

Balço do dióxido de carbono equivalente em lavouras cafeeiras

Equivalent carbon dioxide balance in coffee crops

Balance de dióxido de carbono equivalente en plantaciones de café

Recebido: 05/05/2022 | Revisado: 14/05/2022 | Aceito: 17/05/2022 | Publicado: 22/05/2022

Geraldo Gomes de Oliveira Junior

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7297-4400>
Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Sul de Minas Gerais, Brasil
E-mail: geraldo.junior@muz.ifsuldeminas.edu.br

Viviane da Silva Ribeiro

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7845-3649>
Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Sul de Minas Gerais, Brasil
E-mail: viviane.ribeiros@hotmail.com

Lucas Eduardo de Oliveira Aparecido

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4561-6760>
Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Sul de Minas Gerais, Brasil
E-mail: lucas.aparecido@muz.ifsuldeminas.edu.br

Felipe Campos Figueiredo

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2041-713X>
Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Sul de Minas Gerais, Brasil
E-mail: felipe.figueiredo@muz.ifsuldeminas.edu.br

Raphael Nogueira Rezende

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1230-1188>
Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Sul de Minas Gerais, Brasil
E-mail: raphael.rezende@ifsuldeminas.edu.br

Ana Paula da Silva Rezende

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7900-9694>
Exportadora de Café Guaxupé LTDA, Brasil
E-mail: ana.rezende@guaxupe.com.br

João Paulo Custódio de Brito

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2465-8109>
Exportadora de Café Guaxupé LTDA, Brasil
E-mail: joao.brito@guaxupe.com.br

Resumo

Objetivou-se no presente estudo realizar o balanço do carbono equivalente em lavouras cafeeiras ocupadas por duas diferentes cultivares. O estudo foi conduzido no ano de 2021, em propriedade agrícola localizada dentro dos municípios de Guaxupé - MG e Tapiratiba - SP, Brasil. Foram avaliadas duas glebas (A e B), plantadas no ano de 2018 com espaçamento 3,5 x 0,7 m. A gleba A ocupada com a cultivar Acaia IAC 474-19 e a gleba B cultivar Catuaí IAC - 99. A estimativa de emissões foi calculada utilizando-se das metodologias *GHG Protocol*, Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovação e *Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC)*. O carbono presente na biomassa foi quantificado a partir do abate das plantas, determinação da umidade (%), teor de carbono (C) e estimativa do dióxido de carbono equivalente (CO₂ eq). O balanço do carbono equivalente por hectare (CO₂ eq ha⁻¹) foi obtido pela diferença entre o carbono sequestrado e as emissões estimadas. Os resultados demonstraram que o sequestro de carbono equivalente na biomassa do cafeeiro em 3,5 anos foi de aproximadamente 3,6 vezes maior que as emissões. A remoção de CO₂ eq aos 3,5 anos foi estimada em 15,15 e 24,92 Mg CO₂ eq ha⁻¹ para a cultivar Catuaí IAC-99 e Acaia IAC 474-19 respectivamente. As emissões ao longo do período avaliado foram de 5,05 e 5,77 Mg CO₂ eq ha⁻¹ para as glebas cultivadas com Catuaí IAC-99 e Acaia IAC 474-19, portanto o sistema de produção avaliado aos 3,5 anos pode ser considerado carbono neutro.

Palavras-chave: Cafeicultura; Gases de efeito estufa; Sequestro de carbono.

Abstract

We sought to perform the carbon equivalent balance in coffee plantations occupied with two cultivars. The study was conducted in 2021, on an agricultural property located within the municipalities of Guaxupé - MG and Tapiratiba - SP, Brazil. We evaluated two plots (A and B), planted in 2018 with a spacing of 3.5 x 0.7 m. The plot "A" occupied with the cultivar Acaia IAC 474-19 and the plot "B" with the cultivar Catuaí IAC-99. The emission estimate was calculated using the *GHG Protocol*, Ministry of Science, Technology and Innovation and *Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC)*. The carbon present in the biomass was quantified from the slaughter of the plants, determination of moisture (%), carbon content (C) and estimation of carbon dioxide equivalent (CO₂ eq). The carbon equivalent balance per hectare (CO₂ eq ha⁻¹) was obtained by the difference between the sequestered carbon and the

estimated emissions. The results showed that the equivalent carbon sequestration in the coffee biomass in 3.5 years was approximately 3.6 times greater than the emissions. The removal of CO₂ eq at 3.5 years was estimated at 15.15 and 24.92 Mg CO₂ eq ha⁻¹ for the cultivars Catuai IAC-99 and Acaia IAC 474-19, respectively. Emissions over the evaluated period were 5.05 and 5.77 Mg CO₂ eq ha⁻¹ for plots cultivated with Catuaí IAC-99 and Acaia IAC 474-19. Therefore, the production system evaluated at 3.5 years can be considered carbon neutral.

Keywords: Coffee cultivation; Greenhouse gases; Carbon sequestering.

