenstein, M.D. In-N-Out: A hierarchical framework to understand and predict soil carbon storage and nitrogen recycling. *Global Change Biology*, v. 27, n. 19, p. 4465–4468, 2021. <https://doi.org/10.1111/gcb.15782>
- Damatta, F.M. Ecophysiological constraints on the production of shaded and unshaded coffee: a review. **Field Crops Research**, v. 86, p. 99–114, 2004. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2003.09.001>
- Dori, T.; Asefaw, Z.; Kippie, T. Soil characteristics under dominant Agroforestry systems along toposequence of Gedeo, Southeastern Ethiopia. **Environmental and Sustainability Indicators**, v. 15, n.100191, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.indic.2022.100191>
- Egan, G.; Crawley, M.J.; Fornara, D.A. Effects of long-term grassland management on the carbon and nitrogen pools of different soil aggregate fractions. **Science of The Total Environment**, v. 613–614, p. 810–819, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.09.165>
- Feller, C.; Albrecht, A.; Tessier, D. Aggregation and organic matter storage in kaolinitic and smectitic tropical soils. In: CARTER, M.R.; STEWART, B.A. (Ed). **Structure and organic matter storage in agricultural soils**. Boca Raton, CRC Press, 1996, p.309-359.
- Feng, J.; Wu, J.; Zhang, Q.; Zhang, D.; Li, Q.; Long, C.; Yang, F.; Chen, Q.; Cheng, X. Stimulation of nitrogen-hydrolyzing enzymes in soil aggregates mitigates nitrogen constraint for carbon sequestration following afforestation in subtropical China. **Soil Biology and Biochemistry**, v. 123, p. 136–144, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2018.05.013>
- Ferreira, D.A.; Carneiro, M.A.C.; Saggin-Júnior, O.J. Fungos micorrízicos arbusculares em um latossolo vermelho sob manejos e usos no cerrado. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 36, p. 51-61, 2012. <https://doi.org/10.1590/S0100-06832012000100006>
- Ferreira, E.P.B.; Stone, L.F.; Martin-Didonet, C.C.G. População e atividade microbiana do solo em sistema agroecológico de produção. **Revista Ciência Agrônômica**, v. 48, n. 1, p. 22-31, 2017. <https://doi.org/10.5935/1806-6690.20170003>
- Gama-Rodrigues, E.F.; Nair, P.K.R.; Nair, V.D.; Gama-Rodrigues, A.C.; Baligar, V.C.; Machado, R.C.R. Carbon storage in soil size fractions under two cacao agroforestry systems in Bahia, Brazil. **Environmental Management**, v. 45, p. 274–283, 2010. <https://doi.org/10.1007/s00267-009-9420-7>

Gao, W.; Zhou, T.; Ren, T. Conversion from conventional to no tillage alters thermal stability of organic matter in soil aggregates. **Soil Science Society of America Journal**, v. 79, n. 2, p. 585–594, 2015. <https://doi.org/10.2136/sssaj2014.08.0334>

Gerdemann, J.W.; Nicolson, T.H. Spores of mycorrhizal *Endogone* species extracted from soil by wet sieving and decanting. **Transactions of the British Mycological Society**, v. 46, n. 2, p. 235-244, 1963. [https://doi.org/10.1016/S0007-1536\(63\)80079-0](https://doi.org/10.1016/S0007-1536(63)80079-0)

Gillespie, A.W.; Farrell, R.E.; Walley, F.L.; Ross, A.R.S.; Leinweber, P.; Khardt, K.; Regier, T.Z.; Blyth, R.I.R. Glomalin-related soil protein contains non mycorrhizal related heat-stable proteins, lipids and humic materials. **Soil Biology and Biochemistry**, v. 43, n. 4, p. 766-777, 2011. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2010.12.010>

Golchin, A; Oades, J.M; Skjemstad, J.O; Clarke, P. Study of free and occluded particulate organic matter in soils by solid state ¹³C CP/MAS NMR spectroscopy and scanning electron microscopy. **Australian Journal of Soil Research**, v. 32, p. 285-309, 1994. <https://doi.org/10.1071/SR9940285>

Guan, S.; Liu, S.; Liu, R.; Zhang, J.; Ren, J.; Cai, H.; Lin, X. Soil organic carbon associated with aggregate-size and density fractions in a Mollisol amended with charred and uncharred maize straw. **Journal of Integrative Agriculture**, v. 18, n. 17, p. 1496–1507, 2019. [https://doi.org/10.1016/S2095-3119\(19\)62643-2](https://doi.org/10.1016/S2095-3119(19)62643-2)

Hairiah, K.; Sulistyani, H.; Suprayogo, D.; Widiyanto, P.; Purnomosidhi, P.; Widodo, R.H.; Noordwijk, M.V. Litter layer residence time in forest and coffee agroforestry systems in Sumberjaya, West Lampung. **Forest Ecology and Management**, v. 224, n. 1-2, p. 45–57, 2006. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2005.12.007>

Helgason, T., Daniell, T.J., Husband, R., Fitter, A.H., Young, J.P.W. Ploughing up the wood-wide web? **Nature**, v. 394, p. 431, 1998.

