

Cinética de liberação de CO₂ e decomposição da fitomassa em sistemas de uso e manejo do solo

Release kinetics of CO₂ and phytomass decomposition in systems of use and soil management

Cinética de liberación de CO₂ y descomposición de fitomasa en sistemas de ordenación y uso del suelo

Recebido: 21/12/2020 | Revisado: 29/12/2020 | Aceito: 30/12/2020 | Publicado: 04/01/2021

Daniel da Silva Gomes

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7293-7762>
Universidade Federal da Paraíba, Brasil
E-mail: danielsgea@gmail.com

Alex da Silva Barbosa

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7343-6134>
Universidade Federal da Paraíba, Brasil
E-mail: aldasibarbosa@gmail.com

Teófilo de Medeiros Santos

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9073-2293>
Universidade Federal da Paraíba, Brasil
E-mail: theomedeiros92@gmail.com

Sabrina Kelly dos Santos

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8078-9678>
Universidade Estadual da Paraíba, Brasil
E-mail: sabrinasks11@gmail.com

João Henrique Constantino Sales Silva

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6218-5096>
Universidade Federal da Paraíba, Brasil
E-mail: joaohenriqueconst@gmail.com

Ítalo de Souza Aquino

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7948-8760>
Universidade Federal da Paraíba, Brasil
E-mail: italo.aquino@terra.com.br

Resumo

A forma de ocupação e as práticas de manejo de um solo provocam alterações, físicas, químicas e biológicas que afetam a sustentabilidade ambiental e econômica da atividade agrícola. Assim sendo, objetivou-se avaliar a dinâmica da decomposição foliar e a atividade microbiana em três sistemas de uso e manejo do solo na Microrregião do Brejo, Paraíba, Brasil. As áreas estudadas foram: Sistema Agroflorestal, mandala agrícola e floresta nativa. A taxa de decomposição foi estimada com o uso de sacolas de *nylon*, contendo 10 g de folhas de *Gliricidia sepium*, que foram dispostas na superfície do solo de cada área por um período de 56 dias. O material foliar foi coletado a cada sete dias e levado a estufa a 65°C e pesado para avaliar a perda de peso em relação ao peso inicial. A atividade microbiana foi estimada pela quantificação do dióxido de carbono (CO₂) desprendido no processo de respiração edáfica, a partir da superfície do solo, e capturado por solução de KOH. O material foliar disposto na superfície do solo do Sistema Agroflorestal apresentou maior velocidade de decomposição, em relação aos demais sistemas. O sistema que emitiu maior quantidade de CO₂ para a atmosfera foi a horta mandala. Os fatores climáticos, como precipitação e temperatura, influenciam na dinâmica de decomposição e na emissão de CO₂ liberado pelos microrganismos edáficos.

Palavras-chave: Fatores climáticos; Microrganismos; Respiração edáfica; Solo.

Abstract

The form of occupation and soil management practices cause physical, chemical, and biological changes that affect the environmental and economic sustainability of the agricultural activity. Therefore, the objective was to evaluate the dynamics of leaf decomposition and microbial activity in three soil use and management systems in the Brejo, Paraíba, Brazil. The areas studied were: Agroforestry System, agricultural mandala, and native forest. The decomposition rate was determined using nylon bags containing 10 g of *Gliricidia sepium* leaves, which were placed on the soil surface of each area for 56 days. The leaf material was collected every seven days and taken to an oven at 65°C and weighed to evaluate the weight loss about the initial weight. The microbial activity was estimated by the quantification of carbon dioxide (CO₂) released in the process of edaphic respiration, from the soil surface, and captured by the KOH solution. The Agroforestry System showed a higher decomposition speed. The system that emitted the massive amount of CO₂ into the atmosphere was the mandala agricultural system. Climatic factors, such

as precipitation and temperature, influence the dynamics of decomposition and the emission of CO₂ released by edaphic microorganisms.

Keywords: Climatic factors; Microorganisms; Edaphic breathing; Soil.

Resumen

La forma de ocupación y las prácticas de manejo del suelo provocan cambios físicos, químicos y biológicos que afectan la sostenibilidad ambiental y económica de la actividad agrícola. Por lo tanto, el objetivo fue evaluar la dinámica de la descomposición foliar y la actividad microbiana en tres sistemas de uso y manejo del suelo en Brejo, Paraíba, Brasil. Las áreas estudiadas fueron: Sistema Agroforestal, mandala agrícola y bosque nativo. La tasa de descomposición se estimó mediante bolsas de nailon, que contenían 10 g de hojas de *Gliricidia sepium*, las cuales se colocaron en la superficie del suelo de cada área por un período de 56 días. El material foliar se recogió cada siete días y se llevó a un horno a 65 °C y se pesó para evaluar la pérdida de peso en relación con el peso inicial. La actividad microbiana se estimó cuantificando el dióxido de carbono (CO₂) liberado en el proceso de respiración edáfica, desde la superficie del suelo, y capturado por la solución de KOH. El material foliar dispuesto en la superficie del suelo del Sistema Agroforestal presentó una mayor velocidad de descomposición, en relación a los otros sistemas. El sistema que emitió la mayor cantidad de CO₂ a la atmósfera fue el jardín mandala. Los factores climáticos, como la precipitación y la temperatura, influyen en la dinámica de descomposición y la emisión de CO₂ liberado por los microorganismos edáficos.

Palabras clave: Factores climáticos; Microorganismos; Respiración edáfica; Suelo.

1. Introdução

O solo é um sistema natural vivo e dinâmico que regula a produção de alimentos, fibras e o equilíbrio global dos ecossistemas terrestres (Pinheiro, 2015), sendo necessária atenção especial no que se refere às práticas de manejo que propiciam o acúmulo de matéria orgânica e a ciclagem de nutrientes e que evitem o declínio da fertilidade dos solos. Há uma crescente tendência nos estudos e reflexões acerca do uso de práticas e métodos que visem esses cuidados com o solo e que reconheçam a importância da matéria orgânica como condicionadora do ambiente edáfico, bem como fornecedora de nutrientes (Alcântara, 1998).

A atividade biológica do solo pode ser avaliada por meio de vários parâmetros, dentre os quais se destacam o da respiração, a quantidade de CO₂ liberada, decorrente da respiração de microrganismos e raízes é um dos métodos mais utilizados para avaliar a atividade microbiana que é influenciada, dentre outros fatores, pela temperatura do solo (Araujo et al., 2016). Assim sendo, estudos de cinética da respiração edáfica ajudam a esclarecer e relacionar o dinamismo das atividades biológicas que ocorrem no solo, além de ser uma ferramenta recomendada para avaliar a revitalização dos solos de áreas que sofreram algum processo de perturbação, devido o baixo custo e eficiência deste processo (Souto et al., 2009; Araujo et al., 2011).

Nos sistemas sustentáveis de produção o entendimento da dinâmica dos processos de decomposição de resíduos orgânicos contribui na mudança de práticas de manejo, sobretudo, no que diz respeito à fertilidade do solo (Belo et al., 2012). Grande parte do material orgânico acumulado no solo é formado de material de origem vegetal proveniente da deposição contínua da serapilheira. Dentre os componentes da serapilheira, o montante do material foliar é o mais abundante em quantidade de nutrientes orgânicos e inorgânicos, tornando-se uma fonte de nutrientes para as plantas (Silva et al., 2014).