Resumen

Se propuso en el presente estudio realizar el balance de carbono equivalente en plantaciones de café ocupadas por dos cultivares diferentes. El estudio fue realizado en el año de 2021 en una finca ubicada dentro de la municipalidad de Guaxupé - MG y Tapiratiba – SP, Brasil. Fueron evaluadas dos partes de tierra (A e B), plantadas en el año de 2018 con espaciamento 3,5 x 0,7 m. La parte A ocupada con el cultivar Acaia IAC 474-19 y la parte B con el cultivar Catuaí IAC – 99. La estimación de emisiones se calculó utilizando las metodologías GHC Protocol, Ministério de Ciencia, Tecnología y Innovación y Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). Se cuantificó el carbono presente en la biomasa a partir del corte de las plantas, determinación de la humedad, % contenido de carbono (C) y estimación del dióxido de carbono equivalente (CO₂ eq). El balance de carbono por hectárea (CO₂ eq ha⁻¹) se obtuvo por la diferencia entre el carbono secuestrado y las emisiones estimadas. Los resultados demostraron que el secuestro de carbono equivalente en la biomasa de las plantaciones de café en 3,5 años fue aproximadamente 3.6 veces mayor que en las emisiones. A los 3,5 años se estimó la eliminación de CO₂ eq en 15,15 y 24,92 Mg CO₂ eq ha⁻¹ para el cultivar Catuaí IAC - 99 y Acaia IAC 474-19 respectivamente. A lo largo del período de evaluación, las emisiones fueron de 5,05 y 5,77 Mg CO₂ eq ha⁻¹ para las partes de tierra cultivadas con Catuaí IAC - 99 y Acaia IAC 474-19, por lo tanto el sistema de producción evaluado a los 3,5 años puede ser considerado carbono neutro.

Palabras clave: Cultivo del café; Gases del efecto invernadero; Secuestro de carbono.

1. Introdução

Os cenários projetados de possíveis mudanças no clima do planeta apontam para a ocorrência de eventos extremos, aumento da temperatura média global, desequilíbrio de estações climáticas, comprometimento da disponibilidade de recursos naturais (Abreu et al., 2015) com potencial influência socioeconômica na agricultura, economia e na vida da população (Santos et al., 2022; IPCC, 2014). A comunidade científica tem apontado que estas ocorrências estão relacionadas ao aumento das emissões de Gases de Efeito Estufa (GEE) na atmosfera, especialmente vinculadas à intensificação das atividades antrópicas.

No Brasil, estima-se que a agricultura contribui com aproximadamente 75% das emissões de CO₂, 91% das emissões de CH₄ e 94% das emissões de N₂O, considerando também a conversão de áreas florestais para uso agrícola (Bayer et al., 2011). Vale ressaltar, no entanto, que as atividades agrícolas podem desempenhar um papel central na redução das emissões de GEE e nos impactos de mudanças do clima, especialmente pela sua capacidade de remoção e fixação de carbono.

Neste mesmo sentido, Vasconcelos et al. (2018) apontaram que atividades e práticas agrícolas, podem ser fonte ou dreno dos GEE, uma vez que, a utilização de boas práticas mitiga a emissão destes gases e contribuem para a manutenção dos serviços ambientais e sustentabilidade dos sistemas produtivos.

A cafeicultura destaca-se por ser uma das principais culturas agrícolas brasileiras e assim sendo, possui elevada importância no cenário nacional e internacional (Reichman, 2018; CONAB, 2020). No entanto, durante os processos produtivos, atividades relacionadas aos tratamentos culturais do cafeeiro também podem contribuir para a emissão de gases de efeito estufa (Belizario, 2013; Oliveira Junior et al., 2015). Em estudo de caso conduzido por Oliveira Junior et al. (2015) sobre emissões de GEE na cafeicultura no sul de Minas Gerais, foi estimada uma emissão anual de cerca de 2,13 Mg CO₂ eq ha⁻¹.

No Brasil, estudos acadêmicos têm sido realizados procurando compreender as fontes e representatividade das emissões de GEE decorrentes de atividades relacionadas a cafeicultura como aqueles conduzidos por Belizário (2013); Oliveira Junior et al. (2015); Anderson et al. (2021); Reis et al. (2021). Estes estudos vêm ao encontro da preocupação com os cenários projetados de mudanças no clima do planeta, bem como à crescente exigência dos mercados internacionais em busca de uma cadeia produtiva de baixo carbono e mais sustentável.

Se por um lado o cafeeiro contribui para as emissões de GEE, por outro suas plantas podem atuar efetivamente na remoção e conseqüente fixação do carbono atmosférico nos compartimentos vegetativos, por utilizar-se da sua capacidade fotossintética. Entretanto, são escassos os trabalhos que determinem o estoque de carbono nas estruturas vegetativas do cafeeiro. Silva et al. (2013) destacam, que as plantas de cafeeiros por serem de ciclo longo podem armazenar carbono por muitos anos, o que reduz o tempo de retorno deste carbono estocado para a atmosfera. A maioria dos estudos de estoque de carbono no Brasil estão relacionados à espécies florestais, como exemplo, os trabalhos realizados por Araújo et al. (2021); Brianezi et al. (2019); Souza et al. (2019); Gatto et al. (2011).