Hertel, D.; Harteveld, M. A.; Leuschner, C. Conversion of a tropical forest into agroforest alters the fine root-related carbon flux to the soil. **Soil Biology and Biochemistry**, v. 41, n. 3, p. 481-490, 2009. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2008.11.020>

INVAM. 2022. Coleção internacional de culturas de fungos micorrízicos arbusculares (vesiculares). Disponível em: <http://www.invam.caf.wvu.edu/> Acesso em: dezembro, 2022. » <http://www.invam.caf.wvu.edu/> Acesso em: dezembro, 2022.

Jastrow, J.D. Soil aggregate formation and the accrual of particulate and mineral-associated organic matter. **Soil Biology and Biochemistry**, v. 28, n. 4-5, p. 665–676, 1996. [https://doi.org/10.1016/0038-0717\(95\)00159-x](https://doi.org/10.1016/0038-0717(95)00159-x)

Jenkins, W.R. A Rapid Centrifugal-Flotation Technique for Separating Nematodes from Soil. **Plant Disease Report**, v. 28, p. 692, 1964.

Jha, S.; Bacon, C.M.; Philpott, S.M.; Méndez, V.E.; Läderach, P.; Rice, R.A. Shade coffee: update on a disappearing refuge for biodiversity. **BioScience**, v. 64, n. 5, p. 416–428, 2014. <https://doi.org/10.1093/biosci/biu038>

Ji, L.; Tan, W.; Chen, X. Arbuscular mycorrhizal mycelial networks and glomalin related soil protein increase soil aggregation in Calcaric Regosol under well-watered and drought stress conditions. **Soil and Tillage Research**, v. 185, p. 1–8, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.still.2018.08.010>

Jia, X.; Zhao, Y.H.; Liu, T.; Huang, S.P.; Chang, Y.F. Elevated CO₂ increases glomalin-related soil protein (GRSP) in the rhizosphere of *Robinia pseudoacacia* L. seedlings in Pb- and Cd- contaminated soils. **Environmental Pollution**, v. 218, p. 349–357, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2016.07.010>.

Jia, Y.; Zhai, G.; Zhu, S.; Liu, X.; Schmid, B.; Wang, Z.; Ma, K.; Feng, X. Plant and microbial pathways driving plant diversity effects on soil carbon accumulation in subtropical forest. **Soil Biology and Biochemistry**, v. 161, n. 108375, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2021.108375>.

Johnson, N.C.; Pfleger, F.L. Vesicular-arbuscular mycorrhizae and cultural stresses. In: Bethlenfalvay, G.J.; Linderman, R.G. (Eds.), **Mycorrhizae in Sustainable Agriculture**. Madison, ASA, 1992, p. 71–99.

Kemper, W.D.; Rosenau, R.C. Aggregate stability and size distribution. In: Klute, A. (Ed.) **Methods of Soil Analysis**. Madison, SSSAA, 1986, p. 425–442.

Kibblewhite, M.G.; Ritz, K.; Swift, M.J. Soil health in agricultural systems. **Philosophical Transactions of the Royal Society B**, v. 363, p. 685–701, 2008. DOI: 10.1098/rstb.2007.2178.

Kinany, S.E.; Achbani, E.; Faggroud, M.; Ouahmane, L.; Hilali, R.E.; Haggoud, A.; Bouamri, R. Effect of organic fertilizer and commercial arbuscular mycorrhizal fungi on the growth of micropropagated date palm cv. Feggouss. **Journal of the Saudi Society of Agricultural Sciences**, v. 18, n. 4, p. 411–417, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.jssas.2018.01.004>

Kohler, J.; Roldán, A.; Campoy, M., Caravaca, F. Unraveling the role of hyphal networks from arbuscular mycorrhizal fungi in aggregate stabilization of semiarid soils with different textures and carbonate contents. **Plant Soil**, v. 410, p. 273–281, 2016. DOI: 10.1007/s11104-016-3001-3

Lal, R. Soil carbon sequestration to mitigate climate change. **Geoderma**, v. 123, n. 1-2, p. 1–22, 2004. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2004.01.032>.

Le Bissonnais, Y. Aggregate stability and assessment of soil crustability and erodibility: I. Theory and methodology. **European Journal of Soil Science**, v. 47, n. 4, p. 425–437, 1996. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2389.1996.tb01843.x>.