Nesse sentido, avaliações diretas através de medidas de perdas massa em sacolas de *nylon* ou *litterbags* é um dos principais métodos utilizados para avaliar a decomposição da camada de serapilheira. Essa técnica é um método de baixo custo, sendo muito importante no estudo da dinâmica da decomposição da matéria orgânica e entendimento da ciclagem de nutrientes nos ecossistemas (Almeida, 2010).

A Mesorregião do Agreste da Paraíba, em particular a Microrregião do Brejo, possuem poucas informações sobre estudos e identificação de indicadores de alterações químicas, físicas e biológicas edáficas, em especial os que têm como referência o solo sob condições naturais (Silva et al., 2015), com isso, estudos desse gênero possuem grande relevância, visto que servirão como referência para processos de acompanhamento, seleção, monitoramento e avaliação de indicadores da

qualidade do ambiente edáfico em sistemas de ocupação e manejo do solo (Miranda, 2018).

Diante do exposto, objetivou-se avaliar a dinâmica da decomposição foliar e a atividade microbiana em diferentes sistemas de uso e manejo do solo na Microrregião do Brejo Paraibano, Brasil.

2. Metodologia

A natureza deste estudo caracterizou-se como uma pesquisa de campo e laboratório (Pereira et al., 2018). O estudo foi desenvolvido no Centro de Ciências Humanas, Sociais e Agrárias (CCHSA), Campus – III, da Universidade Federal da Paraíba (UFPB), localizada no município de Bananeiras/PB (6°46'S e 35°38'W Gr.). O município ocupa uma área de 257,753 km², com altitude em torno de 526 metros, distante 141 km da capital João Pessoa/PB e pertence à Mesorregião do Agreste Paraibano, mais precisamente na Microrregião do Brejo. O município está inserido no domínio fitogeográfico da Caatinga e apresenta vegetação típica de Mata Úmida de Altitude e Mata Subcaducifólia. O clima da região é classificado como As', (tropical chuvoso) quente e úmido (Classificação de Köppen) e se caracteriza por apresentar temperaturas de 18 a 27°C e precipitação média de 1.200 a 1.500 mm, com chuvas de outono a inverno (concentradas nos meses de maio a agosto) (Francisco et al., 2018).

A coleta de dados foi realizada em quatro sistemas de uso e ocupação do solo, sendo eles:

Sistema I – Mandala agrícola: área com aproximadamente 15 anos de implantação em que há uma permanente introdução de adubo orgânico, sobretudo, oriundo de dejetos de ruminantes (esterco bovino e caprino). O sistema é irrigado diariamente sem muitos critérios técnicos, e não há cobertura morta nos canteiros deixando o solo exposto. As principais culturas agrícolas plantadas neste sistema são: pimentão (*Capsicum annum* L.), alface (*Lactuca sativa* L.), cenoura (*Daucus carota* L.), beterraba (*Beta vulgaris* L.) e couve (*Brassica oleracea* L.), além de plantas medicinais não identificadas.

Sistema II – Floresta: remanescente florestal ecotonal de Brejo de Altitude em estado secundário, composto, predominantemente, por espécies nativas da Mata Atlântica, a exemplo da biriba-branca (*Eschweilera ovata* (Cambess.) Mart. ex Miers), pitombeira (*Talisia esculenta* (A. St.-Hil.) Radlk.), jatobá (*Hymenaea courbaril* L.), dentre outras espécies arbóreas não identificadas. Este remanescente florestal possui espécies de importância singular para fitofisionomia do fragmento de mata e a conservação da fauna e floral local.

Sistema III – Sistema Agroflorestal: área com aproximadamente 15 anos de implantação, possuindo a gliricídia (*Gliricídia sepium* (Jacq.) Walp.) como planta principal e o café (*Coffea* sp.), como planta secundária nas entrelinhas, por apresentar exigência de sombra, característica de espécies de sub-bosque. Neste agroecossistema, a poda das árvores é realizada com frequência, aumentando significativamente o aporte de matéria orgânica no solo.

Sistema IV – Pastagem: área composta por gramíneas nativas não identificadas, jaqueiras (*Artocarpus heterophyllus* Lam.) esparsas na área e algumas plantas herbáceas e frequentemente é forrageada por ovinos da raça Santa Inês.

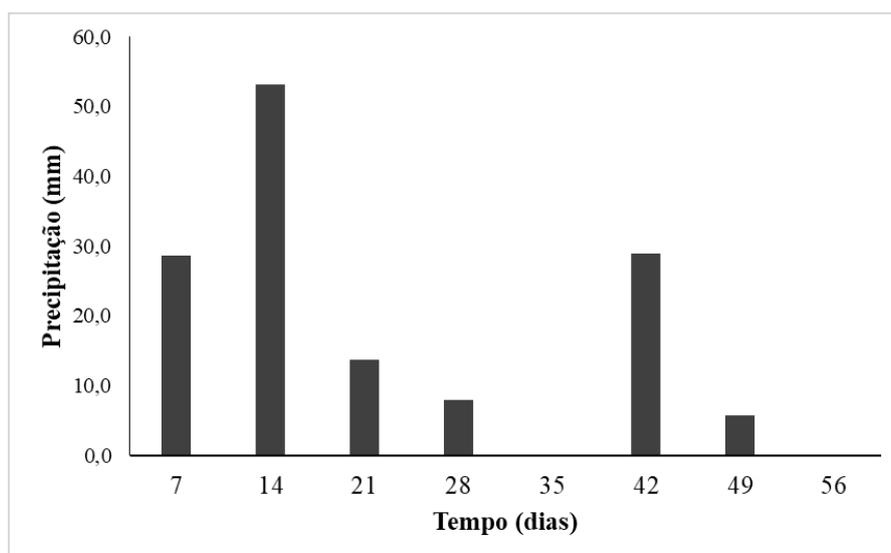
Decomposição da fitomassa

Para a determinação da decomposição foliar foram coletadas amostras da fração foliar de *Gliricídia sepium*, espécie leguminosa usada na adubação verde e alimentação animal, adaptada a regiões semiáridas e de brejos. A escolha da espécie se deu pela baixa resistência a decomposição (Alves et al., 2006). As folhas foram colocadas em estufa de circulação de ar forçada a 65 °C até atingir peso constante, e posteriormente, para estimativa da decomposição, foram pesadas porções de 10 g da folha seca e acondicionadas em bolsas de nylon (*litterbags*) de malha 2 mm e dimensões 20 × 30 cm conforme metodologia proposta por Wieder (1982) e Olson (1963). As bolsas foram distribuídas sobre a superfície do solo de cada sistema e simulam a queda natural do material que forma a serapilheira.

As coletas das bolsas de nylon ocorreram a cada sete dias em intervalos regulares de 7, 14, 21, 28, 35, 42, 49 e 56

dias, perfazendo um total de oito coletas, sendo retiradas três bolsas por coleta em cada área. O experimento ocorreu no período de 12 de abril a 07 de junho de 2019, durante o período chuvoso na região. Os dados pluviométricos foram obtidos através da estação meteorológica do Laboratório de Desenvolvimento Sustentável e Agroecologia do CCHSA/UFPB. Na Figura 1, encontra-se o somatório das precipitações em intervalos de sete dias, correspondente às coletas das bolsas de *nylon*. A precipitação total durante a condução desse ensaio experimental foi de 138,3 mm, sendo que a maior precipitação ocorreu na segunda semana após a distribuição das bolsas, acumulando 53,2 mm.