Ressalta-se que a quantificação do sequestro do carbono equivalente por plantas de café e o cálculo das respectivas estimativas de emissão por unidade de área, possibilitam a realização do balanço do CO₂ eq. Desta forma é possível verificar se os sistemas de produção adotados podem ser considerados carbono neutro. O carbono equivalente é uma métrica em que se converte as emissões de GEE em CO₂ eq por meio do potencial de aquecimento global de cada gás, bem como realiza-se a conversão do carbono sequestrado em CO₂ eq pelo ajuste da massa molecular do CO₂ e C.

Sendo assim, o presente estudo objetivou realizar o balanço do carbono equivalente em lavouras cafeeiras ocupadas por duas diferentes cultivares

2. Metodologia

2.1 Área de estudo

O estudo foi conduzido no ano de 2021, na Fazenda São José localizada dentro dos municípios de Guaxupé - MG e Tapiratiba - SP, no Brasil. O clima da região segundo Köppen (1918): Temperado úmido com inverno seco e verão moderadamente quente "Cwb".

Utilizou-se como método de pesquisa o estudo de caso. Segundo Severino (2007), o estudo de caso visa adquirir conhecimento a cerca de uma realidade particular e representativa, devendo os dados serem coletados, compilados e analisados com rigor. No estudo em questão, determinou-se o balanço do carbono em duas lavouras cafeeiras ocupadas por duas cultivares de mesma idade, plantadas na Fazenda São José. Trata-se de uma pesquisa quantitativa com coleta de dados em campo, alinhados aos estudos já realizados por Coltri et al. (2011), Silva et al. (2013), e Oliveira Junior et al. (2015). Sampieri, Callada & Lucio (2013) apontam que a coleta de dados com enfoque quantitativo utiliza-se de instrumentos já adotados e validados em estudos anteriores, ou a proposição de novos instrumentos apoiados na literatura científica, devendo neste caso serem testados e ajustados.

Inicialmente foram selecionadas duas glebas A e B, ocupadas com as cultivares Acaia IAC 474 - 19 e Catuaí Vermelho IAC - 99 sob coordenadas geográficas: Lat: 21°24'32.28"S e Long: 46°42'54.14" W e Lat: 21°26'5.84"S e Long: 46°44'42.43" W. As duas glebas foram plantadas no início do ano de 2018, com espaçamento 3,5 x 0,7 m e estande de 4.082 plantas ha⁻¹. A gleba A possui altitude média de 830 m, altura média das plantas 2,21 ± 0,07 e a gleba B altitude 980 m, e altura média 1,40 ± 0,13.

2.2 Estimativa do Sequestro de CO₂ eq ha⁻¹

Para cada uma das 2 (duas) glebas (A e B) foram selecionadas aleatoriamente 6 (seis) plantas-amostras. Estas plantas foram abatidas (método destrutivo), sendo posteriormente separadas em compartimentos vegetativos distintos (ramo ortotrópico, plagiotrópicos, folhas e raízes). Logo em seguida, determinou-se a massa úmida total (Kg) de cada compartimento, por meio da pesagem em balança digital. Foram retiradas amostras representativas de aproximadamente 300g de cada compartimento e realizada a secagem em estufa, com circulação forçada, a 105 ° C até peso constante e quantificação do percentual (%) de umidade respectivo.

As amostras secas foram moídas e peneiradas em malha 100 mesh (0,150mm), sendo o percentual (%) de carbono determinado pelo método de combustão via seca, utilizando-se analisador elementar da marca LECO®. Com o resultado obtido (% C) foi estimado o sequestro C eq ha⁻¹ para cada cultivar (Acaia IAC 474-19 e Catuaí IAC - 99) aos 3,5 anos, considerando-se a densidade populacional (plantas ha⁻¹). A conversão do estoque de carbono (C) em dióxido de carbono equivalente por hectare (CO₂ eq) foi efetuada pela razão entre o ajuste de massa molecular do (CO₂) de 44 e a massa do carbono (C) igual a 12.

O incremento médio anual (IMA) para cada uma das cultivares, foi obtido pela divisão do sequestro estimado em Mg CO₂ eq ha⁻¹ pela idade das plantas (3,5 anos).

2.3 Estimativa da emissão de CO₂ eq ha⁻¹

A estimativa da emissão de Gases de Efeito Estufa (GEE) em Mg CO₂ eq ha⁻¹ foi realizada a partir do levantamento do consumo fertilizante nitrogenado (kg), corretivo (kg), óleo diesel (L), gasolina (L) e energia elétrica (MWh) utilizados para a realização dos tratos culturais e atividades nas duas glebas A e B do plantio ao ano agrícola 2020/2021.

Para os fertilizantes nitrogenados a estimativa de emissão foi obtida pela conversão dos Kg de N em N₂O, fator de emissão de 0,01 e razão de peso molecular 44/28 conforme recomendado pelo IPCC. Em seguida, foi convertido em CO₂ eq pela multiplicação do potencial de aquecimento global (PAG) do N₂O de 298. Em relação ao uso de corretivo, a estimativa foi calculada usando o fator de 0,13 sendo encontrada a emissão de CO₂ eq multiplicando-se os valores obtidos por 3,67 (GHG PROTOCOL AGRICULTURA, 2014).