- Lehmann, A.; Zheng, W.; Rillig, M.C. Soil biota contributions to soil aggregation. **Nature Ecology & Evolution**, v. 1, p. 1828-1835, 2017. DOI: 10.1038/s41559-017-0344-y
- Lehmann, E.F.; Leifheit, A.; Rillig, M.C. Mycorrhizas and soil aggregation. In: Johnson, N.C.; Gehring, C.; Jansa, J. **Mycorrhizal Mediation of Soil: Fertility, Structure and Carbon Storage**. New York, Elsevier, 2017, p. 241-262.
- Li, S.; Gu, X.; Zhuang, J.; An, T.; Pei, J.; Xie, H.; Li, H.; Fu, S.; Wang, J. Distribution and storage of crop residue carbon in aggregates and its contribution to organic carbon of soil with low fertility. **Soil and Tillage Research**, v. 155, p. 199–206, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.still.2015.08.009>
- Liao, Y.; McCormack, M.L.; Houbao, F.; Wang, H.; Wu, J.; Tu, J.; Liu, W.; Guo, D. Relation of fine root distribution to soil c in a *Cunninghamia Lanceolata* plantation in subtropical china. **Plant Soil**, v. 381, p. 225-234, 2014. <https://doi.org/10.1007/s11104-014-2114-9>
- Lin, B.B. Agroforestry management as an adaptive strategy against potential microclimate extremes in coffee agriculture. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 144, n. 1-2, p. 85–94, 2007. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2006.12.009>
- Lin, X.; Feng, Y.; Zhang, H.; Chen, R.; Wang, J.; Zhang, J.; Chu, H. Long-term balanced fertilization decreases arbuscular mycorrhizal fungal diversity in an arable soil in North China revealed by 454 pyrosequencing. **Environmental Science Technology**, v. 46, n. 11, p. 5764–5771, 2012. <https://doi.org/10.1021/es3001695>
- Liu, X.; Lu, X.; Zhao, W.; Yang, S.; Wang, J.; Xia, H.; Wei, X.; Zhang, J.; Chen, L.; Chen, Q. The rhizosphere effect of native legume *Albizia julibrissin* on coastal saline soil nutrient availability, microbial modulation, and aggregate formation. **Science of The Total Environment**, v. 806, n. 150705, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.150705>
- Luedeling, E.; Kindt, R.; Huth, N.I.; Koenig, K. Agroforestry systems in a changing climate-challenges in projecting future performance. **Current Opinion in Environmental Sustainability**, v. 6, p. 1–7, 2014. <https://doi.org/10.1016/j.cosust.2013.07.013>
- Madari, B.; Machado, P.L.O.A.; Torres, E.; Andrade, A.G.; Valencia, L.I.O. No tillage and crop rotation effects on soil aggregation and organic carbon in a Rhodic Ferralsol from southern Brazil. **Soil and Tillage Research**, v. 80, n. 1-2, p. 185–200, 2005. <https://doi.org/10.1016/j.still.2004.03.006>
- Teixeira, P.C.; Donagemma, G.K.; Fontana, A.; Teixeira, W.G. **Manual de métodos de análise de solo**. 3ª ed. Brasília, Embrapa, 2017. 574 p.
- Marinho, F.; Oehl, F.; Silva, I.R.; Coyne, D.; Veras, J.S.N.; Maia, L.C. High diversity of arbuscular mycorrhizal fungi in natural and anthropized sites of a Brazilian tropical dry forest (Caatinga). **Fungal Ecology**, v. 40, p. 82-91, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.funeco.2018.11.014>

Mbow, C.; Noordwijk, M.V.; Luedeling, E.; Neufeldt, H.; Minang, P.A.; Kowero, G. Agroforestry solutions to address food security and climate change challenges in Africa. **Current Opinion in Environmental Sustainability**, v. 6, p. 61–67, 2014. <https://doi.org/10.1016/j.cosust.2013.10.014>

Mendonça, V.Z.; Mello, L.M.M.; Andreotti, M.; Pereira, F.C.B.L.; Lima, R.C.; Valerio Filho, W.V.; Yano, E.H. Avaliação dos atributos físicos do solo em consórcio de forrageiras, milho em sucessão com soja em região de cerrados. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 37, p. 251-259, 2013.

Miller, R.M.; Jastrow, J.D. Mycorrhizal fungi influence soil structure. In: Kapulnik, Y., Douds, D.D. (Eds.). **Arbuscular Mycorrhizas: Physiology and Function**. Dordrecht, Kluwer Academic Publishers, 2000, p. 3–18.

Minasny, B.; Malone, B.P.; Mcbratney, A.B.; Angers, D.A.; Arrouays, D.; Chambers, A.; Chaplot, V.; Chen, Z.-S.; Cheng, K.; Das, B.S.; Field, D.J.; Gimona, A.; Hedley, C.B.; Hong, S.Y.; Mandal, B.; Marchant, B.P.; Martin, M.; Mcconkey, B.G.; Mulder, V.L.; O’rourke, S.; Richer-De-Forges, A.C.; Odeh, I.; Padarian, J.; Paustian, K.; Pan, G.; Poggio, L.; Savin, I.; Stolbovoy, V.; Stockmann, U.; Sulaeman, Y.; Tsui, C.-C.; Vågen, T.-G.; Wesemael, B.V.; Winowiecki, L. Soil carbon 4 permille. **Geoderma**, v. 292, p. 59–86, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2017.01.002>

Miranda, J.C.C.; Vilela, L.; Miranda, L.N. Dinâmica e contribuição da micorriza arbuscular em sistemas de produção com rotação de culturas. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 40, n. 10, p. 1005-1014, 2005. <https://doi.org/10.1590/S0100-204X2005001000009>

Moguel, P.; Toledo, V.M. Biodiversity conservation in traditional coffee systems of Mexico. **Conservation Biology**, v. 13, n. 1, 11-21, 1999. DOI: 10.1046/j.1523-1739.1999.97153.x

Monroe, P.H.M.; Gama-Rodrigues, E.F.; Gama-Rodrigues, A.C.; Marques, J.R.B. Soil carbon stocks and origin under different cacao agroforestry systems in Southern Bahia, Brazil. **Agriculture, Ecosystems & Environment**, v. 221, p. 99–108, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2016.01.022>

Monroe, P.H.M.; Barreto-Garcia, P.A.B.; Lima, M.C.D.; Santos, R.K.A.; Oliveira, E.P.; Silva, S.R.; Gama, D.C. Fine root contribution to the soil carbon stock of an Agroforestry system in a Caatinga-Atlantic Forest transition zone. **Brazilian Journal of Environmental Sciences**, v. 56, n. 1, p. 128-136, 2021. <https://doi.org/10.5327/Z21769478736>

Monroe, P.H.M.; Gama-Rodrigues, E.F.; Gama-Rodrigues, A.C.; Vicente, L.C. Carbon and nitrogen occluded in soil aggregates under cacao-based agroforestry systems in southern Bahia, Brazil. **Journal of Soil Science and Plant Nutrition**, v. 22, p. 1326–1339, 2022. <https://doi.org/10.1007/s42729-021-00734-3>.