Figura 1. Precipitação média (mm) durante o período experimental, de 12 de abril a 07 de junho de 2019, em Bananeiras, Paraíba.



Fonte: Gomes et al. (2021).

As bolsas foram transportadas em sacos plásticos para o laboratório, onde as amostras passaram por um processo de limpeza, com o auxílio de pincéis para retirada do material indesejado, como raízes de ervas espontâneas e solo ou qualquer outro material que não fosse proveniente da fração foliar. Em seguida, o material foliar remanescente foi identificado em sacos de papel e colocado para secar em estufa de circulação de ar forçada a 65°C, durante 72 horas, até a obtenção da massa constante, e, posteriormente, obteve-se o peso remanescente em balança de precisão de 0,0001g.

As avaliações foram feitas por meio de medidas de perda de massa considerando-se a massa inicial e a final (remanescente) em um determinado tempo, com a Equação 1:

$$\text{Massa Remanessente} = \frac{\text{Massa Final}}{\text{Massa Inicial}} * 100 \quad \text{Eq.(1)}$$

Para avaliação da decomposição é utilizado o ajuste de um modelo matemático que estima a constante que descreve a perda de massa ao longo do tempo (-k). O modelo mais frequentemente utilizado é o de decaimento exponencial simples, considerado por Olson (1963), o qual se aproxima da biologia da decomposição correspondente a uma perda de massa mais acentuada nos primeiros dias (componentes solúveis e fáceis de serem degradados) e mais demorada em longo prazo (materiais recalcitrantes) (Wieder, 1982).

Após o cálculo da massa remanescente ao longo do período, a constante de decomposição *k* foi calculada com o modelo exponencial proposto por (Thomas & Asakawa, 1993), aplicando a Equação 2.

$$X_t = X_0 * e^{-kt} \quad \text{Eq.(2)}$$

Onde: X_t – peso do material seco remanescente após t dias; X_0 – peso do material seco colocado nos sacos no tempo zero ($t = 0$); e – é a base de logaritmo natural e ; $-k$ – é o coeficiente de processamento da decomposição.

O tempo de meia-vida também foi calculado ($T_{1/2} = 0,693/k$) de acordo com Paul & Clark (1989), que expressa o período de tempo necessário para que metade dos resíduos decomponha-se ou para que metade dos nutrientes contidos nos resíduos seja liberada, é possível calcular o tempo de meia-vida pela Equação 3.

$$T_{1/2} = \ln \frac{2}{k} \quad \text{Eq.(3)}$$

Devido ao ataque de formigas cortadeiras às bolsas de *nylon* na área de pastagem, não foi possível quantificar a taxa de decomposição foliar neste sistema de ocupação do solo. Dessa forma, o delineamento experimental para a análise da decomposição foi inteiramente casualizado com 3 repetições por área, com os tratamentos em arranjo fatorial 3×8 (sistema \times período em dias).

Cinética de liberação de CO_2

Para quantificar o dióxido de carbono liberado por cada sistema, utilizou-se a metodologia proposta por Grisi (1978), na qual, o CO_2 liberado do solo é capturado por uma solução de hidróxido de potássio (KOH – 0,5N) e em seguida, quantificada através de titulação com ácido clorídrico (HCl – 0,1N), tendo como indicadores, a fenolftaleína e o alaranjado de metila, ambos a 1% de concentração (Morita & Assumpção, 1972). A cinética da respiração edáfica foi realizada no dia 10 de outubro de 2019, início do período seco na região.

Na captura de CO_2 , os recipientes contendo 10 mL da solução KOH permaneceram em campo cobertos individualmente por um balde invertido das 05h00min às 17h00min. Utilizou-se ainda, uma amostra controle para cada área, e estas permaneceram fechadas durante todo o processo para evitar as trocas e ao final passaram pelo processo de titulação. Os baldes possuíam um diâmetro de 29,8 cm e altura de 36,5 cm, cobrindo uma área de 697,46 cm² e tiveram a borda enterrada no solo para evitar as trocas gasosas. A coleta dos recipientes ocorreu a cada 2 horas durante as 12 horas de avaliação em período diurno e a temperatura do solo foi aferida a 10 cm de profundidade através de um termômetro do tipo espeto Instrutherm® - TE-400.

A determinação do CO_2 absorvido foi feito através da Equação 4.

$$ACO_2 = (A - B) * 2 * 2,2 \text{ em mg}$$
$$A'CO_2 = ACO_2 * \left(\frac{4}{3} * \frac{10.000}{h} + S \right) \text{ em mg} \quad \text{Eq.(4)}$$

Onde: $A'CO_2$ – absorção de CO_2 ; A – diferença entre a 1ª e a 2ª etapa da titulação da amostra (mL); B – diferença entre a 1ª e 2ª etapa da titulação da amostra controle (mL); h – período de permanência da amostra no solo (horas); S – área de abrangência do balde (cm²).

Para a estimativa da atividade microbiana, foi utilizado o delineamento experimental inteiramente casualizado com 9 repetições por área, com os tratamentos em arranjo fatorial 4×6 (sistema \times período em horas).

Utilizaram-se os testes de Shapiro-Wilk (decomposição) e Hartley (cinética de CO_2) para verificar a normalidade dos dados e a homogeneidade das variâncias. Refutando a hipótese de igualdade dos tratamentos previamente mencionados, aplicou-se o teste de Tukey para analisar a diferença entre as médias. A análise estatística foi realizada mediante o uso do *software* estatístico R, versão 3.4.1 (R Core Team, 2017).

3. Resultados e Discussão

Decomposição da fitomassa

De acordo com a análise de variância (Tabela 1), observa-se que houve efeito significativo ($p < 0,05$) para a interação sistemas de manejo \times tempo de coleta na variável velocidade de decomposição, bem como para os fatores isolados em todas as variáveis. Contudo, não houve significância para a interação $S \times T$ nas variáveis massa remanescente e tempo de meia-vida.

Tabela 1. Resumo da análise de variância da massa remanescente (%), tempo de meia-vida ($t_{1/2}$) e velocidade de decomposição (k) da fração foliar de *Gliricídia sepium* ao longo do processo de decomposição em função do tempo de coleta e dos sistemas de uso e manejo do solo.