O cálculo das emissões de GEE pelo uso dos combustíveis fosseis ocorreu a partir do fracionamento do biodiesel - presente no diesel e álcool anídrico - presente na gasolina, ao longo dos anos agrícolas plantio/2019, 2019/2020 e 2020/2021. Em seguida a quantidade de diesel, biodiesel, gasolina e álcool anídrico foi multiplicada pelos fatores de emissão específicos de CO₂, CH₄ e N₂O (Tabela 1) e foi convertido para CO₂ eq pelo emprego do potencial de aquecimento global (PAG) 1, 25 e 298 respectivamente.

Tabela 1: Parâmetros de referência para o cálculo das emissões de gases de efeito estufa.

Combustível	Fatores de cálculo			Fonte
	CO ₂	CH ₄	N ₂ O	
Diesel	2,6810	0,00030	0,000020	GHG Protocol Agricultura (2014)
Biodiesel	2,4990	-	-	GHG Protocol Agricultura (2014)
Gasolina	2,2120	0,00080	0,000026	GHG Protocol (2021)*
Álcool anídrico	1,5260	0,00020	0,000010	GHG Protocol (2021)*

*Tabela de conversão GHG Protocol (Ferramenta de Cálculo). Fonte: Adaptado GHG Protocol Agricultura (2014) e Ferramenta GHG Protocol (2021).

A estimativa das emissões indiretas do CO₂ eq foi realizada pela multiplicação do consumo de energia elétrica por hectare (MWh), pelo fator de emissão informado pelo Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovações (Mg CO₂ MWh⁻¹) referente a cada período (Brasil, 2021).

2.4 Balanço do CO₂ eq ha⁻¹

O balanço do carbono equivalente foi calculado pela diferença entre o sequestro em Mg CO₂ eq ha⁻¹ para cada uma das cultivares (Acaia IAC 474-19 e Catuaí IAC 99) e as estimativas de emissões (Mg CO₂ eq ha⁻¹) ao longo do período 2018 a 2021.

Os resultados do percentual (%) de umidade e teor de carbono dos compartimentos vegetativos foram submetidos à análise de variância, por meio do teste F. Nos casos em que o valor do teste F foi significativo, foram realizados testes de comparação de médias de Tukey, ao nível de 5% de significância de erro, empregando-se o software estatístico computacional “Sisvar” de Ferreira (2011).

3. Resultados e Discussão

3.1 Sequestro de carbono (C) e CO₂ eq

Houve interação significativa entre os fatores, compartimentos vegetativos e as cultivares para o percentual de umidade (F=0,0102; P<0,05). As maiores médias foram determinadas nas folhas das plantas de café, tanto para a cultivar Acaia IAC 474-19 (64,53 % ± 2,31) quanto para Catuaí IAC-99 (59,17 % ± 1,67) (Tabela 2). O ramo ortotrópico foi o compartimento vegetativo que apresentou os menores percentuais de umidade para as duas cultivares (Acaia 37,22%; Catuaí 37,69%) (Tabela 2).

Tabela 2: Valores médios de umidade (%) (± desvio padrão) nos compartimentos vegetativos de plantas de cafeeiro das cultivares Catuaí IAC-99 e Acaia IAC 474-19.

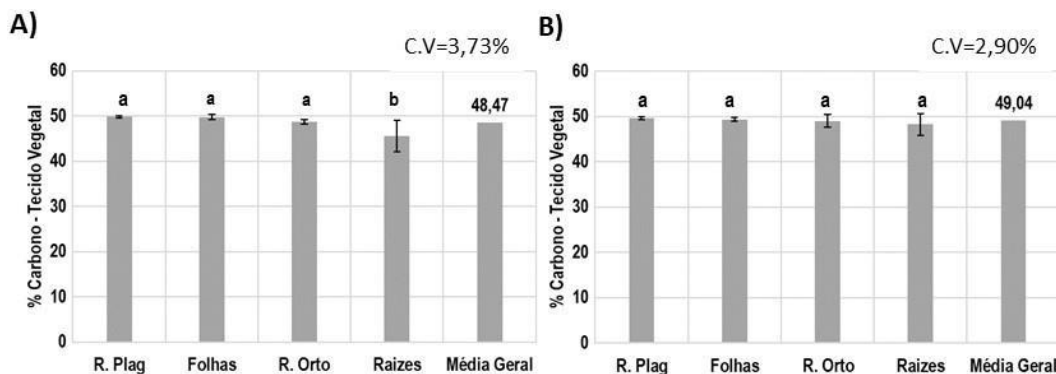
Compartimento Vegetativo (CV)*	Umidade (%) ± s	
	Catuaí IAC 99	Acaia IAC 474-19
Folhas	59,17 ± 1,67 aB	64,53 ± 2,31 aA
Ramo ortotrópico	37,69 ± 1,06 bA	37,22 ± 2,94 bA
Ramos plagiotrópicos	48,35 ± 2,16 cB	52,01 ± 4,11 cA
Raízes	44,73 ± 4,34 cA	42,62 ± 3,09 dA
Interação: CV* x Cultivar	0,0102	
C.V (%) ⁽¹⁾	6,03	

*Compartimento vegetativo; ⁽¹⁾ Coeficiente de variação em porcentagem; médias com a mesma letra minúscula nas colunas e maiúscula nas linhas não diferem entre si pelo teste de Tukey ao nível de 5% de significância. Fonte: Autores (2022).