- Montagnini, F.; Nair, P.K.R. Carbon sequestration: an underexploited environmental benefit of agroforestry systems. **Agroforestry System**, v. 61, p. 281-295, 2004. <https://doi.org/10.1023/B:AGFO.0000029005.92691.79>
- Moreira, F.M.S.; Siqueira, J.O. **Microbiologia e bioquímica do solo**. 2ª ed. Lavras, UFLA, 2006. 729 p.
- Muche, M.; Molla, E.; Rewald, B.; Tsegay, B.A. Diversity and composition of farm plantation tree/shrub species along altitudinal gradients in North-eastern Ethiopia: implication for conservation. **Heliyon**, v. 8, n. 3, p. e09048, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2022.e09048>.
- Mulumba, L.N.; Lal, R. Mulching effects on selected soil properties. **Soil and Tillage Research**, v. 98, n. 1, p. 106-111, 2008. <https://doi.org/10.1016/j.still.2007.10.011>
- Muschler, R.G. Shade improves coffee quality in a sub-optimal coffee-zone of Costa Rica. **Agroforestry Systems**, v. 85, p. 131–139, 2001. <https://doi.org/10.1023/A:1010603320653>
- Nair, P.K.R. Carbon sequestration studies in agroforestry systems: a reality-check. **Agroforestry Systems**, v. 86, p. 243–253, 2012. <https://doi.org/10.1007/s10457-011-9434-z>
- Nair, P.K.R.; Kumar, B.M.; Nair, V.D. 2021. **An Introduction to Agroforestry: Four Decades of Scientific Developments**, second ed. Springer, Dordrecht, The Netherlands.
- Nair, P.K.R.; Nair, V.D.; Kumar, B.M.; Showalter, J.M. Carbon sequestration in agroforestry systems. **Advances in Agronomy**, v. 108, p. 237–307, 2010. [https://doi.org/10.1016/S0065-2113\(10\)08005-3](https://doi.org/10.1016/S0065-2113(10)08005-3)
- Nascimento, M.S. Carbono em agregados e macrofauna do solo em sistemas de cultivo de café no sudoeste da Bahia. 2021. 61p. Dissertação (Mestrado em Agronomia). Universidade Estadual do Sudoeste da Bahia, Vitória da Conquista, BA.
- Nascimento, M.S.; Barreto-Garcia, P.A.B.; Monroe, P.H.M.; Scoriza, R.N.; Gomes, V.S. Interaction between edaphic mesofauna and organic carbon within water-stable aggregates in forestry systems: A case study in northeastern Brazil. **Catena**, v. 202, p. 105269, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2021.105269>.
- Nigussie, A; Taye, E; Bukero, G.B. Survey on potentials and constraints of shade tree species for Arabica coffee production in South Ethiopia. **International Journal of Recent Research in Life Sciences**, v. 1, n. 1, p. 1–11, 2014.
- Noellemeyer, E.; Frank, F.; Alvarez, C.; Morazzo, G.; Quiroga, A. Carbon contents and aggregation related to soil physical and biological properties under a landuse sequence in the semiarid region of central Argentina. **Soil and Tillage Research**, v. 99, n. 2, p. 179–190, 2008. <https://doi.org/10.1016/j.still.2008.02.003>
- O'brien, S.L.; Jastrow, J.D. Physical and chemical protection in hierarchical soil aggregates regulates soil carbon and nitrogen recovery in restored perennial grasslands.

Soil Biology and Biochemistry, v. 61, p. 1-13, 2013.

<https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2013.01.031>

Oades, J.M. Soil organic matter and structural stability: mechanisms and implications for management. **Plant and Soil**, v. 76, p. 319–337, 1984.

Odhiambo, H.O.; Ong, C.K.; Deans, J.D.; Wilson, J.; Khan, A.A.H.; Sprent, J.I. Roots, soil water and crop yield: tree crop interactions in a semiarid agroforestry system in Kenya. **Plant and Soil**, v. 235, p. 221-233, 2001. DOI: 10.1023/A:1011959805622

Oehl, F.; Sieverding, E.; Ineichen, K.; Mäder, P.; Wiemken, A.; Boller, T. Distinct sporulation dynamics of arbuscular mycorrhizal fungal communities from different agroecosystems in long-term microcosms. **Agriculture, Ecosystems & Environment**, v. 134, n. 3-4, p. 257–268, 2009. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2009.07.008>

Oehl, F.; Laczko, E.; Bogenrieder, A.; Stahr, K.; Bösch, R.; Heijden, M.V.; Sieverding, E. Soil type and land use intensity determine the composition of arbuscular mycorrhizal fungal communities. **Soil Biology and Biochemistry**, v. 42, n. 5, p. 724–738, 2010. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2010.01.006>