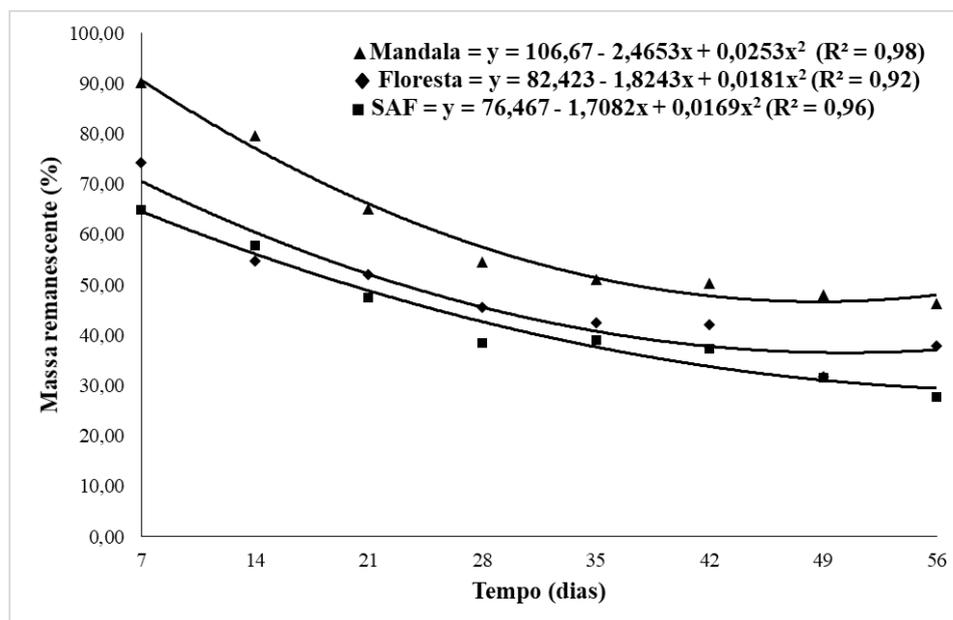
Fonte de variação	GL	Quadrados Médios		
		MR	TMV	VD
Sistemas de manejo (S)	2	1899,41*	2540,60*	0,00163*
Tempo de coleta (T)	7	1693,72*	310,54*	0,00050*
$S \times T$	14	41,72 ^{ns}	90,45 ^{ns}	0,00017*
Resíduo	48	43,49	51,32	0,00003
CV	%	13,03	23,06	22,28

MR: massa remanescente; TMV: tempo de meia-vida; VD: velocidade de decomposição; CV: coeficiente de variação; ^{ns} – não significativo; * – significativo a $p < 0,05$. Fonte: Gomes et al. (2021).

Na Figura 2 observa-se as curvas de decomposição da fitomassa contida nas sacolas de *nylon*, distribuídas nos sistemas e expostas às condições climáticas naturais, no período de 12 de abril a 07 de junho/2019. Os valores médios de perda da massa remanescente (%) evidenciam que o Sistema Agroflorestal (SAF), apresentou uma maior taxa decomposição nos primeiros 7 dias em campo em relação às demais áreas, sendo a massa remanescente de 64,87% neste período. Este percentual decresceu ainda mais aos 28 dias, alcançando um percentual em torno de 38,40%. Semelhante ao SAF, o remanescente de floresta obteve percentuais de 74,27 e 45,43% aos 7 e 28 dias, respectivamente. No entanto, o sistema agrícola mandala apresentou menor perda de massa remanescente, com valores médios de 90% nos primeiros 7 dias.

Quando se observa apenas o tempo relacionando-o com a percentagem de resíduos remanescente, o comportamento da taxa de decomposição nas três áreas é similar, diminuindo a percentagem de resíduos com o passar do tempo. Ao término das coletas, os sistemas SAF, floresta e mandala mantiveram uma decomposição foliar lenta e gradual, chegando ao 56° dia com 27,63, 37,87 e 46,30% da massa remanescente, respectivamente.

Figura 2. Massa remanescente (%) da fração foliar de *Gliricídia sepium* ao longo do processo de decomposição em três sistemas de uso e manejo do solo.

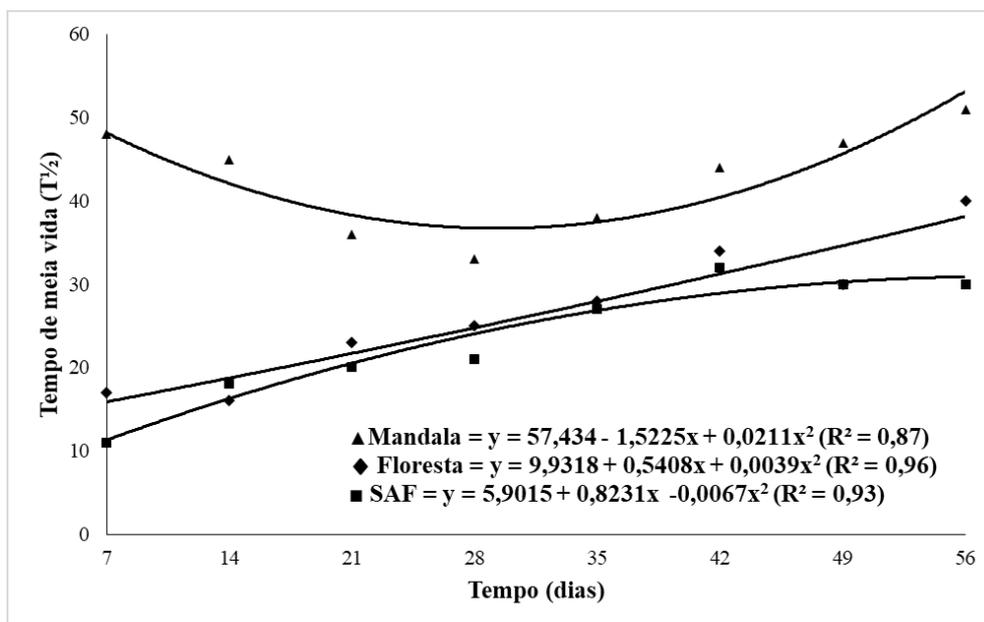


Fonte: Gomes et al. (2021).

Provavelmente, os altos índices de precipitação (Figura 1) aceleraram o processo de decomposição nas primeiras semanas de avaliação, apontando a influência dos fatores ambientais na atividade da microbiota do solo. Outra possível explicação seria o fato da fração foliar inicial apresentar maior concentração de componentes que foram lixiviados pela ação das chuvas, como os extrativos e substâncias mais simples como açúcares, que são facilmente metabolizados pelos microrganismos quando as condições ambientais são favoráveis. Enquanto que estruturas residuais com altos teores de lignina, taninos e outros componentes, dificultam a ação dos decompositores, que vão degradando-a de forma mais lenta (Souto et al., 2013), o que justifica a diminuição acentuada na taxa de decomposição nas semanas finais ao término do ensaio experimental, visto que restou nas sacolas as partes mais resistentes das folhas que não foram totalmente decompostas como nervuras e pecíolos.

Quanto ao tempo de meia-vida (Figura 3), que representa o tempo necessário, em dias, para que metade da matéria seja decomposta, as médias foram de 23,70 no SAF, 26,61 na floresta e 42,77 na mandala agrícola. O sistema mandala precisou de mais tempo para decompor metade das folhas de *G. Sepium*, diferindo estatisticamente do SAF e da floresta. Faz-se válido destacar que a presença de espécies arbóreas, sobretudo às pertencentes a família das Leguminosae, favorece a manutenção da ciclagem de nutrientes e consequentemente aumentam a matéria orgânica do solo formada pela fitomassa que é resultante da deposição e decomposição de resíduos vegetais (Corrêa et al., 2005).