Silva et al. (2013) ao realizar estudo sobre estoque de carbono no solo e em plantas de café encontraram percentuais de umidade de 64,81% nas folhas e 46,06% no ramo ortotrópico. Os resultados reportados pelos autores reforçam a presença de maior quantidade de água nas folhas das plantas de café, em relação aos outros compartimentos. Coltri et al. (2011) também evidenciaram que entre 44 e 64% da biomassa úmida do café arábica plantado a pleno sol é composta de água. Ressalta-se que a determinação do percentual de umidade nos compartimentos vegetativos é necessária para que se possa quantificar a biomassa seca e o respectivo sequestro de carbono (C).

Em relação ao percentual de carbono, não houve interação significativa entre os compartimentos vegetativos e as cultivares (F=0,0980; P>0,05). As análises laboratoriais mostraram que em média 48,47 % da biomassa seca das plantas de Catuaí IAC 99 (Figura 1A) e 49,04% das plantas de Acaia IAC 474-19 são constituídas de carbono (Figura 1B). Resultados semelhantes, foram mencionados por Coltri et al. (2011) que encontraram percentual de carbono entre 49 e 50% na biomassa seca de plantas de café.

Figura 1: Percentual (%) de carbono na biomassa seca dos tecidos vegetativos de plantas de cafeeiro. Catuaí (A); M.N Acaia (B).



* C.V=Coeficiente de variação; **R.Plag**=Ramo Plagiotrópico; **R. Orto** = Ramo Ortotrópico. Médias seguidas de mesmas letras minúsculas entre as barras não diferem entre si pelo teste de Tukey ao nível de 5% de significância. Fonte: Autores (2022).

O sequestro total de carbono (C) estimado aos 3,5 anos foi de 4,13 e 6,79 Mg de C ha⁻¹ para as cultivares Catuaí IAC - 99 e Acaia 474-19, respectivamente. Sendo assim, a remoção em CO₂ equivalente foi de 15,15 Mg CO₂ eq ha⁻¹ para Catuaí IAC - 99 e 24,92 Mg CO₂ eq ha⁻¹ para Acaia IAC 474-19 (Tabela 3). Silva et al. (2013) determinaram em seus estudos estoque de carbono de 33,77 Mg CO₂ eq ha⁻¹ em uma lavoura de Catuaí. A diferença nos valores encontrados pelos autores e os obtidos no presente estudo podem estar relacionadas ao estágio de desenvolvimento das plantas.

Tabela 3: Sequestro de carbono (C) e CO₂ eq em lavouras de Catuaí IAC-99 e Acaia IAC 474-19 de 3,5 anos (Mg CO₂ eq ha⁻¹) e Incremento Médio Anual (Mg CO₂ eq ha⁻¹ ano⁻¹).

Compartimento Vegetativo	Carbono		Carbono Equivalente		IMA ⁽¹⁾	
	Catuaí ⁽²⁾	Acaia ⁽³⁾	Catuaí ⁽²⁾	Acaia ⁽³⁾	Catuaí ⁽²⁾	Acaia ⁽³⁾
	Mg C ha ⁻¹		Mg CO ₂ eq ha ⁻¹		Mg CO ₂ eq ha ¹ ano ⁻¹	
Folhas	1,13	0,92	4,15	3,38	1,18	0,96
R. ortotrópico*	1,09	2,93	4,00	10,75	1,14	3,07
R. plagiotrópico**	1,19	1,80	4,36	6,61	1,24	1,88
Raízes	0,72	1,14	2,64	4,18	0,75	1,19
Total	4,13	6,79	15,15	24,92	4,31	7,10

*Ramos ortotrópicos; **Ramos plagiotrópicos; ⁽¹⁾ Incremento médio anual; ⁽²⁾ Catuaí Vermelho IAC - 99; ⁽³⁾ Acaia IAC 474-19. Fonte: Autores (2022).

Os resultados do presente estudo evidenciaram que as plantas da cultivar Acaia IAC 474-19 sequestraram maior quantidade de carbono por unidade de área (ha) em relação as de Catuaí IAC-99 de mesma idade. Esta constatação pode ser explicada por características individuais e porte de cada cultivar. As plantas de Acaia, no momento do estudo, apresentaram altura média de 2,21m ± 0,07, enquanto que as plantas de Catuaí 1,40m ± 0,13. A maior quantidade CO₂ eq estocado foi estimada no ramo ortotrópico das plantas de Acaia IAC 474-19 com 10,75 Mg CO₂ eq ha⁻¹, com incremento de 6,75 Mg CO₂ eq ha⁻¹ superior a cultivar Catuaí IAC - 99. Reitera-se que os ramos ortotrópicos foram os compartimentos vegetativos com menor % de umidade para as duas cultivares 37,22 e 37,69 % (Tabela 2). Desta forma, o estudo sugere que cultivares de maior porte e diâmetro de tronco podem sequestrar e estocar maior quantidade de matéria seca e consequentemente carbono equivalente.