Oelbermann, M.; Voroney, R.P.; Thevathasan, N.V.; Gordon, A.M.; Kass, D.C.L.; Schlönvoigt, A.M. Soil carbon dynamics and residue stabilization in a Costa Rica and southern Canadian alley cropping system. **Agroforestry Systems**, v. 68, p. 27-36, 2006. <https://doi.org/10.1007/s10457-005-5963-7>

Oliveira, M.F.; Barreto-Garcia, P.A.B.; Conceição Júnior, V.; Monroe, P.H.M.; Gomes, V.S.; Sousa, J.P. Changes in microbial biomass and activity of tropical soil submitted to successive Eucalyptus rotations in the semi-arid region of Brazil. **Geoderma Regional**, v. 29, p. e00492, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.geodrs.2022.e00492>

Olsson, P.A.; Thingstrup, I.; Jakobsen, I.; Baath, E. Estimation of the biomass of arbuscular mycorrhizal fungi in a linseed field. **Soil Biology and Biochemistry**, v. 31, n. 13, p. 1879–1887, 1999. [https://doi.org/10.1016/S0038-0717\(99\)00119-4](https://doi.org/10.1016/S0038-0717(99)00119-4)

O'rourke, S.M.; Angers, D.A.; Holden, N.M.; Mcbratney, A.B. Soil organic carbon across scales. **Global Change Biology**, v. 21, n. 10, p. 3561–3574, 2015. <https://doi.org/10.1111/gcb.12959>

Pachauri, R.K.; Meyer, L.A. Climate change 2014: synthesis report, IPCC 2014: contribution of working groups I, II and III to the fifth. In: **Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change**. Geneva, IPCC, 2015. 147 p.

Pereira, M.G.; Loss, A.; Batista, I.; Melo, T.R.; Silva Neto, E.C.; Pinto, L.A.S.R. Biogenic and physcogenic aggregates: formation pathways, assessment techniques, and influence on soil properties. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 45, p. e0210108, 2021. <https://doi.org/10.36783/18069657rbcS20210108>

Perfecto, I.; Rice, R.A.; Greenberg, R.; Van Der Voort, M.E. Shade Coffee: a disappearing refuge for biodiversity: Shade coffee plantations can contain as much

biodiversity as forest habitats. **BioScience**, v. 46, n. 8, p. 598–608, 1996.
<https://doi.org/10.2307/1312989>

Poirier, V.; Roumet, C.; Munson, A.D. The root of the matter: Linking root traits and soil organic matter stabilization processes. **Soil Biology and Biochemistry**, v. 120, p. 246–259, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2018.02.016>

Pollierer, M.M.; Dyckmans, J.; Scheu, S.; Haubert, D. Carbon flux through fungi and bacteria into the forest soil animal food web as indicated by compound-specific ¹³C fatty acid analysis. **Functional Ecology**, v. 26, n. 4, p. 978-990, 2012.
<https://doi.org/10.1111/j.1365-2435.2012.02005.x>

Pulrolnik, K.; Barros, N.F.; Silva, I.R.; Novais, R.F.; Brandani, C.B. Estoques de carbono e nitrogênio em frações lábeis e estáveis da matéria orgânica de solos sob eucalipto, pastagem e Cerrado no vale do Jequitinhonha – MG. **Revista Brasileira de Ciências do Solo**, v. 33, n. 5, p. 1125-1136, 2009. <https://doi.org/10.1590/S0100-06832009000500006>

Qiang, W.; He, X.; Wang, J.; Zhao, L. Temporal and spatial variation of arbuscular mycorrhizal fungi under the canopy of *Hedysarum scoparium* in the northern desert, China. **Applied Soil Ecology**, v. 136, p. 139–147, 2019.
<https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2019.01.003>

Richter, D.D.; Markewitz, D.; Trumbore, S.E.; Wells, C.G. Rapid accumulation and turnover of soil carbon in a re-establishing forest. **Nature**, v. 400, p. 56–58, 1999.
<https://doi.org/10.1038/21867>

Rillig, M.C.; Maestre, F.T.; Lamit, L.J. Microsite differences in fungal hyphal length, glomalin, and soil aggregate stability in semiarid Mediterranean steppes. **Soil Biology and Biochemistry**, v. 35, n. 9, p. 1257-1260, 2003. [https://doi.org/10.1016/S0038-0717\(03\)00185-8](https://doi.org/10.1016/S0038-0717(03)00185-8)

Rillig, M.C.; Mummey, D.L. Mycorrhizas and soil structure. **New Phytologist**, v. 171, n. 1, p. 41-53, 2006. <https://doi.org/10.1111/j.1469-8137.2006.01750.x>

Rillig, M.C.; Muller, L.A.H.; Lehmann, A. Soil aggregates as massively concurrent evolutionary incubators. **The ISME Journal**, v. 11, p. 1943-1948, 2017. DOI: [10.1038/ismej.2017.56](https://doi.org/10.1038/ismej.2017.56)

Rubin, J. G. K. R.; Stürmer, S. L. Potencial de inóculo micorrízico e importância do comprimento do micélio para a agregação de solos de ambiente fluvial. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 39, n. 1, p. 59-68, 2015.
<https://doi.org/10.1590/01000683rbc20150466>

Saha, S.K.; Nair, P.K.R.; Nair, V.D.; Kumar, B.M. Carbon storage in relation to soil size-fractions under tropical tree-based land-use systems. **Plant and Soil**, v. 328, p. 433–446, 2010. <https://doi.org/10.1007/s11104-009-0123-x>