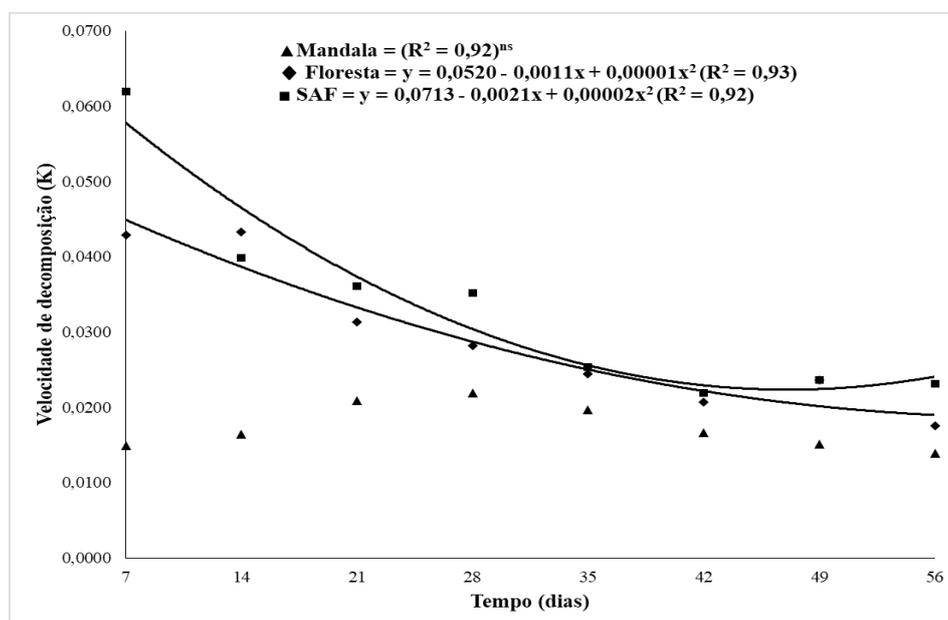
Figura 3. Tempo de meia-vida ($t_{1/2}$), da fração foliar de *Gliricídia sepium* ao longo do processo de decomposição em três sistemas de uso e manejo do solo.



Fonte: Gomes et al. (2021).

Em relação à velocidade de decomposição da fitomassa (dia^{-1}) (Figura 4), esta foi maior inicialmente no sistema agroflorestal, com 0,0619 ao 7º dia, seguido da floresta e mandala, com 0,0429 e 0,0149, respectivamente. Esses resultados podem ser explicados pela precipitação pluviométrica que ocorreu neste período, visto que os fatores climáticos, a exemplo da chuva, exercem grande influência sobre a velocidade de decomposição da matéria, sobretudo, em ambientes com pouca cobertura vegetal (dossel), a exemplo da horta mandala.

Figura 4. Velocidade de decomposição (k) da fração foliar de *Gliricídia sepium* ao longo do ao longo do tempo em três sistemas de uso e manejo do solo.



Fonte: Gomes et al. (2021).

Esses resultados corroboram os encontrados por Paula et al. (2015) ao avaliarem a produção de biomassa e ciclagem de nutrientes dessa espécie num Sistema Agroflorestal em Seropédica – RJ. Os autores encontraram valores de 0,029 para k (dia^{-1}) e $t_{1/2}$ de 24 (dias) na estação seca e 0,048 k (dia^{-1}) e $t_{1/2}$ de 14 (dias) na estação chuvosa. Ainda de acordo com os autores a produção de biomassa da leguminosa *G. Sepium* evidencia que essa espécie pode ser responsiva aos diferentes tipos de manejo e condições edafoclimáticas.

Cinética de liberação de CO₂

O resumo da análise de variância da cinética de liberação de CO₂ em função da temperatura encontra-se na Tabela 2. Observa-se que não houve efeito significativo para a interação sistemas \times tempo de coleta e para o fator isolado sistemas na variável cinética de CO₂, mas houve significância para o fator tempo de coleta. Enquanto que para a temperatura do solo o efeito foi significativo ($p < 0,0001$) tanto para a interação entre fatores, bem como para os fatores isolados (Tabela 2). Destaca-se que a atividade microbiana do solo sofreu influência do tempo de coleta das amostras, o que causou um aumento na liberação de CO₂ em todos os sistemas de uso do solo avaliados.

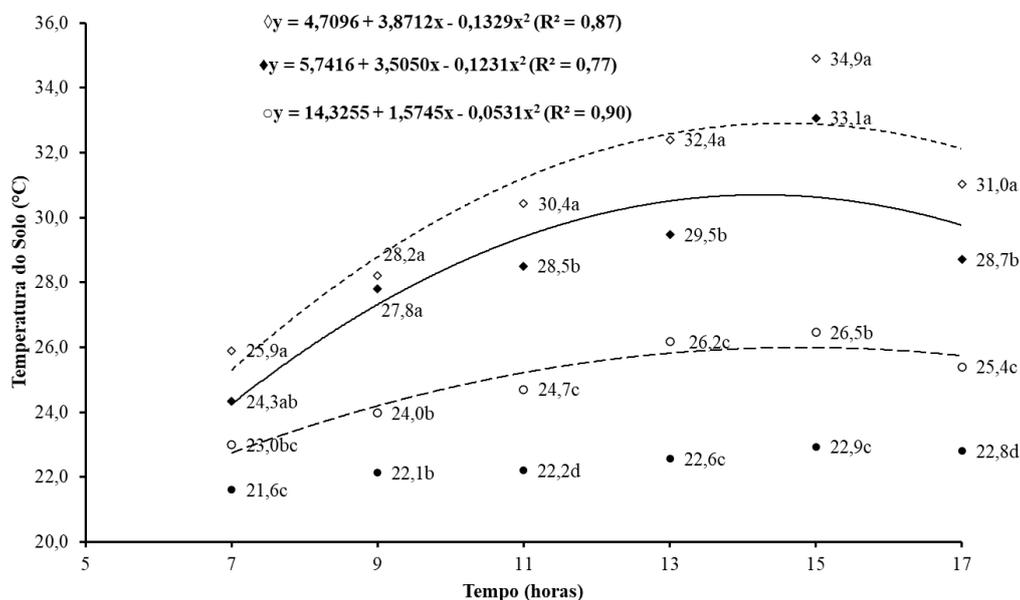
Tabela 2. Resumo da análise de variância da cinética de CO₂ e temperatura do solo em função dos sistemas de manejo e o tempo de coleta das amostras em áreas de Brejo de Altitude em Bananeiras, Paraíba, Brasil.

Fonte de variação	GL	Quadrados Médios	
		Cinética de CO ₂ ($\text{mg m}^{-2} \text{h}^{-1}$)	Temperatura do solo ($^{\circ}\text{C}$)
Sistemas de manejo (S)	3	0,0185 ^{ns}	238,8780***
Tempo de coleta (T)	5	0,6307***	43,9270***
S \times T	15	0,0088 ^{ns}	5,2170***
Resíduo	48	0,00941	0,7780
CV	%	5,6	3,31

CV: coeficiente de variação; ^{ns} – não significativo; *** – significativo a $p < 0,0001$. Fonte: Gomes et al. (2021).