O incremento médio anual (IMA) de carbono equivalente foi de 4,31 Mg CO₂ eq ha⁻¹ ano⁻¹ para Catuaí IAC 99 e 7,10 Mg CO₂ eq ha⁻¹ ano⁻¹ para Acaia IAC 474-19. Em estudos realizados sobre o balanço de carbono em monocultivo de Eucalipto, com diferentes arranjos espaciais aos 32 meses, os autores reportaram um incremento médio anual (IMA) de 25,39 ± 6,68 Mg CO₂ eq ha⁻¹ ano (Brianezi et al., 2019). Assim, os incrementos médios anuais obtidos no presente estudo apontam que a cultivar Catuaí sequestrou o equivalente a 16,97% e a de Acaia 27,96 % dos resultados médios obtidos na cultura do Eucalipto.

3.2 Estimativa de emissão CO₂ eq ha⁻¹

A estimativa de emissão total de GEE do ano de plantio 2018 a 2021 foi de 5,04 e 5,77 Mg CO₂ eq ha⁻¹ nas glebas de Catuaí IAC-99 e Acaia IAC 474-19 respectivamente (Tabela 4). A média anual foi de 1,44 Mg CO₂ eq ha⁻¹ na área cultivada com Catuaí e 1,65 Mg CO₂ eq ha⁻¹ na gleba de Acaia. Portanto, ao considerar que são adotadas práticas de manejo similares nas duas glebas do estudo, não foram evidenciadas diferenças expressivas entre as emissões totais e médias anuais. Pode-se constatar que o uso dos fertilizantes nitrogenados foi a principal fonte de emissão, seguido pelo consumo de combustíveis, nas duas glebas avaliadas (Tabela 4).

Em estudo realizado sobre o levantamento de emissão de gases de efeito estufa pela metodologia do carbono equivalente na cultura do cafeeiro, foi determinada uma estimativa de 2,13 Mg CO₂ eq ha⁻¹, sendo que os fertilizantes nitrogenados também se apresentaram como a principal fonte de emissão anual com cerca de 1,01 Mg CO₂ eq ha⁻¹, representando 47,5 % do total das emissões (Oliveira Junior et al., 2015).

Tabela 4: Estimativa da emissão de CO₂ equivalente (Mg ha⁻¹) talhões de Catuaí IAC 99 e Acaia IAC 474-19. Anos agrícolas: do plantio a 2020/2021 - 3,5 anos.

Fonte	Emissão de GEE*			Média Anual	Total Geral	Fr ⁽¹⁾ (%)
	Plantio/2019 ⁽²⁾	2019/2020	2020/2021			
	Mg CO ₂ eq ha ⁻¹			Mg CO ₂ eq ha ⁻¹		
Catuaí IAC-99	-	-	-	-	-	-
Fert. Nitrogenado	0,24	1,71	1,56	1,00	3,51	69,64
Corretivos	-	0,63	-	0,18	0,63	12,50
Combustíveis	0,26	0,39	0,20	0,24	0,85	16,86
Energia Elétrica	-	0,02	0,03	0,01	0,05	0,99
Total	0,50	2,75	1,79	1,44	5,04	-
Acaia IAC 474-19	-	-	-	-	-	-
Fert. Nitrogenado	0,59	2,48	1,33	1,25	4,39	76,08
Corretivos	0,26	-	-	0,07	0,26	4,50
Combustíveis	0,29	0,45	0,32	0,30	1,06	18,37
Energia Elétrica	0,01	0,02	0,02	0,01	0,05	0,86
Total	1,15	2,95	1,67	1,65	5,77	-

*Gases de Efeito Estufa em dióxido de carbono equivalente - CO₂ eq. ⁽¹⁾ Frequência relativa percentual. ⁽²⁾ Do plantio no início de 2018 a 2019. Fonte: Autores (2022).

3.3 Balanço do CO₂ eq ha⁻¹

O balanço do carbono demonstrou que as lavouras de café aos 3,5 anos sequestraram mais CO₂ eq ha⁻¹ do que emitiram (Tabela 5). O sequestro de CO₂ eq ha⁻¹ na biomassa das plantas de café foi de 3,0 e 4,3 vezes maior que as emissões nas glebas do estudo (Tabela 5). O saldo referente ao sequestro na área cultivada com Catuaí foi de 10,11 Mg CO₂ eq ha⁻¹ e na área de Acaia 19,15 Mg CO₂ eq ha⁻¹. Desta forma, o balanço médio anual apontou um saldo de 2,88 e 5,47 Mg CO₂ eq ha⁻¹ ano⁻¹ nas áreas cultivadas com Catuaí IAC-99 e Acaia IAC 474-19, respectivamente (Tabela 5).