Santos, H.G.; Jacomine, P.K.T.; Anjos, L.H.C.; Oliveira, V.A.; Lumberras, J.F.; Coelho, M.R.; Almeida, J.A.; Araujo Filho, J.C.; Oliveira, J.B.; Cunha, T.J.F. **Sistema**

brasileiro de classificação de solos. 5ª ed. Brasília, Embrapa, 2018. 356 p.
<http://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/infoteca/handle/doc/1094001>

Santos, M.O.D.; Barreto-Garcia, P.A.B.; Gama-Rodrigues, E.F. Soil microbial biomass as an edge effect indicator in semi-deciduous seasonal forest fragments. **Floresta e Ambiente**, v. 26, n. 4, p. e20171037, 2019. <https://doi.org/10.1590/2179-8087.103717>.

Sarkhot, D.V.; Comerford, N.B.; Jokela, E.; Reeves, J.B.; Harris W.G. Aggregation and aggregate carbon in a forested southeastern coastal plain spodosol. **Soil Science Society of America Journal**, v. 71, n. 6, p.1779-1787, 2007. DOI: 10.2136/sssaj2006.0340

Schenck, N.C.; Pérez, Y. **Manual for the identification of VA mycorrhizal fungi**. 2ª ed. Gainesville, INVAM, 1988. 245 p.

Schindler, F.V.; Mercer, E.J.; Rice, J.A. Chemical characteristics of glomalin-related soil protein (GRSP) extracted from soils of varying organic matter content. **Soil Biology and Biochemistry**, v. 39, n. 1, p. 320–329, 2007.
<https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2006.08.017>

Schnabel, F.; Virginio Filho, E.M.; Xu, S.; Fisk, I.D.; Roupsard, O.; Haggard, J. Shade trees: a determinant to the relative success of organic versus conventional coffee production. **Agroforestry Systems**, v. 92, p. 1535-1549, 2018.
<https://doi.org/10.1007/s10457-017-0100-y>

Sieverding, E. **Vesicular Arbuscular Mycorrhiza Management in Tropical Agrosystems**. Eschborn, GTZ, 1991. 371 p.

Silva, I.R.; Mello, C.M.A.; Ferreira Neto, R.A.; Silva, D.K.A.; Melo, A.L.; Oehl, F.; Maia, L.C. Diversity of arbuscular mycorrhizal fungi along an environmental gradient in the Brazilian semiarid. *Applied Soil Ecology*, v. 84, p. 166–175, 2014.
<https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2014.07.008>

Singh, P.K.; Singh, M.; Tripathi, B.N. Glomalin: an arbuscular mycorrhizal fungal soil protein. **Protoplasma**, v. 250, n. 3, p. 663-669, 2013. DOI: 10.1007/s00709-012-0453-z

Singh, P.G.; Bhattacharyya, R.; Das, T.K.; Sharma, A.R.; Ghosh, A.; Das, S.; Jha, P. Crop rotation and residue management effects on soil enzyme activities, glomalin and aggregate stability under zero tillage in the Indo-Gangetic Plains. **Soil & Tillage Research**, v. 184, p. 291-300, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.still.2018.08.006>

Siqueira, J.O.; Colozzi-Filho, A.; Oliveira, E. Ocorrência de micorrizas vesicular-arbusculares em agro e ecossistemas do Estado de Minas Gerais. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 24, n. 12, p. 1499-1506, 1989.

Six, J.; Elliot, E.T.; Paustian, K.; Doran, J.W. Aggregation and soil organic matter accumulation in cultivated and native grassland soils. **Soil Science Society of America Journal**, v. 62, n. 5, p. 1367-1377, 1998.
<https://doi.org/10.2136/sssaj1998.03615995006200050032x>

Six, J.; Elliott, T.; Paustian, K. Aggregate and soil organic matter dynamics under conventional and no-tillage systems. **Soil Science Society of America Journal**, v. 63, n. 5, p. 1350-1358, 1999. <https://doi.org/10.2136/sssaj1999.6351350x>

Six, J.; Paustian, K.; Elliott, E.T.; Combrink, C. Soil structure and organic matter i. distribution of aggregate-size classes and aggregate-associated carbon. **Soil Science Society of America Journal**, v. 64, n. 2, p. 681–689, 2000. DOI: 10.2136/sssaj2000.642681x

Six, J.; Conant, R.T.; Paul, E.; Paustian, K. Stabilization mechanisms of soil organic matter: implications for C-saturation of soils. **Plant and Soil**, v. 241, n. 2, p. 155–176, 2002. DOI: 10.1023/A:1016125726789

Six, J.; Bossuyt, H.; Degryze, S.; Denef, K. A history of research on the link between (micro)aggregates, soil biota, and soil organic matter dynamics. **Soil and Tillage Research**, v. 79, n. 1, p. 7–31, 2004. <https://doi.org/10.1016/j.still.2004.03.008>

Six, J.; Paustian, K. Aggregate-associated soil organic matter as an ecosystem property and a measurement tool. **Soil Biology and Biochemistry**, v. 68, p. A4–A9, 2014. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2013.06.014>

Smith, S.E.; Read, D.J. **Mycorrhizal symbiosis**. 2.ed. Cambridge, Academic Press, 1997. 605p.