Ao analisar os valores de P, constatou-se que houve efeito quadrático para temperatura do solo em função aumento no tempo de coleta, no qual observou-se que os valores estimados de ponto máximo ocorreram as 14:36; 14:12; 14:48 h, com temperaturas estimadas de 32,9; 30,7; 26 $^{\circ}\text{C}$ nas áreas de Pastagem, Mandala e Sistema Agroflorestal, respectivamente (Figura 5).

Figura 5. Temperatura do solo (°C) sob sistemas de manejo, floresta (●), mandala (◆), pastagem (◇) e SAF (○) e o tempos de coleta, 7; 9; 11; 13; 15 e 17 horas em áreas de Brejo de Altitude em Bananeiras, Paraíba, Brasil. ^{a,b}Médias seguidas de letras minúsculas diferem entre si pelo teste F ($p < 0,05$). Valores de P para regressão em função dos sistemas de manejo: Floresta^{ns}; Mandala^{Q = <0,0001}; Pastagem^{Q = 0,0001} e Saf^{Q = 0,01404}.



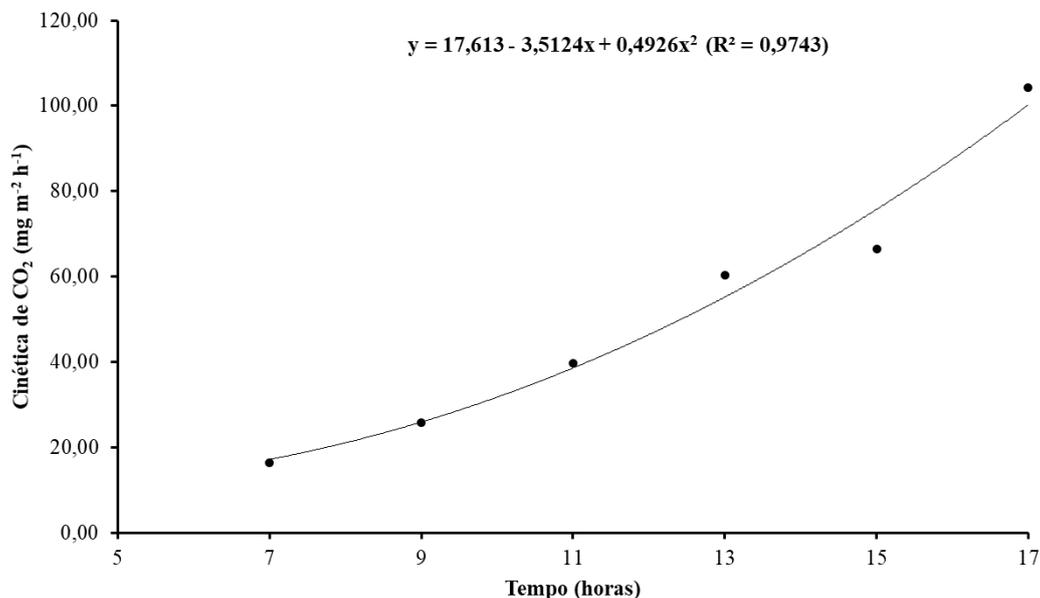
Fonte: Gomes et al. (2021).

Em estudo realizado por Araújo et al. (2011), com cinética de respiração edáfica, em três áreas de caatinga no semiárido da Paraíba, os autores constataram que a liberação de CO₂ tinha variação crescente em função do tempo em horas em todas as áreas avaliadas. Alguns estudos mostraram que a incidência dos raios solares no solo ocorre nas horas mais quentes do dia, o que justifica o aumento na liberação de CO₂ (Costa et al., 2008; Silva, 2010; Araújo et al., 2016). Em um estudo realizado em área de caatinga, Santos et al. (2016) destacam que a temperatura do solo é mais elevada próximo ao final do período de coleta.

Segundo Trevisan et al. (2002) a maioria dos microrganismos do solo se adaptam bem a temperaturas mais elevadas e ambientes úmidos, característica peculiar de regiões de brejo no semiárido nordestino. De acordo com Souto et al. (2009), há indicativo de que os microrganismos aumentam sua atividade entre 40 e 45°C na região semiárida, e quando alcançam valores próximos aos 50°C há inibição da atividade microbiana e, conseqüentemente, menor produção de CO₂. Contudo, de acordo com Paul & Clark (1996), baixas temperaturas também resultam em decréscimos na liberação de CO₂, podendo inibir a atividade microbiana em condições extremas predominante do ambiente. Miranda (2018) ao avaliar a respiração edáfica em diferentes sistemas de uso e ocupação do solo em áreas de brejo no Estado da Paraíba, constatou que a quantidade de CO₂ liberada do solo está intimamente relacionada com os fatores climáticos, a exemplo da umidade e temperatura.

Ao relacionar a cinética de liberação de CO₂ de todos os sistemas com a evolução do tempo em horas, constatou-se que a maior liberação ocorre às 15h36min, com um valor máximo estimado de 11,36 mg m⁻² h⁻¹ de CO₂ (Figura 6).

Figura 6. Cinética de CO₂ (mg m⁻² h⁻¹) em função dos tempos de coleta em áreas de Brejo de Altitude em Bananeiras, Paraíba, Brasil. Valores de P para regressão em função dos tempos de coleta: Linear = <0,0001 e Quadrática = 0,01505.