Tabela 5: Balanço do CO₂ equivalente (Mg ha⁻¹) talhões de Catuaí IAC-99 e Acaia IAC-474-19 aos 3,5 anos.

Cultivar	Sequestro Mg CO ₂ eq ha ⁻¹	Estimativa (GEE) Mg CO ₂ eq ha ⁻¹	Saldo Mg CO ₂ eq ha ⁻¹
Balanço - 3,5 anos	-	-	-
Catuaí IAC-99	15,15*	5,04	10,11
Acaia IAC-474-19	24,92*	5,77	19,15
Balanço – anual	-	-	-
Catuaí IAC-99	4,32 ⁽¹⁾	1,44 ⁽¹⁾	2,88 ⁽¹⁾
Acaia IAC-474-19	7,12 ⁽¹⁾	1,65 ⁽¹⁾	5,47 ⁽¹⁾

*Valores aos 3,5 anos de idade; ⁽¹⁾ Média anual. Fonte: Autores (2022).

Logo, os resultados encontrados indicam que o sistema de produção da cafeicultura aos 3,5 anos, pode ser considerado carbono neutro. Ao dividirmos o saldo do sequestro do CO₂ eq da biomassa aos 3,5 anos (Tabela 5) pela emissão média anual 1,44 e 1,65 Mg CO₂ eq ha⁻¹ pode-se inferir que os valores encontrados são suficientes, para garantir esta neutralidade por um horizonte de tempo de mais 7 e 11 anos, sem considerar outros incrementos do carbono que ocorrerão durante o desenvolvimento das plantas, inclusive imobilizado no solo.

Desta forma, as lavouras cafeeiras podem contribuir de forma efetiva para a remoção de gases de efeito estufa na atmosfera.

4. Conclusão

Nas condições em que este estudo realizou-se, conclui-se que o sequestro do carbono equivalente nas lavouras avaliadas aos 3,5 anos de idade, foi de aproximadamente 3,6 vezes maior que as emissões.

A cultivar Acaia IAC 474-19 sequestrou mais CO₂ eq ha⁻¹ em relação as plantas de Catuaí Vermelho IAC - 99 de mesma idade, com maior representatividade para o ramo ortotrópico.

O sistema de produção avaliado aos 3,5 anos pode ser considerado “carbono zero”, uma vez que removeu mais CO₂ eq do que emitiu.

Sendo assim, novos estudos do balanço do carbono equivalente em cafeeiros de diferentes idades, cultivares e arranjos produtivos devem ser desenvolvidos, a fim de caracterizar e demonstrar a “pegada do CO₂ eq” em diferentes cenários.

Agradecimentos

Agradecemos ao Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Sul de Minas Gerais-campus Muzambinho, bem como à Cooperativa Escola dos Alunos, do mesmo Instituto- (COOPAM) e Exportadora de Café Guaxupé LTDA por viabilizarem a realização do presente estudo.