Soil Survey Staff, 2014. Keys to Soil Taxonomy, 12th ed. USDA-Natural Resources Conservation Service, Washington, DC.

Spivak, A.C.; Sanderman, J.; Bowen, J.L.; Canuel, E.A.; Hopkinson, C.S. Global-change controls on soil-carbon accumulation and loss in coastal vegetated ecosystems. **Nature Geoscience**, v. 12, p. 685 – 692, 2019. <https://doi.org/10.1038/s41561-019-0435-2>

Statsoft, I.N.C., 1974-2009. *Estatistica for Windows (Software-System for DataAnalys)*. Version 12.0, Tulsa, USA.

Stockmann, U.; Padarian, J.; Mcbratney, A.; Minasny, B.; Brogniez, D.; Montanarella, L.; Hong, S.Y.; Rawlins, B.G.; Field, D.J. Global soil organic carbon assessment. **Global Food Security**, v. 6, p. 9–16, 2015. <https://doi.org/10.1016/j.gfs.2015.07.001>

Sun, L.; Jing, H.; Wang, G.; Liu, G. Nitrogen addition increases the contents of glomalin-related soil protein and soil organic carbon but retains aggregate stability in a *Pinus tabulaeformis* forest. **Peer J**, p. 6:e5039. <https://doi.org/10.7717/peerj.5039>

Systat Software Inc, 2010. *Sigmaplot for Windows (Development and Testing Procedure)*. Version 14.0.

Tandon, S.; Sand, N.K. Qualitative analysis of phenolic constituents from leaves of some plants of family Meliaceae. **International Journal of Medicinal Plants and Natural Products**, v. 2, n. 1, p. 27–30. <https://doi.org/10.20431/2454-7999.0201005>.

- Tennant, D.A. Test of a modified line intersect method of estimating root length. **Journal of Ecology**, v. 63, n. 3, p. 995–1001, 1975. <https://doi.org/10.2307/2258617>
- Ter Braak, C.J.F. Canonical correspondence analysis: a new eigenvector technique for multivariate direct gradient analysis. **Ecological Society of America**, v. 67, n. 5, p. 1167–1179, 1986. <https://doi.org/10.2307/1938672>.
- Thakur, S.; Kumar, B.M.; Kunhamu, T.K. Coarse root biomass, carbon, and nutrient stock dynamics of different stem and crown classes of silver oak (*Grevillea robusta* A. Cunn. ex. R. Br.) plantation in Central Kerala, India. **Agroforestry Systems**, v. 89, n. 5, p. 869–883, 2015. <https://doi.org/10.1007/s10457-015-9821-y>
- Tian, B.; Yang, J.; Zhang, K.-Q. Bacteria used in the biological control of plantparasitic nematodes: populations, mechanisms of action, and future prospects. **FEMS Microbiology Ecology**, v. 61, n. 2, p. 197–213, 2007. <https://doi.org/10.1111/j.1574-6941.2007.00349.x>
- Tiessen, H.; Stewart, J.W.B. Particle-size fractions and their use in studies of soil organic matter. II – Cultivation effects on organic matter composition in size fractions. **Soil Science Society of America Journal**, v. 47, n. 3, p. 509–514, 1983. <https://doi.org/10.2136/sssaj1983.03615995004700030023x>
- Tisdall, J.M.; Oades, J.M. Organic matter and water-stable aggregates in soils. **Journal of Soil Science**, v. 33, n. 2, p. 141–163, 1982. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2389.1982.tb01755.x>
- Tivet, F.; Sá, J.C.M.; Lal, R.; Briedis, C.; Borszowski, P.R.; Santos, J.B.; Farias, A.; Eurich, G.; Hartman, D.C.; Nadolny Junior, M.; Bouzinac, S.; Séguy, L. Aggregate C depletion by plowing and its restoration by diverse biomass-C inputs under no-till in sub-tropical and tropical regions of Brazil. **Soil and Tillage Research**, v. 126, p. 203–218, 2013. <https://doi.org/10.1016/j.still.2012.09.004>
- Tonucci, R.G.; Nair, P.K.R.; Nair, V.D.; Garcia, R.; Bernardino, F.S. Soil carbon storage in silvopasture and related land-use systems in the Brazilian cerrado. **Journal of Environmental Quality**, v. 40, n. 3, p. 833 – 841, 2011. <https://doi.org/10.2134/jeq2010.0162>
- Tonucci, R.G.; Nair, V.D.; Nair, P.K.R.; Garcia, R. Grass vs. tree origin of soil organic carbon under different land-use systems in the Brazilian Cerrado. **Plant and Soil**, v. 419, p. 281–292, 2017. <https://doi.org/10.1007/s11104-017-3347-1>
- Valencia, V.; García-Barríos, L.; West, P.; Sterling, E.J.; Naeem, S. The role of coffee agroforestry in the conservation of tree diversity and community composition of native forests in a Biosphere Reserve. **Agriculture, Ecosystems & Environment**, v. 189, p.154–163, 2014. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2014.03.024>
- Velázquez, M.S.; Cabello, M.N.; Barrera, M. Composition and structure of arbuscular-mycorrhizal communities in El Palmar National Park, Argentina. **Mycologia**, v. 105, p. 509–520, 2013. <https://doi.org/10.3852/11-353>