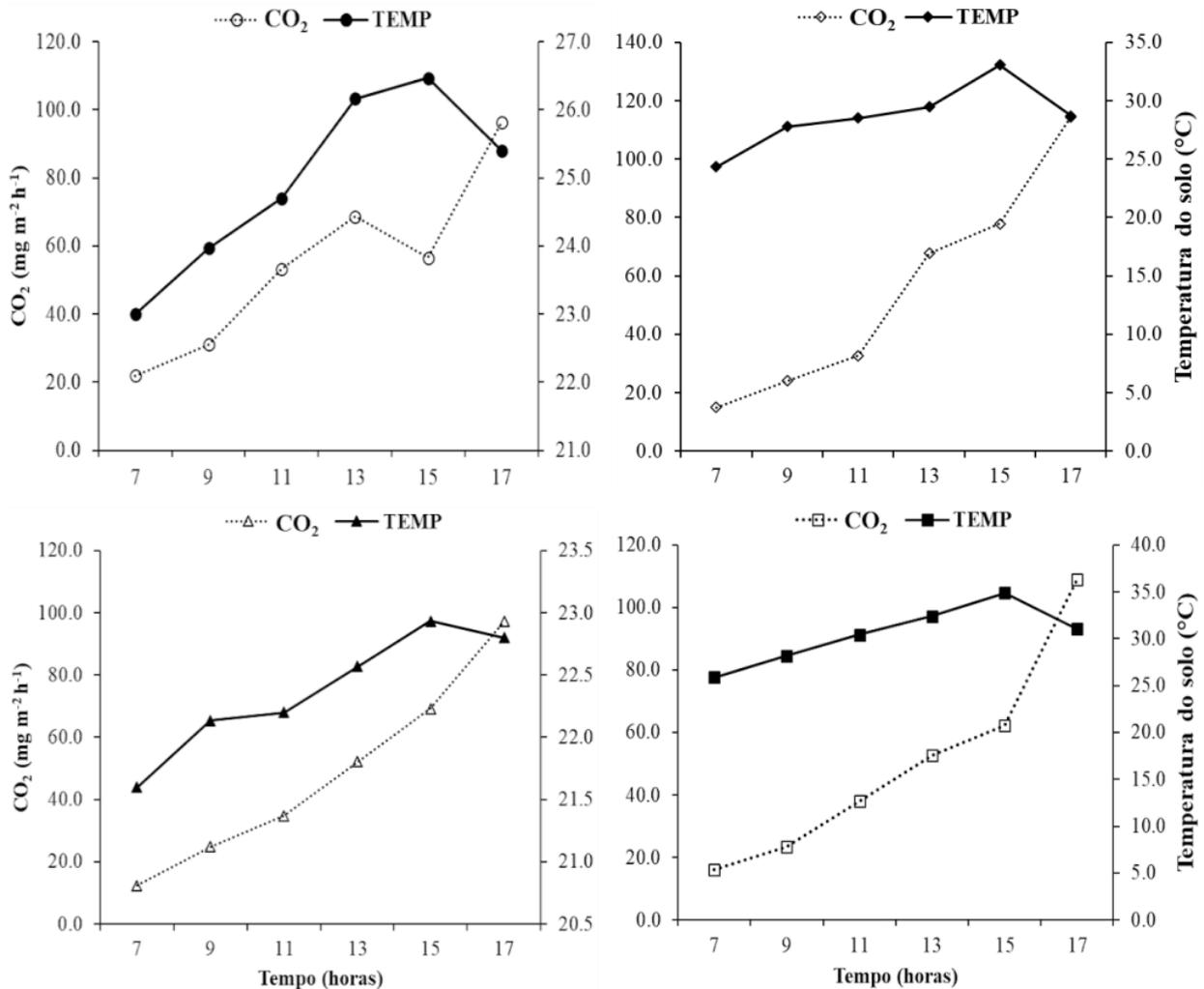


Fonte: Gomes et al. (2021).

Araujo et al. (2016), estudando a atividade microbiana em diferentes ambientes (caatinga nativa, área com presença de murici, área cultivada com palma forrageira e área desmatada) utilizando o método da respirometria no campo, observaram que os diferentes sistemas de manejos influenciam a atividade metabólica dos microrganismos presentes no solo, obedecendo à seguinte sequência: área cultivada > área desmatada > área com murici > área de caatinga. Segundo esses autores, dentre as áreas analisadas a área de Caatinga nativa foi a que liberou menor quantidade de CO₂, sugerindo, portanto que este sistema funciona como um receptor de CO₂ em contraposição a área cultivada que funciona como emissor de CO₂.

De acordo com a Figura 7, o aumento da evolução do CO₂ coincidiu com a evolução do tempo (horas) e aumento da temperatura do solo (°C) nos quatro sistemas de uso do solo. Devido à ausência do componente arbóreo, o solo do sistema agrícola mandala está sujeito a uma maior incidência dos raios solares, diferente do que ocorre nas áreas da floresta e do SAF. Tal condição ambiental sugere que os microrganismos presentes neste sistema estão adaptados a uma temperatura elevada específica, até determinado limite. A floresta, por se tratar de um sistema em que o extrato arbóreo-arbustivo é mais denso, possui um microclima singular, com temperaturas amenas, apresentando, dessa forma, baixa amplitude térmica ao longo do período diurno, quando comparado aos demais sistemas. Esse fato, possivelmente, fez com que a floresta tivesse uma menor atividade microbiana, dentre os sistemas avaliados.

Figura 7. Evolução do CO₂ nos sistemas, SAF (●), Mandala (◆), Floresta (▲) e Pastagem (□) em função do tempo (horas) e da temperatura (°C) do solo em áreas de Brejo de Altitude em Bananeiras, Paraíba, Brasil.



Fonte: Gomes et al. (2021).

De acordo com Araújo et al. (2016), áreas mais antropizadas com ausência de cobertura permite uma maior incidência de raios solares aumentando a mineralização da matéria orgânica e consequentemente maior atividade microbiana e maior liberação de CO₂. Ainda segundo esses autores, a atividade microbiana responsável pela produção de CO₂ é controlada pela temperatura e conteúdo de água no solo e se não houver uma temperatura favorável dentre os limites fisiológicos dos microrganismos edáficos a atividade poderá ser interrompida.

Simon et al. (2019) ao avaliarem a emissão de CO₂ em diferentes sistemas (plantio direto, cultivo mínimo e preparo convencional e área de vegetação nativa) de preparo do solo, constataram que no sistema de preparo convencional do solo houve elevações na emissão de CO₂ e temperatura do solo e que a emissão de CO₂ difere em função dos preparos e dos atributos físicos do solo de cada sistema. De tal modo, Giovanetti et al. (2019), ao quantificarem a respiração microbiana do solo em diferentes sistemas de cultivo (solo desnudo, horta mandala e pomar orgânico), constataram que as práticas de manejo do solo têm relação direta com a respiração edáfica e sugerem a técnica de plantio direto como atenuante à temperatura superficial e benéfica à biota do solo.

O aumento da temperatura do solo contribui com a mineralização da matéria orgânica presente no solo e por consequência eleva a liberação de CO₂ (Araújo et al., 2016). A temperatura, além de ser importante para a atividade

microbiana, também é essencial durante o processo germinativo das sementes, crescimento das raízes e, portanto, está intimamente ligada a evolução de CO₂ (Souto et al., 2009). Contudo, Correia et al. (2015) citam que uma maior liberação de CO₂ pode indicar distúrbio ecológico, uma vez que a atividade microbiana possui forte ligação com a temperatura do solo. Desta forma, pode-se afirmar que a atividade microbiana é uma ferramenta eficaz para avaliar áreas com diferentes níveis de perturbação.

4. Conclusões

A dinâmica da decomposição da fitomassa apresenta taxa de decomposição diferente nos sistemas de uso e manejo do solo.

A fração foliar de *Gliricidia sepium* é rapidamente decomposta no Sistema Agroflorestal, seguido pela floresta e mandala, nessa ordem.

As emissões de CO₂ aumentam à medida que a temperatura do solo se eleva, com tendência à maior liberação no final da tarde.

O sistema mandala emite maior quantidade de CO₂, seguido pelo SAF e floresta, este último com temperatura edáfica baixa.

Os fatores climáticos, como precipitação e temperatura, influenciam na dinâmica de decomposição e na emissão de CO₂ liberado pelos organismos edáficos.

Sugere-se que outros estudos nesta linha de pesquisa sejam incentivados, avaliando outros sistemas de uso e ocupação do solo.

Agradecimentos

Ao Grupo de Pesquisa em Ecologia da Produção Vegetal no Semiárido (ECOVAR – CNPq), ao Centro de Ciências Humanas, Sociais e Agrárias da Universidade Federal da Paraíba (CCHSA/UFPB), ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) e a Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pelo financiamento e pelas bolsas concedidas aos discentes.