Referências

- Abreu, M. C. S., Albuquerque, A. M. & Freitas, A. R. P. (2015). Uso do Greenhouse Gas Protocol para mensurar emissões de gases de efeito estufa e desenvolver projetos de mitigação. *Revista Pretexto*, Belo Horizonte, 16 (2), 11-30. <https://doi.org/10.21714/pretexto.v16i2.1190>
- Araujo, E. C. G., Silva, T. C. Rocha, M. P. & Sanqueta, C. R. (2021). Estoques de carbono na madeira de Eucalyptus: relação material genético x espaçamento entre árvores. *Revista de Agronegócio e Meio Ambiente*, Maringá, 14 (2), 505-513. <https://doi.org/10.17765/2176-9168.2021v14n2e7998>
- Anderson, B. R. O., Oliveira Junior, G. G. O., Cardoso, D. F., Lopes, L. M. V. & Aparecido, L. E. O. (2021). Estimativa da emissão de carbono equivalente a partir do uso de fertilizantes nitrogenados na cafeicultura: estudo de caso. In: Santos, T. R. *Engenharia Agrônoma: Ambientes Agrícolas e seus Campos de Atuação*. (pp. 22-28) - Ponta Grossa - PR: Atena. <https://doi.org/10.22533/at.ed.4592104053>
- Bayer, C., Amado, T. J. C., Tornquist, C. G., Cerri, C. E. C., Dieckow, J., Zanatta, J. A. & Nicolos, R. S. (2011) Estabilização do carbono no solo e mitigação das emissões de gases de efeito estufa na agricultura conservacionista. *Tópicos de Ciência do Solo*, 7, 55-118.
- Belizário, M. (2013). *Estoque de carbono no solo e fluxo de gases de efeito estufa no cultivo de café*. Tese (Doutorado em Ciências) - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", São Paulo, 143 f. <https://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/11/11140/tde-07052013-103343/pt-br.php>
- Brasil. (2021). Ministério da Ciência e Tecnologia. *Fator médio de Emissão de CO₂ - Inventários corporativos*. Brasília. <https://www.gov.br/mcti/pt-br/acompanhe-o-mcti/cgcl/clima/paginas/fator-medio-inventarios-corporativos> >.
- Brianezi, D., Jacovini, L. A. G., Schettini, B. L.S., Torres, C. M. M. E., Rocha, S. J. S. S., Villanova, P. H. & Neto, S. N. O. (2019). Balanço de carbono em monocultivo de eucalipto com diferentes arranjos espaciais. *Revista Brasileira de Agropecuária Sustentável*, 9 (1), 27-33. <https://doi.org/10.21206/rbas.v9i1.3056>
- Companhia Nacional de Abastecimento - CONAB. (2020). *Acompanhamento da safra brasileira de café - Terceiro Levantamento*. Brasília, 6, (3), 1-54. <http://www.conab.gov.br>>.
- Coltri, P. P., Lazarim, C., Dias, R., Zúlio Junior, J. & Pinto, H. S. (2011). Estoque de carbono em sistema cafeeiros a pleno sol e cultivado com macadâmia no sul de Minas Gerais, Brasil. In: *VII Simpósio de Pesquisas dos Cafés do Brasil*. Araxá - MG. 1-6. Disponível em: http://www.sapc.embrapa.br/arquivos/consorcio/spcb_anais/simposio7/354.pdf. Acesso em: 19 de março de 2022.
- Ferreira, D. F. (2011). Sisvar: a computer statistical analysis system. *Ciência e Agrotecnologia*, Universidade Federal de Lavras, Lavras, 35(6), 1039-1042. <https://doi.org/10.1590/S1413-70542011000600001>
- Gatto, A., Barros, N. F., Novais, R. F., Silva, I. R., Leite, H. G. & Villani, E. M. A. (2011). Estoque de carbono na biomassa de plantações de eucalipto na região Centro-Leste do Estado de Minas Gerais. *Revista Arvore*, Viçosa-MG, 35, (4), 895-905. <https://doi.org/10.1590/S0100-67622011000500015>
- GHG protocol agricultura. (2014). *Metodologia GHG protocol para Agricultura*. São Paulo: Unicamp; WRI Brasil. Greenhouse Gas Protocol. < www.ghgprotocol.org/Agriculture-Guidance/Visão-Geral%3A-Projeto-Brasil-Agropecuária>.
- Intergovernmental Panel on Climate Change. (2014). *Climate change 2014: Synthesis Report*. Geneva, Switzerland: IPCC, 151.
- Köppen, W. (1918). *Klassifikation der Klimate nach Temperatur, Niederschlag und Jahreslauf*. Petermanns Mitt, 64,193-203.
- Oliveira Junior, G. G., Silva, A. B., Mantovani, J. R., Miranda, J. M. & Florentino, L. A. (2015). Levantamento de emissão de gases de efeito estufa pela metodologia do carbono equivalente na cultura do cafeeiro. *Coffee Science*, Lavras, 10 (4), 412-419. <http://repositorio.ufla.br/handle/1/13486>
- Reichaman, D.R. (2018). Big Coffee in Brazil: Historical origins and implications for anthropological political economy. *Journal of latin American and Caribbean Anthropology*, United States, 23 (2), 241-261. <https://doi.org/10.1111/jlca.12293>
- Reis, N. D., Gilbello, F. A., Costa, J. S., Junior, L. G. C., Fontes, R. E. & Machado, A. L. (2021). Emissões de gases efeito estufa na produção de Coffea Canephora. In: Silvestre, L. P. F.; *Ciências Sociais Aplicadas: Desafios metodológicos e resultados empíricos*. (pp. 269-286), Ponta Grossa - PR: Atena. <https://doi.org/10.22533/at.ed.56221140620>
- Sampieri, R. H., Callado, C. F., Lucio, M. D. P. B. (2013). *Metodologia de pesquisa*. 5 ed, Porto Alegre: Editora Penso.
- Santos, C. V., Oliveira, A. F. & Ferreira Filho, J. B.S. (2022). Potential impacts of climate change on agriculture and the economy in different regions of Brazil. *Revista de Economia e Sociologia Rural*, 60(1), e220611. <https://doi.org/10.1590/1806-9479.2021.220611>
- Severino, A. J. (2007). *Metodologia do trabalho científico*. 23 ed. São Paulo: Editora Cortez.
- Silva, A. B., Mantovani, J. R., Moreira, A. L. & Reis, R. L. N. (2013). Estoques de carbono no solo e em plantas dos cafeeiros. *Revista Interciências*, 38, (4), 286-291. Disponível em: <https://www.interciencia.net/>.
- Souza, C. L., Schettino, S., Silva, D. D. & Guimarães, N. V. (2019). Balanço de carbono do processo de produção de madeira de reflorestamento no Norte de Minas Gerais. *Caderno de Ciências Agrárias*, 11, 01-08. doi: <https://doi.org/10.35699/2447-6218.2019.15160>
- Vasconcelos, A. L. S., Ferrao, G. E., Camargo, P. B., Cerri, C. E. P., Pires, I. C. G. & Neto, M. S. (2018). Agricultura e emissões de gases de efeito estufa - estudos de casos no Brasil. *Revista Trópica*, 10, (2), 12-40. <http://periodicoseltronicos.ufma.br/index.php/cctaotropica/article/view/5656>