Vieira, F.C.B.; Bayer, C.; Zanatta, J.A.; Mielniczuk, J.; Six, J. Building up organic matter in a subtropical Paleudult under legume cover-crop-based rotations. **Soil Science Society of America Journal**, v. 73, n. 5, p. 1699-1706, 2009. <https://doi.org/10.2136/sssaj2008.0241>

Vilela, L.A.F.; Saggin Júnior, O.J.; Paulino, H.B.; Siqueira, J.O.; Santos, V.L.S.; Carneiro, M.A.C. Arbuscular mycorrhizal fungi in microbial activity and aggregation of a cerrado oxisol in crop sequence. **Ciência e Agrotecnologia**, v. 38, n. 1, p. 34-42, 2014. <https://doi.org/10.1590/S1413-70542014000100004>

Voltan, R.B.Q.; Carelli, M.L.C.; Fahl, J.I. Variação na anatomia foliar de cafeeiros submetidos a diferentes intensidades luminosas. **Revista Brasileira de Fisiologia Vegetal**, v. 4, n. 2, p. 99-105, 1992.

Wiesmeier, M.; Urbanski, L.; Hobley, E.; Lang, B.; Lützow, M.V.; Marin-Spiotta, E.; Wesemael, B.V.; Rabot, E.; Ließ, M.; Garcia-Franco, N.; Wollschläger, U.; Vogel, H.J.; Kögel-Knabner, I. Soil organic carbon storage as a key function of soils – A review of drivers and indicators at various scales. *Geoderma*, v. 333, p. 149–162, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2018.07.026>

Wojciech, S.; Wojciech, M.; Krzysztof, O.; Wiesław, Z.; Mateusz, S. Impact of parent material, vegetation cover, and site wetness on variability of soil properties in proglacial areas of small glaciers along the northeastern coast of Sørkapland (SE Spitsbergen). **Catena**, v. 183, p. 104209. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2019.104209>

Wright, S.F.; Green, V.S.; Cavigelli, M.A. Glomalin in aggregate size classes from three different farming systems. **Soil and Tillage Research**, v. 94, n. 2, p. 546-549, 2007. <https://doi.org/10.1016/j.still.2006.08.003>

Wright, S.F.; Upadhyaya, A. Extraction of an abundant and unusual protein from soil and comparison with hyphal protein of arbuscular mycorrhizal fungi. **Soil Science**, v. 161, n. 9, p. 575–586, 1996. <https://doi.org/10.1097/00010694-199609000-00003>

Wright, S.F.; Upadhyaya, A. A survey of soils for aggregate stability and glomalin, a glycoprotein produced by hyphae of arbuscular mycorrhizal fungi. **Plant and Soil**, v. 198, p. 97–107, 1998.

Wu, Q.-S.; He, X.-H.; Zou, Y.-N.; He, K.-P.; Sun, Y.-H.; Cao, M.-Q. Spatial distribution of glomalin-related soil protein and its relationships with root mycorrhization, soil aggregates, carbohydrates, activity of protease and β -glucosidase in the rhizosphere of *Citrus unshiu*. **Soil Biology and Biochemistry**, v. 45, p. 181-183. <https://10.1016/j.soilbio.2011.10.002>

Xu, X.; Pei, J.; Xu, Y.; Wang, J. Soil organic carbon depletion in global Mollisols regions and restoration by management practices: a review. **Journal of Soils and Sediments**, v. 20, p. 1173–1181, 2020. <https://doi.org/10.1007/s11368-019-02557-3>

Yang, H.; Xiao, Q.; Huang, Y.; Cai, Z.; Li, D.; Wu, L.; Meersmans, J.; Colinet, G.; Zhang, W. Long-term manuring facilitates glomalin-related soil proteins accumulation

by chemical composition shifts and macro-aggregation formation, **Soil and Tillage Research**, v. 235, p. 105904, 2024. <https://doi.org/10.1016/j.still.2023.105904>

Zhang, J., Tang, X., Zhong, S., Yin, G., Gao, Y., He, X. Recalcitrant carbon components in glomalin-related soil protein facilitate soil organic carbon preservation in tropical forests. **Scientific Reports**, v. 7, p. 2391, 2017a. <https://doi.org/10.1038/s41598-017-02486-6>.

Zhang, Y.; He, X.; Zhao, L.; Zhang, J.; Xu, W. Dynamics of arbuscular mycorrhizal fungi and glomalin under *Psammochloa villosa* along a typical dune in desert, North China. **Symbiosis**, v. 73, p. 145–153, 2017b. DOI: 10.1007/s13199-017-0488-1

Zhao, J.; Wang, X.; Wang, X.; Fu, S. Legume-soil interactions: legume addition enhances the complexity of the soil food web. **Plant and Soil**, v. 385, n. 1-2, p. 273–286, 2014. DOI: 10.1007/s11104-014-2234-2

Zhao, J.; Chen, S.; Hu, R.; Li, Y. Aggregate stability and size distribution of red soils under different land uses integrally regulated by soil organic matter, and iron and aluminum oxides. **Soil and Tillage Research**, v. 167, p. 73-79, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.still.2016.11.007>

Zhu, Y.-G.; Miller, R.M. Carbon cycling by arbuscular mycorrhizal fungi in soil–plant systems. **Trends in Plant Science**, v. 8, n. 9, p. 407–409, 2003. [https://doi.org/10.1016/S1360-1385\(03\)00184-5](https://doi.org/10.1016/S1360-1385(03)00184-5)