Referências

- Alcântara, F. A. (1998). *Adubação verde na recuperação da fertilidade de um solo degradado*. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Lavras, Lavras, Minas Gerais, Brasil. 104p.
- Almeida, M. A. X. (2010). *Fauna edáfica, decomposição foliar e liberação de nutrientes em área de caatinga do Curimataí da Paraíba*, Brasil. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal da Paraíba, Centro de Ciências Agrárias. Areia, Paraíba, Brasil. 136p.
- Alves, A. R., Souto, J. S., Santos, R. V. & Campos, M. C. C. (2006). Decomposição de resíduos vegetais de espécies da Caatinga, na região de Patos, PB. *Revista Brasileira de Ciências Agrárias*, 1(1), 57-63.
- Araújo, K. D., Dantas, R. T., Andrade, A. P. & Parente, H. N. (2011). Cinética de evolução de dióxido de carbono em área de caatinga em São João do Cariri-PB. *Revista Árvore*, 35(5), 1099-1106.
- Araújo, K. D., Souza, M. A., Santos, G. R., Andrade, A. P. & Ferreira Neto, J. V. F. (2016). Atividade microbiana no solo em diferentes ambientes da região semiárida de Alagoas. *Geografia (Londrina)*, 25(2), 5-18.
- Belo, E. S., Terra, F. D., Rotta, L. R., Vilela, L. A., Paulino, H. B., Sousa, E. D., Vilela, L. A. F. & Carneiro, M. A. C. (2012). Decomposição de diferentes resíduos orgânicos e efeito na atividade microbiana em um Latossolo Vermelho de Cerrado. *Global Science and Technology*, 5(3), 107-116.
- Corrêa, E. F. (2005). *Avaliação da decomposição e liberação de nutrientes da fitomassa de Castanha-do-Brasil (Bertholletia excelsa), Cupuaçu (Theobroma grandiflorum) e Gliricídia (Gliricidia sepium) em um sistema agroflorestal no Estado de Roraima*. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal do Amazonas. Manaus, Amazônia, Brasil. 65p.
- Correia, K. G., Araújo Filho, R. N., Menezes, R. S. C., Souto, J. S. & Fernandes, P. D. (2015). Atividade microbiana e matéria orgânica leve em áreas de caatinga de diferentes estágios sucessionais no semiárido paraibano. *Revista Caatinga*, 28(1), 196-202.

- Costa, F. D. S., Bayer, C., Zanatta, J. A. & Mielniczuk, J. (2008). Estoque de carbono orgânico no solo e emissões de dióxido de carbono influenciadas por sistemas de manejo no sul do Brasil. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, 32(1), 323-332.
- Francisco, P. R. M., Medeiros, R. M. & Santos, D. (2018). *Balanço Hídrico Climatológico para a Capacidade de Campo de 100 mm*. EDUFMG, 257p.
- Giovanetti, L. K., Bonome, L., Souza, E., Bittencourt, H., Kruppa, M. & Lizarelli H. (2019). Respiração microbiana do solo em diferentes sistemas de cultivo. *Cadernos de Agroecologia*, 14(1), 1-3.
- Grisi, B. M. (1978). Método químico de medição de respiração edáfica: alguns aspectos técnicos. *Ciência e Cultura*, 30, 82-88.
- Miranda, A. A. C. (2018). *Relação entre indicadores de qualidade de solo sob diferentes sistemas de manejo. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal da Paraíba, Centro de Ciências Humanas, Sociais e Agrárias*. Brasil. 68p.
- Morita, T., & Assumpção, R. M. V. (2001). Manual de soluções, Reagentes & Solventes: Padronização, Preparação, Purificação. (11a ed.), Edgard Blücher.
- Olson, J. S. (1963). Energy storage and the balance of producers and decomposers in ecological systems. *Ecology*, 44(2), 322-331.
- Paula, P. D., Campello, E. F. C., Guerra, J. G. M., Santos, G. A. & Resende, A. S. (2015). Decomposição das podas das leguminosas arbóreas *Gliricidia sepium* e *Acacia angustissima* em um sistema agroflorestal. *Ciência Florestal*, 25(3), 791-80.
- Paul, E. A. & Clark, F. E. (1989). *Soil microbiology and biochemistry*. Academic Press, 275p.
- Paul, E. A. & Clark, F. E. (1996). *Soil microbiology and biochemistry*. Academic Press, 340p.
- Pereira, A. S., et al. (2018). Metodologia da pesquisa científica. [e-book]. Santa Maria: UAB/NTE/UFSM. https://www.ufsm.br/app/uploads/sites/358/2019/02/Metodologia-da-Pesquisa-Cientifica_final.pdf.
- Pinheiro, S. (2015). Saúde do Solo: Biopoder camponês versus agronegócio. *Salles Editora*, 224p.
- R Core Team. (2017). The R Project for Statistical Computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. <https://www.R-project.org/>
- Santos, G. R., Santos, E. M. C., Lira, E. S., Gomes, D. L. & Araujo, K. D. (2016). Respiração microbiana do solo relacionada ao conteúdo de água no solo e a temperatura do solo, na época do Equinócio de primavera, em Olho D'Água do Casado, Semiárido de Alagoas. *Revista de Geociências do Nordeste*, 2, 885-893.
- Silva, G. F., Santos, D., Silva, A. P. & Souza, J. M. (2015). Indicadores de qualidade do solo sob diferentes sistemas de uso na mesorregião do agreste paraibano. *Revista Caatinga*, 28, (3), 25-35. 10.1590/1983-21252015v28n303rc
- Silva, H. F., Barreto, P. A. B., Sousa, G. T. O., Azevedo, G. B., Gama-Rodrigues, E. F. & Oliveira, F. G. R. B. (2014). Decomposição de serapilheira foliar em três sistemas florestais no Sudoeste da Bahia. *Revista Brasileira de Biociências*, 12 (3), 164-172.
- Silva, R. B. (2010). Respiração edáfica como indicativo da qualidade do solo em três agrossistemas. *Enciclopédia Biosfera*, 6 (11), 1-15.
- Simon, C. P., Vitória, E. L., Lacerda, E. G., Avancini, Y. S., Rodrigues, T. F. & Simon, C. A. (2019). Emissão de CO₂, atributos físicos e carbono orgânico total em diferentes sistemas de preparo do solo. *Nativa, Sinop*, 7 (5), 94-99. 10.31413/nativa.v7i5.6273
- Souto, P. C., Bakke, I. A., Souto, J. S. & Oliveira, V. M. (2009). Cinética da respiração edáfica em dois ambientes distintos no semi-árido da Paraíba, Brasil. *Revista Caatinga*, 22 (3), 52-58.
- Souto, P. C., Souto, J. S., Santos, R. V., Bakke, I. A., Sales, F. C. V. & Souza, B. V. (2013). Taxa de decomposição da serapilheira e atividade microbiana em área de caatinga. *Cerne*, 19 (4), 559-565.
- Trevisan, R., Mattos, M. L. T. & Herter, F. G. (2002). Atividade microbiana em argissolo vermelho amarelo distrófico típico coberto com aveia preta (*Avena* sp.) no outono, em um pomar de pessegueiro. *Científica Rural*, 7 (2), 83-89.
- Thomas, R. J. & Asakawa, N. M. (1993). Decomposition of leaf litter from tropical forage grasses and legumes. *Soil Biology and Biochemistry*, 25 (10), 1351-1361.
- Wider, R. K. & Lang, G. E. (1982). A critique of the analytical methods used in examining decomposition data obtained from litter bags. *Ecology*, 63 (6), 1636-1642.